

REPUBLIQUE ALGERIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

## وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

**Badji Mokhtar Annaba  
University**  
Université Badji Mokhtar  
Annaba  
Faculté de Technologie



جامعة باجي مختار – عنابة  
كلية التكنولوجيا  
قسم الإلكترونيك

**Département Electronique**

### Thèse

Présentée pour obtenir le diplôme de  
**Doctorat Troisième Cycle**

Filière : **ELECTRONIQUE**  
Spécialité : **AUTOMATIQUE ET SIGNAUX**

Présenté par : **TAIF ZAHRA**

---

## Diagnostic et supervision d'un système de production d'énergie électrique ( collecteur parabolique)

---

**Soutenue le 09/04/2026**

<b>Président</b>	Mr. FEZARI Mouhamed	Professeur	UBMA -Annaba
<b>Rapporteur</b>	Mr. LAFIFI Mouhamed Mourad	MCA	UBMA -Annaba
<b>Examineur</b>	Mr. SAIDI Mohamed Larbi	Professeur	UBMA -Annaba
<b>Examineur</b>	Mr. AMARA KORBA Mohamed cherif	Professeur	UMCM -Souk Ahras
<b>Examineur</b>	Mr. MOUSSAOUI Abd karim	Professeur	Université 08 Mai -Guelma

Année Universitaires 2024-2025

---

---

## Dédicace

**Je tiens à dédier ce travail à :**

*Ma très chère mère, **Zina**, et mon très cher père, **Omar**, qui ont toujours veillé sur mon bien-être avec une infinie bienveillance. Leur amour et leur soutien ont été pour moi des sources constantes de force et d'inspiration. Aujourd'hui, je tiens à leur dire un grand merci.*

*À mon époux **Billel**, qui m'a encouragée sans relâche et m'a soutenue à chaque étape de ce parcours, ainsi qu'à mon précieux fils, **Mohammed Ghath** et **Ahmed Joud**, qui m'apportent chaque jour une motivation nouvelle.*

*À mes chers frères **M. Taher**, **Walid**, et **Billel**, ainsi qu'à mes adorées sœurs **Houria** et **Fouzia**, pour leur affection et leur soutien indéfectible. À toute ma famille, les Taif, **Gadgadi** et **Bouhafs**, qui ont été des piliers tout au long de ce chemin.*

*Enfin, mes remerciements les plus sincères vont à toutes les personnes, proches ou lointaines, qui ont contribué, de près ou de loin, à l'aboutissement de ce travail.*

*Votre soutien, vos encouragements et vos conseils ont été essentiels à cette réussite.*

---

---

---

---

## remerciements

*La réalisation de ce travail est le fruit de nombreuses années defforts, de formation et de recherche. Je souhaite exprimer toute ma reconnaissance aux enseignants du département délectronique pour la qualité de leur enseignement et leur soutien constant.*

*Je tiens à remercier tout particulièrement **M. Mohamed Mourad Lafifi**, Maître de Conférences nAz au laboratoire LASA, pour mavoir proposé ce sujet de thèse. Son expertise, ses conseils avisés, son soutien sans faille et le temps quil ma consacré ont été dune grande importance tout au long de cette aventure.*

*Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à **M. FEZARI Mohamed**, Professeur à lUniversité Badji Mokhtar dAnnaba, pour avoir accepté de présider le jury de cette thèse et den assurer lexamen avec une critique constructive et pertinente.*

*Mes remerciements vont également à **M. SAIDI Mohamed Larbi**, Professeur à lUniversité Badji Mokhtar dAnnaba, **M. AMARA KORBA Mohamed Chérif**, Professeur à lUniversité Mohamed Chérif Messaadia de Souk Ahras, et **M. MOUSSAOUI Abd Karim**, Professeur à lUniversité du 08 Mai 1945 de Guelma, pour avoir accepté dexaminer cette thèse. Leur expertise et leurs observations enrichissantes ont grandement contribué à lamélioration de ce travail.*

*Je suis honorée davoir pu présenter mes travaux devant un jury aussi prestigieux et je les remercie sincèrement pour leur implication et leurs précieux retours.*

*Je souhaite enfin adresser mes remerciements les plus sincères à mes collègues et amis du laboratoire dautomatique et signaux (LASA) pour leur soutien amical et constant. Leur présence, leurs encouragements et leur bonne humeur ont été dune aide précieuse tout au long de cette recherche, et je leur exprime ma profonde reconnaissance.*

---

---

---

---

## ملخص

---

### تشخيص وإشراف على نظام إنتاج الطاقة الكهربائية (المجمّع الشمسي المكافئ)

---

تتطلب التحولات العالمية في مجال الطاقة اعتماد تقنيات متجددة فعالة لتلبية الطلب المتزايد مع تقليل الأثر البيئي. تعتبر أنظمة الطاقة الشمسية المركزة *CSP*، وخاصة المجمعات الشمسية الأسطوانية المكافئة، من الحلول الواعدة نظرًا لقدرتها على تركيز الطاقة الشمسية لتوليد الحرارة والكهرباء. ومع ذلك، فإن هذه الأنظمة المعقدة معرضة لأنواع مختلفة من الأعطال، مثل أعطال المستشعرات والمشغلات، مما قد يؤثر على كفاءتها وربحيتها. تقدم هذه الأطروحة منهجية متقدمة للكشف

عن الأعطال وعزلها *FDI*، لمحطات الطاقة الشمسية المركزة باستخدام تقنيات النمذجة والإشراف الحديثة. تم تطوير نموذج شبه متعدد الأنماط *Quazi-LPV*، لتمثيل الديناميكيات غير الخطية لأنظمة *CSP* بدقة. يعتمد هذا النموذج على مزيج محذب من النماذج المحلية الفرعية، المحددة بواسطة رؤوس محدبة *Politope*، مما يتيح تحليلاً قوياً وتطبيقاً فعالاً لطرق التحكم والتشخيص. علاوة

على ذلك، تم تصميم المراقبين المتعددين بأسلوب الإنزلاق *FSMO*، للكشف عن الأعطال وعزلها في محطات *CSP*. تستفيد هذه الطريقة من مزايا النمذجة الضبابية من نوع *Takagi-Sugeno* لتحسين دقة التشخيص وقوته، حتى في بيئات مضطربة. تم التحقق من استقرار وأداء هذه المنهجية باستخدام متباينات المصفوفات الخطية *LMI*، مما يضمن زيادة الحساسية للأعطال ومقاومة عالية للاضطرابات. تم التحقق من صحة المساهمات النظرية والمنهجية للأطروحة من خلال محاكاة رقمية

لنموذج مبسط لنظام توليد الكهرباء بالطاقة الشمسية *SEGS*. تظهر النتائج فعالية المنهجيات المقترحة في الكشف عن الأعطال وعزلها في الوقت الفعلي، مما يساهم في الإدارة الاستباقية والمثلى لمحطات *CSP*. تفتح هذه الدراسة آفاقاً واعدة للتشخيص المتقدم في الأنظمة غير الخطية المعقدة، مع إمكانية تطبيقها في مجالات صناعية أخرى تتطلب موثوقية عالية وصيانة استباقية.

---

**الكلمات المفتاحية:** المجمعات الشمسية الأسطوانية ذات القطع المكافئ أنظمة الطاقة الشمسية المركزة (*CSP*)، كشف وتشخيص الأعطال (*FDI*)، النمذجة بنظام شبه المعلمات المتغيرة خطياً (*Quazi-LPV*) النمذجة الضبابية من نوع تاكاغي-سوجينو (*Takagi-Sugeno*)، المراقبين المتعددين بأسلوب الإنزلاق (*FSMO*).

arabic

---

---

## Résumé

---

### **Diagnostic et supervision d'un système de production d'énergie électrique (collecteur parabolique)**

---

La transition énergétique mondiale exige l'adoption de technologies renouvelables performantes pour répondre à la demande croissante tout en minimisant l'impact environnemental. Les systèmes de production d'énergie solaire à concentration (*CSP*), notamment les collecteurs cylindro-paraboliques (*CCP*), représentent une solution prometteuse grâce à leur capacité à concentrer l'énergie solaire pour générer de la chaleur, puis de l'électricité. Toutefois, ces systèmes complexes sont exposés à divers défauts, tels que des pannes des capteurs et des actionneurs, qui peuvent nuire à leur efficacité et à leur rentabilité. Cette

thèse propose une approche avancée de détection et de diagnostic des défauts (*FDI*) pour les centrales *CSP*, en s'appuyant sur des techniques modernes de modélisation et de supervision. Une modélisation quasi-*LPV* (Linear Parameter Varying) a été développée pour représenter avec précision les dynamiques non linéaires des systèmes *CSP*. Ce modèle est conçu comme une combinaison convexe de sous-modèles locaux, définis par des sommets convexes (polytope), permettant une analyse robuste et une application efficace des méthodes de contrôle et de diagnostic.

Par ailleurs, un Multi Observateur à Mode Glissant (*FSMO*) a été conçu pour détecter et isoler les défauts dans les centrales *CSP*. Cette méthode exploite les avantages de la modélisation floue de type Takagi-Sugeno pour améliorer la précision et la robustesse des diagnostics, même dans des environnements perturbés. Les critères de stabilité et de performance sont vérifiés à l'aide des inégalités matricielles linéaires (*LMI*), garantissant une robustesse et une sensibilité accrues face aux anomalies.

Les contributions théoriques et méthodologiques de cette thèse ont été validées par des simulations numériques sur un modèle simplifié d'une centrale *SEGS* (Solar Electric Generating System). Les résultats obtenus démontrent l'efficacité des approches proposées pour détecter et localiser les défauts en temps réel, contribuant ainsi à une gestion proactive et optimisée des centrales *CSP*.

Cette recherche ouvre des perspectives intéressantes pour le diagnostic avancé des systèmes non linéaires complexes, avec des applications potentielles dans d'autres domaines industriels nécessitant une fiabilité accrue et une maintenance prédictive.

---

#### **Les mots clés :**

Énergie renouvelable, Systèmes de concentration solaire (*CSP*), Collecteurs cylindro-paraboliques, Détection et diagnostic des défauts (*FDI*), Modélisation quasi-*LPV*, Multi Observateur à Mode Glissant (*FSMO*), Modélisation floue Takagi-Sugeno.

---

---

## Abstract

---

### **Diagnosis and Supervision of an Electric Power Generation System (Parabolic Collector)**

---

The global energy transition requires the adoption of efficient renewable technologies to meet growing demand while minimizing environmental impact. Concentrated Solar Power (CSP) systems, particularly parabolic trough collectors (PTCs), offer a promising solution due to their ability to concentrate solar energy for heat and electricity generation. However, these complex systems are vulnerable to various faults, such as sensor and actuator failures, which can compromise their efficiency and profitability.

This thesis presents an advanced approach to Fault Detection and Isolation (FDI) for CSP plants using modern modeling and supervision techniques. A quasi-LPV (Linear Parameter Varying) model was developed to accurately represent the nonlinear dynamics of CSP systems. This model is structured as a convex combination of local sub-models, defined by convex vertices (polytope), enabling robust analysis and efficient application of control and diagnostic methods.

Additionally, a Fuzzy Sliding Mode Observer (FSMO) was designed to detect and isolate faults in CSP plants. This method leverages the advantages of *Takagi – Sugeno* fuzzy modeling to enhance diagnostic precision and robustness, even in perturbed environments. Stability and performance criteria are validated using Linear Matrix Inequalities (LMI), ensuring increased robustness and sensitivity to anomalies.

The theoretical and methodological contributions of this thesis were validated through numerical simulations on a simplified model of a Solar Electric Generating System (SEGS). The results demonstrate the effectiveness of the proposed approaches in real-time fault detection and isolation, contributing to proactive and optimized management of CSP plants. This research opens up promising perspectives for advanced diagnostics in complex nonlinear systems, with potential applications in other industrial fields requiring enhanced reliability and predictive maintenance.

---

#### **Keywords :**

Renewable energy, Concentrated Solar Power (CSP) systems, Parabolic Trough Collectors (PTC), Fault Detection and Isolation (FDI), Quasi-LPV Modeling, Fuzzy Sliding Mode Observer (FSMO), *Takagi – Sugeno* fuzzy modeling.

---

## Lise des symboles

Symbol	Description
$x(.) \in R^n$	Vecteur d'état.
$u(.) \in R^m$	Vecteur de commande.
$y(.) \in R^p$	Vecteur de sortie.
$\hat{X} \in R^n$	Vecteur d'état estimé.
$\hat{Y} \in R^p$	Vecteur de sortie estimée.
$e(.)$	Vecteur d'erreur d'estimation d'état.
$y(.)$	Vecteur d'erreur de reconstruction de la sortie.
$e_y(.)$	Vecteur d'erreur de sortie.
$d(.)$	Vecteur des perturbations extérieures.
$f(.) \in R^f$	Vecteur de défaut.
$\hat{f} \in R^f$	Vecteur de défaut estimé.
$x_f(.) \in R^n$	Vecteur d'état en présence de défaut.
$y_f(.) \in R^p$	Vecteur de sortie en présence de défaut.
$A \in R^{n \times n}$	Matrice d'état.
$B \in R^{n \times m}$	Matrice d'entrée.
$C \in R^{p \times n}$	Matrice de sortie.
$P > 0$	Matrice symétrique, définie positive.
$X1$	Matrice symétrique, définie positive.
$P1$	Matrice symétrique, définie positive.
$P2$	Matrice symétrique, définie positive.
$P^T$	Transposée d'une matrice P.
$P^{-1}$	Inverse d'une matrice P.
$E_a$	Matrice de défaut actionneur.
$E_s$	Matrice de défaut capteur.
$L$	Matrice gain d'observation.

---

<b>Symbol</b>	<b>Description</b>
$K$	Matrice gain de retour d'état PDC.
$KI$	Matrice gain de l'action intégrale.
$G$	Matrice gain d'estimation de défaut.
$N$	Nombre de sous-modèles LTI.
$r$	Nombre des variables de prémisses.
$\varepsilon(.)$	Variable de prémisses.

<b>Symbol</b>	<b>Description au système SEGS</b>
$A$	area, m if surface per length or m <sup>2</sup> if cross-sectional
$Aa, Ba$	HTF flow fraction for heat exchanger train A or B
$Ab, Bb$	HTF flow fraction for reheater A or B
$c$	specific heat, J/kg
$r$	Mass density, kg/
$pc$	specific heat at constant pressure, J/kgK
$d$	input step disturbance
$F$	flow fraction
$G$	irradiance, W/m <sup>2</sup>
$h$	convection heat transfer coefficient, W/m <sup>2</sup> K
$k$	thermal conductivity, W/mK
$L$	length, m
$stlocL, L$	standard and local longitude, deg Length collector mirror length
$m$	mass flow rate, kg/s
$n$	number
$Q$	energy transfer
$Q$	heat transfer rate, W
$q$	heat transfer rate per unit length, W/m
$T$	temperature, K
$t$	time, s
$UAo$	verall heat transfer coefficient and area product, W/K
$V$	volume , m <sup>3</sup>
$V$	volume flow rate, m <sup>3</sup> /s

---

## Liste des Abréviations

<b>Abbréviation</b>	<b>Description</b>
<i>CSP</i>	Centrales solaires à concentration.
<i>CSCP</i>	Centrale solaire à concentrateurs cylindro-parabolique.
<i>SEGS</i>	Système de génération d'électricité solaire.
<i>DSG</i>	Système à génération directe de vapeur.
<i>LFR</i>	Concentrateurs de Fresnel à focalisation linéaire.
<i>HTF</i>	Fluide caloporteur.
<i>ABS</i>	Absorbeur.
<i>amb</i>	ambient in the environment.
<i>Exp</i>	vase d'expansion (Expansion Vessel).
<i>HE</i>	Echangeur de chaleur (Heat Exchanger).
<i>In</i>	L'entrée ( Inlet).
<i>Init</i>	condition initial ( initial condition).
<i>Inlet</i>	Temperature d'entrée de collecteur (inlet of the trough collector field).
<i>L</i>	longueur.
<i>Out</i>	Sortie (outlet).
<i>Steam</i>	Vapeur.
<i>Set</i>	Consigne (set point).
<i>Wind</i>	Vitesse du vent (wind speed).
<i>DSMO</i>	Decentralized sliding mode Observer (Observateur à Mode Glissant Décentralisé).
<i>FDI</i>	Fault Detection and Isolation (Détection et Isolation des Défauts).
<i>LMI</i>	Linear Matrix (ces) Inequality(ies) (Inégalité Matricielle Linéaire).

---

<b>Abbréviation</b>	<b>Description</b>
<i>LPV</i>	Linear Parameter Varying (Linéaire à Paramètre Variant).
<i>LTI</i>	Linear Time Invariant (Linéaire à Temps Invariant).
<i>LTV</i>	Linear Time Variant(Linéaire variant dans le temps).
<i>MIMO</i>	Multi Input Multi Output (Multi-Entrées Multi-Sorties).
Quasi- <i>LPV</i>	Quasi Linear Parameter Varying (Quasi Linéaire à Paramètre Variables).
<i>SMO</i>	Sliding Mode Observer (Observateur à Mode Glissant).
<i>TPC</i>	Transformation Polytopique Convexe.
<i>T – S</i>	Takagi-Sugeno.

---

---

# Table des matières

<b>Liste des figures</b>	<b>xii</b>
<b>Liste des tableaux</b>	<b>xiii</b>
<b>Introduction générale</b>	<b>1</b>
.1 Publications internationales . . . . .	5
.2 Communications internationales . . . . .	5
<b>I Généralité sur concentrateur solaire cylindro parabolique</b>	<b>6</b>
I.1 Introduction . . . . .	6
I.2 Descriptions des différentes technologies de l'énergie solaire . . . . .	7
I.2.1 Technologie photovoltaïque . . . . .	7
I.2.2 L'énergie solaire thermique . . . . .	7
I.3 Les centrales solaires à concentration <i>CSP</i> . . . . .	8
I.4 Différents types des centrales solaires thermiques . . . . .	9
I.4.1 Les centrales solaires à tour . . . . .	10
I.4.2 Centrale solaire à concentrateurs cylindro-paraboliques . . . . .	10
I.4.3 Centrales solaires à miroirs de Fresnel . . . . .	14
I.4.4 Centrales solaires à concentrateurs paraboliques . . . . .	16
I.5 Comparaison des quatre familles de <i>CSP</i> . . . . .	18
I.6 Problème de commande des <i>CSCP</i> . . . . .	18
I.6.1 Technique classique . . . . .	18
I.6.2 Technique moderne . . . . .	20
I.7 Investigations sur le comportement dynamique du <i>CSCP</i> . . . . .	21
I.7.1 Modélisation du <i>CSCP</i> . . . . .	21
I.7.2 Comportement dynamique du <i>CSCP</i> . . . . .	24
I.8 Conclusion . . . . .	24
<b>II Du modèle non linéaire vers multi-modèle</b>	<b>25</b>
II.1 Introduction . . . . .	25
II.2 Représentation des systèmes linéaire à paramètres variables ( <i>LPV</i> ) . . . . .	26
II.2.1 Système <i>LPV</i> polytopique . . . . .	26
II.3 Vers la représentation multi-modèle . . . . .	27
II.3.1 Zone de fonctionnement . . . . .	28
II.3.2 Sous-modèle . . . . .	29
II.3.3 Variable de prémisse . . . . .	29
II.3.4 Fonction d'activation . . . . .	30
II.3.5 Multi-modèles . . . . .	30
II.4 Obtention d'une structure multi-modèles couplée . . . . .	32

II.4.1	Multi-modèles par identification . . . . .	32
II.4.2	Multi-modèles par linéarisation . . . . .	32
II.4.3	Modélisation par l'approche des secteurs non linéaires . . . . .	33
II.5	Stabilité et stabilisation des systèmes flous de <i>Takagi – Sugeno</i> . . . . .	35
II.5.1	Stabilité quadratique des systèmes flous de <i>Takagi – Sugeno</i> . . . . .	35
II.6	Conclusion . . . . .	36
<b>III</b>	<b>Diagnostic des défauts des <i>SEGS</i> à base d'observateurs</b>	<b>38</b>
III.1	Introduction . . . . .	38
III.2	Concepts fondamentaux liés au diagnostic . . . . .	39
III.2.1	Définitions et concepts clés . . . . .	40
III.2.2	Critères d'évaluation des performances . . . . .	42
III.2.3	Classification des modes de fonctionnement . . . . .	42
III.3	Défauts affectant les centrales solaires thermiques . . . . .	43
III.3.1	Recensement des défauts . . . . .	43
III.3.2	Impact sur le système global . . . . .	44
III.3.3	Modélisation des défauts . . . . .	45
III.4	Méthodes de détection et de diagnostic pour les <i>CSP</i> . . . . .	46
III.4.1	Vue d'ensemble des approches . . . . .	46
III.4.2	Concepts de diagnostic à base de Modèle . . . . .	50
III.5	Diagnostic des défauts à base d'observateurs . . . . .	51
III.5.1	Notions d'observabilité dans les systèmes linéaires . . . . .	52
III.5.2	Synthèse d'observateurs pour un système linéaire . . . . .	52
III.5.3	Architecture des bancs d'observateurs . . . . .	54
III.6	Observateurs non linéaires . . . . .	58
III.6.1	Observateur à mode glissant . . . . .	59
III.6.2	Conception de multiobservateurs . . . . .	63
III.7	Conclusion . . . . .	67
<b>IV</b>	<b>Application et résultats</b>	<b>69</b>
IV.1	Introduction . . . . .	69
IV.2	Le modèle simplifié de la centrale solaire ( <i>SEGS</i> ) . . . . .	70
IV.2.1	Présentation Générale du <i>SEGS</i> . . . . .	70
IV.2.2	Architecture du Modèle Simplifié . . . . .	70
IV.2.3	Formulation Mathématique . . . . .	71
IV.2.4	Synthèse des Hypothèses . . . . .	73
IV.3	Obtention d'un système <i>T – S</i> pour le modèle <i>SEGS</i> . . . . .	76
IV.4	Modélisation du système <i>SEGS</i> en présence des défauts capteurs . . . . .	81
IV.4.1	Application de l'approche de détection des défauts à base de <i>FSMO</i> . . . . .	81
IV.4.2	Résultat et simulation . . . . .	82
IV.5	Discussion et interprétation des résultats . . . . .	89
IV.6	Conclusion . . . . .	90
	<b>Conclusion générale</b>	<b>91</b>
	<b>Références</b>	<b>94</b>
	<b>Appendix A</b>	<b>101</b>

---

---

## Liste des figures

I.1	La ceinture solaire désigne les régions du globe où l'ensoleillement direct moyen annuel dépasse $2000 kWh/m^2/an$ . . . . .	8
I.2	Organigramme pour une centrale typique de CSP . . . . .	9
I.3	Les quatre familles de technologies CSP [16] . . . . .	10
I.4	Schéma de principe du système récepteur à tour solaire (CRS) . . . . .	11
I.5	Schéma d'une installation de centrale solaire cylindro-parabolique . . . . .	12
I.6	Description du système cylindro-parabolique . . . . .	12
I.7	Une centrale cylindro-paraboliques à caloporteur huile . . . . .	13
I.8	Une centrale à capteurs cylindro-paraboliques à génération directe de vapeur(DSG) . . . . .	14
I.9	Présentation schématique d'un récepteur à réflecteur linéaire de Fresnel . . . . .	15
I.10	Schéma de principe du système réflecteur linéaire de Fresnel (LFR) . . . . .	16
I.11	Description de système parabole-Stirling . . . . .	16
I.12	Schéma de principe du système récepteur parabolique (DS) . . . . .	17
I.13	Volume de Contrôle . . . . .	21
II.1	Schéma de principe de l'approche multi-modèles a)–Système non linéaire b)–, c)– Représentation multi-modèles . . . . .	29
II.2	méthodes d'obtention des multi-modèles . . . . .	33
III.1	Classification des principales méthodes de détection et diagnostic . . . . .	47
III.2	Les différentes étapes d'une méthode de détection et diagnostic de défauts . . . . .	50
III.3	Un schéma simple de génération de résidu . . . . .	51
III.4	Principe de l'observateur . . . . .	53
III.5	Diagramme structurel d'observateur de Luenberger . . . . .	54
III.6	Observateur DOS pour la détection des défauts capteurs . . . . .	55
III.7	Observateur GOS pour la détection des défauts capteurs . . . . .	56
III.8	Observateur GOS pour la détection des défauts d'actionneurs . . . . .	57
IV.1	Architecture du modèle simplifié . . . . .	71
IV.2	Estimation d'entrées inconnue $\bar{u}(t)$ . . . . .	83
IV.3	Les états du système(SEGS) et sont estimé . . . . .	83
IV.4	a) les sorties du système et sont estimé en en absence des défauts, b) Les résidus en absence des défauts . . . . .	86
IV.5	Comparaison entre les températures réelle et sont estimées en présence d'un défaut dans la mesure de la température de sortie de collecteur (Résidus correspondant à un défaut dans le capteur 1) . . . . .	87
IV.6	. Diagnostic des défauts de capteur 1 et 3 . . . . .	88

---

---

## Liste des tableaux

I.1	Comparaison des quatre familles de <i>CSP</i> . . . . .	19
III.1	Signatures théoriques des défauts (résidus dédiés). . . . .	56
III.2	Signatures théoriques des défauts (résidus généralisés). . . . .	58
IV.1	Tableau des modèles locaux (partitionnement des variables de prémisses). . .	79
IV.2	Modes de Défaillances d'une <i>SEGS</i> . . . . .	82
IV.3	Table de signatures théoriques pour les défauts capteurs . . . . .	85

---

## Introduction générale

L'humanité fait face à des défis environnementaux sans précédent, dont le changement climatique, largement attribué à l'augmentation des émissions de gaz à effet de serre (*GES*) en raison des activités humaines. Cette problématique a des impacts significatifs sur les écosystèmes, les sociétés humaines et les économies mondiales. Parmi les secteurs les plus concernés par cette problématique, celui de l'énergie occupe une place prépondérante, étant responsable d'environ deux tiers des émissions mondiales de *GES*. Face à cette situation, il devient impératif d'opérer une transition vers des systèmes énergétiques durables, capables de répondre aux besoins croissants de la population mondiale tout en minimisant l'impact environnemental.

Le rôle des énergies renouvelables dans cette transition est crucial. L'énergie solaire, en particulier, se distingue par son potentiel inépuisable, sa disponibilité universelle et son faible impact environnemental comparé aux combustibles fossiles. Parmi les technologies de production d'énergie solaire, les systèmes photovoltaïques et les centrales solaires thermiques à concentration (*CSP*) sont des solutions prometteuses pour remplacer les sources d'énergie traditionnelles. Cependant, malgré les progrès réalisés, des défis subsistent concernant l'efficacité, la fiabilité et l'intégration de ces systèmes dans les réseaux énergétiques modernes.

Les centrales solaires thermiques à concentration (*CSP*) ont démontré un potentiel important pour la production d'énergie thermique et électrique. Ces systèmes utilisent des technologies sophistiquées telles que les miroirs paraboliques, les tours solaires ou les disques paraboliques pour concentrer la lumière solaire et produire de la chaleur à haute température. Cette chaleur est ensuite convertie en électricité via des cycles thermodynamiques, comme le cycle de Rankine. Malgré leur robustesse, ces systèmes restent vulnérables à des défaillances, principalement dues à leur complexité et aux conditions climatiques variables, rendant leur fonctionnement susceptible de dysfonctionnements qui affectent la performance des centrales et leur rentabilité.

Les défaillances, si elles ne sont pas détectées et corrigées rapidement, peuvent entraîner des pertes d'énergie, des pannes prolongées et des coûts d'exploitation accrus. Dans ce contexte, la détection précoce et l'isolation des défauts (*FDI*) deviennent essentielles pour assurer une exploitation optimale des centrales *CSP*. Les méthodes traditionnelles de diagnostic, souvent basées sur des modèles linéaires, présentent des limites face à la nature intrinsèquement non linéaire de ces systèmes. Il est donc nécessaire de développer des outils plus performants et adaptatifs, capables de capturer les dynamiques complexes des centrales *CSP* tout en fournissant des diagnostics précis et rapides.

La modélisation joue un rôle central dans la conception, la commande et le diagnostic des systèmes industriels. Les modèles traditionnels basés sur des approximations linéaires autour des points d'équilibre sont couramment utilisés pour leur simplicité et la compatibilité avec des outils analytiques bien établis. Cependant, ces modèles deviennent inadaptés lorsque les systèmes fonctionnent dans des plages de conditions étendues où les phénomènes non linéaires deviennent dominants. Pour surmonter ces limitations, des approches non linéaires, telles que la modélisation floue de type *Takagi – Sugeno* ( $T - S$ ), se révèlent particulièrement efficaces. Les modèles  $T - S$  permettent de décomposer un système complexe en une combinaison convexe de sous-modèles linéaires locaux. Chaque sous-modèle capture les dynamiques locales du système dans différentes régions de fonctionnement, ce qui permet une description fidèle du comportement global du système.

Dans le contexte des centrales *CSP*, la modélisation floue de type *Takagi – Sugeno* présente plusieurs avantages. Elle permet de représenter les dynamiques complexes de ces systèmes et de concevoir des observateurs robustes pour la détection et le diagnostic des défauts. Ces observateurs, tels que les observateurs à modes glissants, présentent des performances élevées en termes de robustesse face aux perturbations et de sensibilité aux défauts. Cela est essentiel pour garantir la fiabilité et l'efficacité des centrales *CSP*.

Les méthodes de détection et de diagnostic des défauts peuvent être classées en trois grandes catégories, en fonction de la source des connaissances utilisées pour modéliser le système. La première catégorie regroupe les approches basées sur les modèles, qu'ils soient quantitatifs ou qualitatifs. Ces méthodes reposent sur la nécessité de développer un modèle précis du comportement du système supervisé, ce qui permet de prédire son fonctionnement normal et de détecter des anomalies. La deuxième catégorie regroupe les approches basées sur les données historiques, qui exploitent des ensembles de données pour analyser le comportement du système. Ces méthodes se concentrent sur l'extraction d'informations liées aux états normaux et anormaux en se basant sur des observations passées. Enfin, la troisième catégorie regroupe les approches hybrides, qui combinent des modèles théoriques avec des données expérimentales.

Dans le cas des centrales *CSP*, les modèles linéaires traditionnels montrent leurs limites pour capturer les interactions non linéaires entre les différents composants du système. De plus, les méthodes basées sur les données peuvent ne pas répondre efficacement aux exigences des systèmes en temps réel, où une interprétation rapide et précise des données est essentielle.

## **Objectifs et contributions de la thèse**

Cette thèse s'inscrit dans un cadre scientifique et technologique en constante évolution, où la recherche et le développement de méthodes avancées pour la détection et le diagnostic des défauts dans les centrales solaires thermiques à concentration (*CSP*) occupent une place centrale. L'objectif principal de cette thèse est de proposer une approche robuste et efficace reposant sur la modélisation floue de type *Takagi – Sugeno* ( $T - S$ ) et l'utilisation de Multi Observateurs à Modes Glissants (*FSMO*). L'idée sous-jacente à cette approche est de garantir une détection précise et rapide des défauts dans les centrales *CSP*, tout en

assurant la fiabilité, la stabilité et l'optimisation de leur performance à long terme.

Les contributions spécifiques de cette thèse sont multiples et visent à répondre aux défis techniques posés par les systèmes non linéaires complexes et les dynamiques variables des centrales *CSP*. La première contribution consiste à développer un modèle quasi-*LPV* pour décrire les dynamiques non linéaires d'une centrale *CSP*. Ce modèle a pour objectif de fournir une représentation fidèle du comportement du système, tout en étant suffisamment flexible pour être compatible avec les outils de commande et de diagnostic avancés. Le modèle quasi-*LPV* permet de prendre en compte les variations des paramètres du système tout en simplifiant l'analyse de son comportement global, facilitant ainsi la conception de stratégies de contrôle et de détection des défauts plus efficaces.

La deuxième contribution porte sur la conception de Multi Observateurs à Modes Glissants (*FSMO*), qui constituent un outil essentiel pour la détection et la localisation des défauts dans les systèmes *CSP*. Cet observateur s'appuie sur les avantages de la modélisation floue de type  $T - S$  pour assurer une détection précise et robuste des anomalies dans des environnements complexes. L'utilisation d'un observateur permet de surveiller chaque sous-système indépendamment, tout en prenant en compte l'interdépendance des différents composants du système global. Cette approche de détection permet une localisation précise des défauts, contribuant ainsi à une gestion proactive et une optimisation des coûts de maintenance.

Enfin, les approches développées seront validées à travers des simulations sur un modèle simplifié d'une centrale *SEGS* (Solar Electric Generating System), permettant ainsi de tester leur efficacité et leur applicabilité dans des conditions réelles. Ces simulations seront utilisées pour analyser le comportement du modèle face à différents types de défauts et pour évaluer la performance des observateurs décentralisés à mode glissant. Ce processus de validation expérimentale est essentiel pour démontrer la fiabilité des solutions proposées et évaluer leur impact potentiel dans des centrales solaires thermiques réelles.

## **Organisation de la thèse**

Cette thèse est structurée en quatre chapitres principaux.

### **Le premier chapitre**

présente un aperçu des énergies renouvelables, avec un focus particulier sur la technologie de concentration solaire (*CSP*). Ce chapitre explore les différentes configurations des systèmes *CSP*, leurs avantages et inconvénients respectifs, ainsi les techniques de commande utilisées pour optimiser leur fonctionnement.

## **Le deuxième chapitre**

aborde la modélisation des systèmes à paramètres variant dans le temps (*LPV*) ainsi que des systèmes quasi-*LPV* polytopiques. Il introduit les principes de la modélisation des systèmes non linéaires et explore l'approche multi-modèle de *Takagi – Sugeno* ( $T - S$ ). Une attention particulière est portée sur les concepts de stabilité et de stabilisation des modèles flous  $T - S$ , analysés à l'aide d'inégalités linéaires matricielles (*LMI*), une méthode puissante pour garantir la robustesse des systèmes.

## **Le troisième chapitre**

présente les concepts fondamentaux liés à la détection et à la localisation des défauts (*FDI*) dans les centrales solaires thermiques. Ce chapitre dresse également un état des lieux des recherches sur les défauts susceptibles d'affecter ces centrales et présente une revue des méthodes de détection et de diagnostic des défauts, en mettant l'accent sur les observateurs comme outils essentiels pour l'estimation de l'état et la détection des anomalies.

## **Le quatrième chapitre**

cur de cette thèse, propose un modèle simplifié d'une centrale *SEGS*, réécrit sous forme quasi-*LPV*. Il décrit les principaux défauts susceptibles d'affecter ce modèle ainsi que les méthodes de détection associées.

---

# Liste des Publications

## .1 Publications internationales

-Zahra, T., Mourad, L.M., Ahmed, A.H. (2020). Robust fuzzy sliding mode observer for faults detection in solar power plant application. Instrumentation Mesure Métrologie, Vol. 19, No. 4, pp.281-287. <https://doi.org/10.18280/i2m.190405>

## .2 Communications internationales

-PEMC2014 conference Antalya in Turkey Paper Title : Diagnosis of a Solar Power Plant using TS Fuzzy-based Multi Model Approach

- PEMC2014 conference Antalya in Turkey Paper Title : Noise Emission Analysis a Way for Early Detection and Classification Faults in Rotating Machines.

- 3rdInternational Conference on Information Processing and Electrical Engineering (ICIPEE14) Paper Title : Intelligent Predictive Control of Solar Power Plant using a Fuzzy Multimodel

-International Conference on Automatic Control, Telecommunications and Signals (ICATS15) Annaba, Algeria Paper Title : Diagnosis of a Solar Power Plant using fuzzy sliding mode observe

-International Conference on Automatic Control, Telecommunications and Signals (ICATS15) Annaba, Algeria Paper Title : Model Predictive Control of a Solar Power plant Based on Fuzzy Kalman Filter

---

# Généralité sur concentrateur solaire cylindro parabolique

## I.1 Introduction

Les technologies solaires à concentration (*CSP*) jouent un rôle crucial dans la transition énergétique mondiale en offrant des solutions durables et efficaces. Elles contribuent à la réduction des émissions de gaz à effet de serre en remplaçant les combustibles fossiles par une source d'énergie renouvelable inépuisable [1, 2]. Ces systèmes permettent d'atteindre des températures élevées, ce qui les rend particulièrement efficaces pour la production d'électricité pour applications industrielles nécessitant de la chaleur. De plus, les *CSP* peuvent intégrer des systèmes de stockage thermique, garantissant une fourniture d'électricité même lorsque le soleil ne brille pas. Ce développement technologique stimule également la création d'emplois, tout en favorisant l'innovation dans le secteur de l'énergie renouvelable. En résumé, les *CSP* représentent une voie prometteuse vers un avenir énergétique durable, combinant efficacité, durabilité et réduction de l'impact environnemental [3, 4].

Dans ce chapitre, nous aborderons quatre technologies de concentration solaire, qui convertissent l'énergie solaire en chaleur à haute température, puis en énergie mécanique et finalement en électricité à travers un cycle thermodynamique. Nous fournirons une vue d'ensemble et une description des différentes technologies *CSP*, en expliquant comment elles exploitent la chaleur du soleil pour produire de la vapeur destinée à alimenter des générateurs conventionnels. De plus, nous soulignerons que la plupart de ces technologies sont déjà disponibles dans l'industrie et peuvent être intégrées à des centrales à combustibles fossiles.

## **I.2 Descriptions des différentes technologies de l'énergie solaire**

### **I.2.1 Technologie photovoltaïque**

La technologie photovoltaïque (*PV*) convertit directement la lumière du soleil en électricité grâce à l'effet photovoltaïque. Ce processus repose sur des cellules solaires, généralement fabriquées à partir de silicium, qui génèrent un courant électrique lorsqu'elles sont exposées à la lumière. Les systèmes photovoltaïques peuvent être installés sur des toits, des terrains ou intégrés dans des bâtiments, offrant ainsi une grande flexibilité d'application.

L'énergie photovoltaïque présente de nombreux avantages, notamment la réduction des émissions de gaz à effet de serre, l'indépendance énergétique et la possibilité d'alimenter des zones éloignées sans accès au réseau électrique. De plus, les coûts des panneaux solaires ont considérablement diminué ces dernières années, rendant cette technologie de plus en plus accessible.

Cependant, la production d'énergie photovoltaïque est intermittente, dépendant des conditions d'ensoleillement. Pour pallier cette variabilité, des solutions de stockage, comme les batteries, et des systèmes de gestion de l'énergie sont souvent nécessaires. En somme, la technologie photovoltaïque représente une solution prometteuse pour la transition vers un système énergétique durable et décarboné [5].

### **I.2.2 L'énergie solaire thermique**

Aujourd'hui, l'énergie thermique solaire à concentration (*CSP*) joue un rôle essentiel dans la production d'électricité. Ces systèmes exploitent exclusivement le rayonnement solaire direct (*DNI*) et doivent suivre la trajectoire du soleil tout au long de la journée pour optimiser la captation de la lumière solaire. En raison de leur besoin en fort ensoleillement, ils ne conviennent pas à toutes les régions géographiques. La Figure 1.1 montre les potentiels d'installation des systèmes *CSP* à travers le monde [6, 7].

Les meilleurs sites pour implanter des technologies *CSP* se trouvent dans la ceinture équatoriale, souvent appelée la ceinture solaire, où l'ensoleillement est maximal. C'est dans ces zones que la production d'électricité solaire est la plus efficace. La Figure 1.1 indique que les systèmes *CSP* sont particulièrement adaptés aux régions méditerranéennes, au Moyen-Orient, dans le sud-ouest des États-Unis et dans les déserts australiens. Pour que les centrales *CSP* rivalisent avec les centrales thermiques traditionnelles, il est crucial qu'elles soient établies dans des zones fortement ensoleillées, contribuant ainsi à la lutte contre le changement climatique à l'échelle mondiale [8].

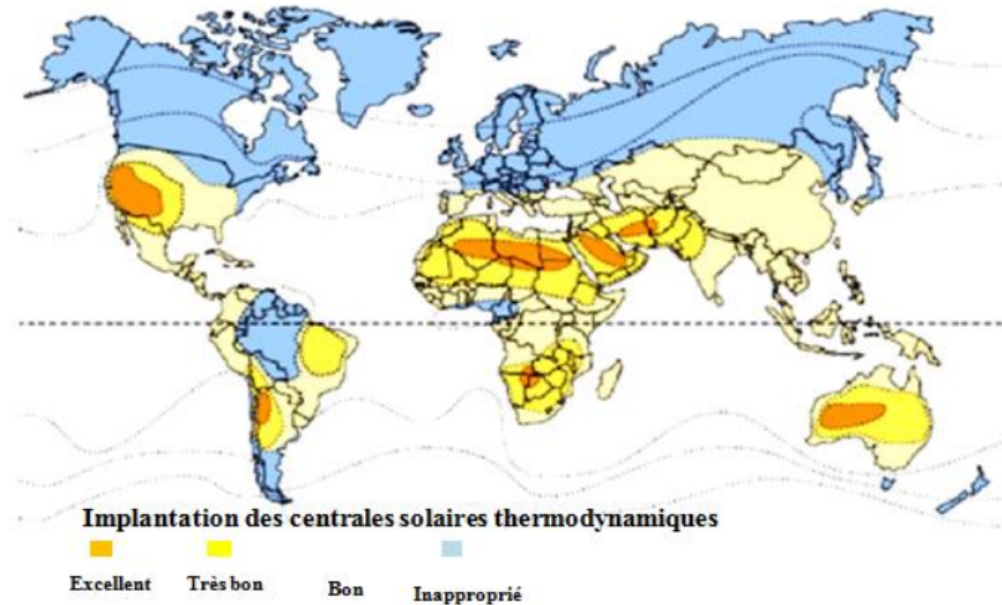


FIG. I.1 : La ceinture solaire désigne les régions du globe où l'ensoleillement direct moyen annuel dépasse  $2000 kWh/m^2/an$

### I.3 Les centrales solaires à concentration CSP

Les technologies solaires à concentration (CSP) occupent une place centrale dans la lutte contre les défis énergétiques contemporains et futurs. En exploitant la chaleur du soleil, une ressource d'énergie inépuisable et accessible chaque jour, ces systèmes répondent aux besoins croissants en électricité de manière durable. L'un de leurs principaux atouts réside dans leur capacité à stocker la chaleur durant la journée pour une utilisation nocturne, ce qui en fait une solution parmi les plus économiquement viables au sein des énergies renouvelables, tout en se positionnant de manière compétitive par rapport aux centrales à combustibles fossiles [9].

Comme l'illustre la Figure I.2, une centrale CSP typique se compose de trois sous-systèmes clés : un champ de collecteurs solaires, un récepteur solaire et un système de conversion d'énergie. Ces éléments travaillent en synergie pour maximiser l'efficacité du système. De plus, l'intégration de solutions de secours, comme l'hybridation avec des sources d'énergie conventionnelles ou le stockage d'énergie, permet d'améliorer significativement les performances et d'accroître le facteur de capacité [10, 12]. Ces innovations garantissent une continuité de l'approvisionnement énergétique même pendant les périodes non ensoleillées, répondant ainsi aux exigences des consommateurs et des industries.

Des projets tels que la centrale Ivanpah en Californie, qui utilise des technologies CSP pour produire plus de 392 MW d'électricité, illustrent la viabilité et l'efficacité de ces systèmes à grande échelle. De plus, des études récentes ont montré que l'optimisation des collecteurs et des systèmes de stockage peut augmenter le rendement de production jusqu'à 30 %, renforçant encore la position des CSP dans le mix énergétique mondial.

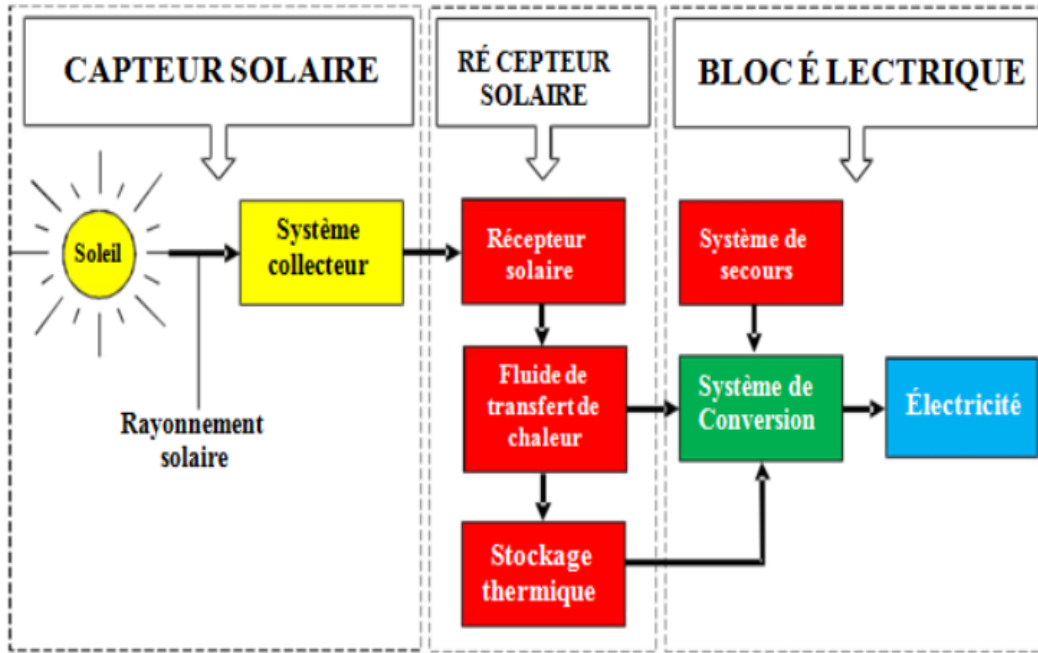


FIG. I.2 : Organigramme pour une centrale typique de CSP

## I.4 Différents types des centrales solaires thermiques

Actuellement, on distingue quatre grandes catégories de technologies de concentration solaire, correspondant à autant de types de centrales solaires thermiques. Les centrales à collecteurs cylindro-paraboliques sont les plus avancées et dominant clairement le marché, grâce à leur capacité à concentrer le rayonnement solaire sur un ligne focale, ce qui permet d'atteindre des températures élevées.

Ensuite, on trouve les centrales à tour, qui utilisent un grand nombre de miroirs orientables (héliostats) pour concentrer la lumière sur un récepteur situé au sommet d'une tour, optimisant ainsi la conversion de l'énergie solaire. Les concentrateurs paraboliques, quant à eux, sont souvent plus adaptés à des installations décentralisées, bien qu'ils puissent également être utilisés dans des systèmes de grande puissance. Enfin, les centrales à réflecteurs de Fresnel, qui utilisent des miroirs plats ou légèrement courbés pour diriger la lumière vers des tubes récepteurs, représentent une option efficace et moins coûteuse, bien qu'elles ne soient pas encore aussi répandues.

Ces différentes technologies, chacune avec ses caractéristiques et applications spécifiques, contribuent à la diversification du paysage énergétique solaire, offrant des solutions adaptées aux besoins variés en matière de production d'énergie.

Les quatre configurations de CSP sont représentées sur la Figure I.3 [14, 15].





Récepteur	Concentrateurs linéaires	Concentrateurs ponctuels
<p><b>Système fixe</b></p> <p>Récepteur fixe qui reste mécaniquement indépendant du système de concentration</p> <p>La température de travail réalisable dépend du rapport de concentration</p>	 <p>Concentrateur de Fresnel</p>	 <p>Centrale de tour solaire</p>
<p><b>Système mobile</b></p> <p>Le récepteur se déplace avec le système de concentration.</p> <p>Les récepteurs mobile collectent plus d'énergie de rayonnement que les récepteurs fixes correspondant</p>	 <p>Cylindro-parabolique</p>	 <p>Parabole Dish-Stirling</p>

FIG. I.3 : Les quatre familles de technologies CSP [16]

#### I.4.1 Les centrales solaires à tour

Les centrales solaires à tour représentent une technologie avancée de concentration solaire, utilisant une architecture innovante pour maximiser l'efficacité de la conversion de l'énergie solaire. Dans ce système, un grand nombre de miroirs orientables, appelés héliostats, sont disposés autour d'une tour centrale. Ces miroirs suivent le mouvement du soleil tout au long de la journée, concentrant la lumière solaire sur un récepteur situé au sommet de la tour Figure I.4.

Cette configuration permet d'atteindre des températures très élevées de 800 °C à 1000 °C [10]. souvent supérieures à celles des autres technologies de concentration. La chaleur ainsi générée peut être utilisée pour produire de la vapeur, qui entraîne une turbine pour générer de l'électricité. De plus, certaines centrales à tour intègrent des systèmes de stockage thermique, permettant de conserver l'énergie produite pendant la journée pour une utilisation ultérieure, même la nuit [17].

Les centrales solaires à tour sont particulièrement adaptées aux zones ensoleillées et offrent un potentiel significatif pour la production d'énergie à grande échelle, contribuant ainsi à une transition vers des sources d'énergie renouvelables [15]. Leur flexibilité et leur efficacité en font une option prometteuse pour l'avenir de l'énergie solaire.

#### I.4.2 Centrale solaire à concentrateurs cylindro-paraboliques

Au cours des 33 dernières années, les centrales solaires utilisant la technologie cylindro-parabolique ont démontré qu'elles constituent une alternative efficace et fiable pour le secteur de l'énergie commerciale [18]. Cette technologie est actuellement l'une des plus

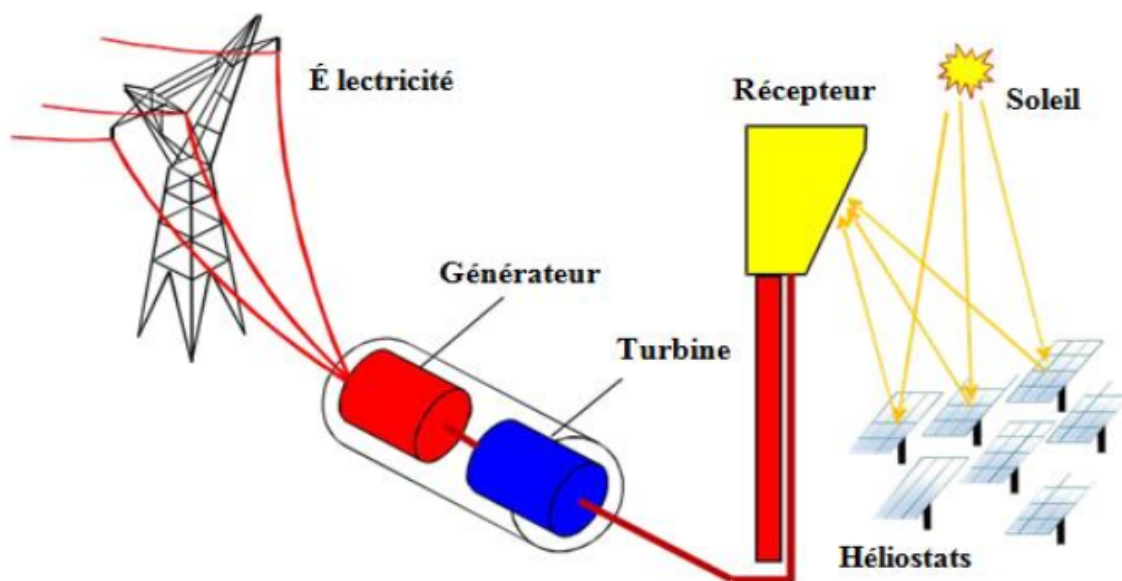


FIG. I.4 : Schéma de principe du système récepteur à tour solaire (CRS)

éprouvées dans le domaine de la concentration solaire.

Une installation typique de ce type se compose de trois éléments principaux : un champ solaire, un système de transfert de chaleur, et un système de génération électrique, comme le montre la Figure I.5. Le champ solaire, constitué de collecteurs cylindro-paraboliques, capte et concentre le rayonnement solaire, tandis que le système de transfert de chaleur permet de transporter l'énergie thermique vers le générateur électrique, assurant ainsi une conversion optimale de l'énergie solaire en électricité [7].

Un système cylindro-parabolique est constitué de feuilles de matériau réfléchissant façonnées en une forme parabolique. Ces feuilles sont assemblées en série pour créer des collecteurs cylindro-paraboliques. Ces modules sont ensuite soutenus au sol par des structures simples placées à chaque extrémité, comme l'illustre la Figure I.6. Cette conception permet de maximiser la concentration des rayons solaires sur un récepteur central, optimisant ainsi l'efficacité du système.

Le récepteur, un tube en métal noir, est situé sur la ligne focale du concentrateur et est enveloppé dans un tube en verre pour minimiser les pertes de chaleur par convection. Les miroirs, dont l'axe de rotation est généralement orienté Nord-Sud, permettent un suivi efficace du soleil tout au long de la journée, de l'Est à l'Ouest. La Figure I.6 ci-dessous illustre la configuration du système cylindro-parabolique [19].

L'énergie thermique captée par le collecteur est absorbée par ce tube métallique à l'intérieur d'un tube en verre sous vide. Le fluide caloporteur, souvent une huile synthétique, circule à l'intérieur du tube et est chauffé à des températures atteignant environ  $400^{\circ}\text{C}$ . Ce fluide est ensuite pompé à travers des échangeurs de chaleur conventionnels pour produire de la vapeur surchauffée, qui entraîne une turbine pour générer de l'électricité.

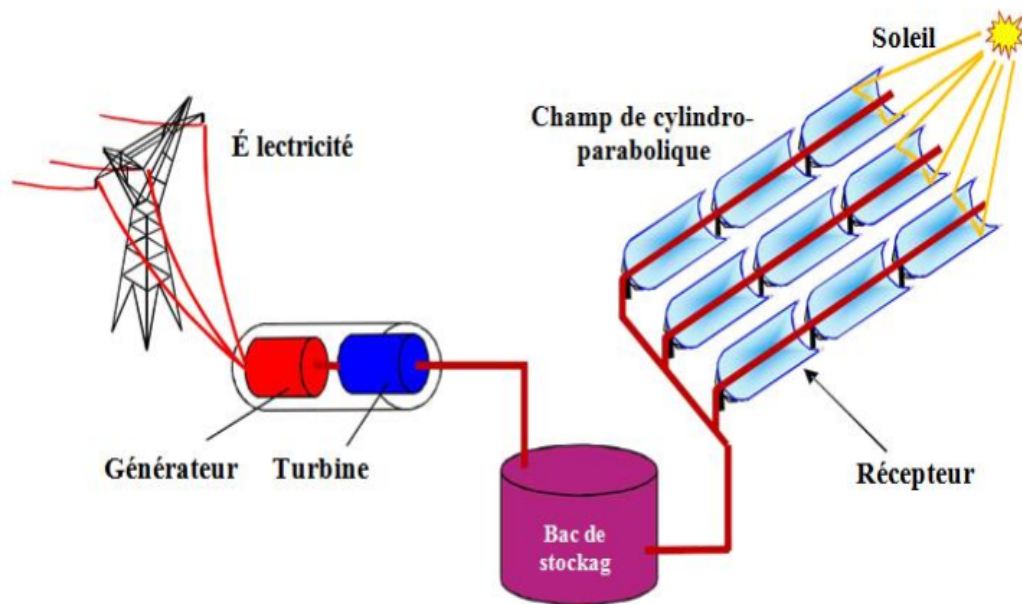


FIG. I.5 : Schéma d'une installation de centrale solaire cylindro-parabolique

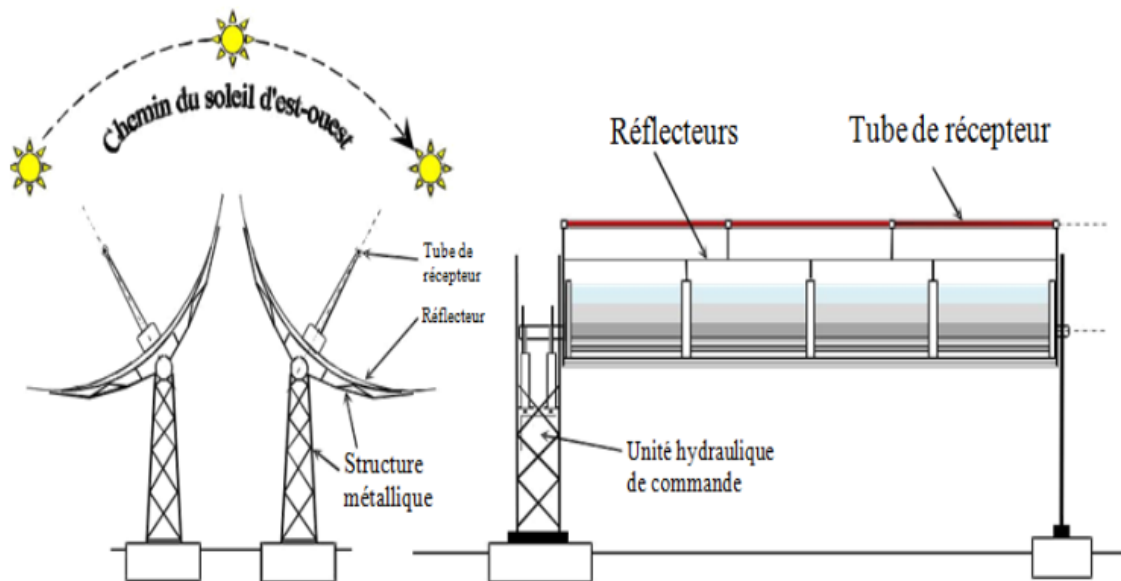


FIG. I.6 : Description du système cylindro-parabolique

La technologie des systèmes à concentrateurs cylindro-paraboliques (*CSCP*) repose sur des miroirs qui dirigent le rayonnement solaire vers un récepteur où circule un fluide caloporteur, tel que l'huile synthétique ou un mélange eau-vapeur. Cette installation est généralement limitée aux terrains plats, avec une pente inférieure à 3 %, et se décline en deux principales technologies [20].

## Le système cylindro-parabolique à caloporteur huile

Les systèmes cylindro-paraboliques utilisant un caloporteur à huile représentent actuellement la technologie la plus mature et éprouvée dans le domaine de la concentration solaire. Ces installations affichent un facteur de concentration optique relativement faible, se situant entre 40 et 80. Le fluide caloporteur, contenu dans l'absorbeur, permet d'absorber la chaleur sans changement de phase, facilitant ainsi le stockage d'énergie avec un seul type de fluide. Dans l'absorbeur solaire, l'huile circule à travers plusieurs échangeurs de chaleur pour produire de la vapeur dans la boucle secondaire, avec une limite de stabilité du fluide atteignant environ 400 °C [1].

Sur la base de cette technologie, neuf centrales ont été mises en service, connues sous le nom de systèmes électriques à génération solaire (SEGS), situées dans le désert de Mojave en Californie, aux États-Unis, avec une capacité totale de 354 MW et installées entre 1981 et 1991. De plus, les projets ANDASOL 1 et 2, dotés d'une puissance électrique de 50 MW chacun, se trouvent en Andalousie, en Espagne, intégrant un système de stockage thermique par le biais de deux réservoirs de sels fondus. La Figure I.7 ci-dessous illustre le schéma simplifié de ces centrales SEGS, soulignant leur conception innovante et leur contribution à la production d'énergie renouvelable [20, 24].

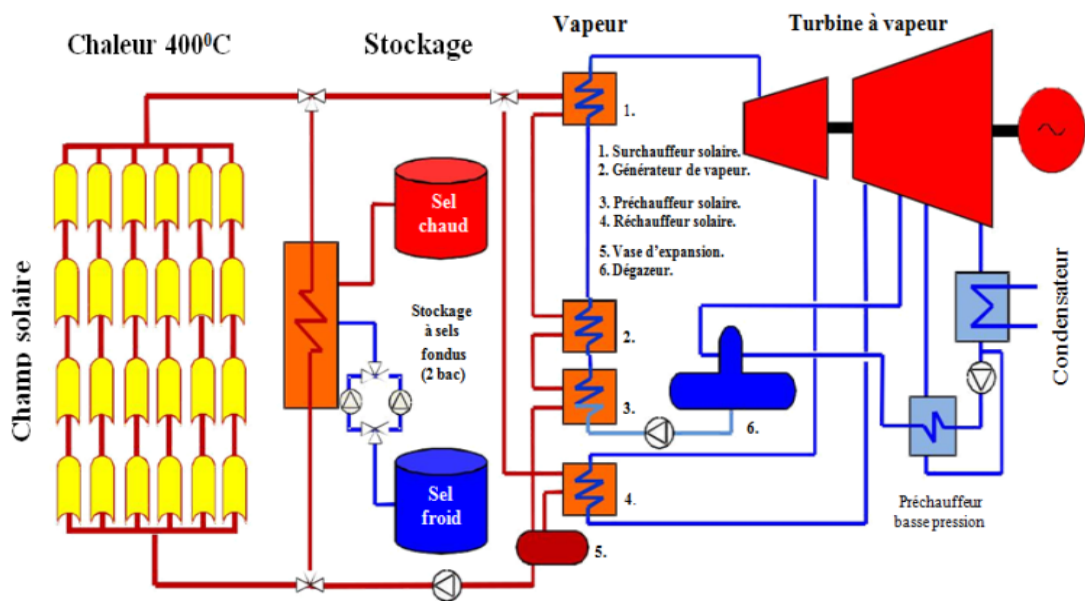


FIG. I.7 : Une centrale cylindro-paraboliques à caloporteur huile

## Les systèmes à génération directe de vapeur

Cette technologie, désignée sous le nom d'installations à génération directe de vapeur (DSG), remplace le fluide caloporteur habituel à base d'huile par de l'eau. Cela simplifie considérablement le cycle de production, comme l'illustre la Figure I.8.

Considérée comme une avancée majeure dans la catégorie des systèmes à concentration solaire cylindro-paraboliques (CSCP), cette approche permettrait de réduire significati-

vement les coûts d'investissement, d'exploitation et de maintenance des centrales commerciales utilisant cette technologie [18]. La température de fonctionnement de l'eau peut atteindre jusqu'à 450°C. Parmi les nombreux avantages de l'utilisation de l'eau dans ces centrales, on note son coût inférieur, une diminution des risques environnementaux, une réduction des pertes thermiques, une moindre puissance nécessaire pour le pompage, ainsi qu'une augmentation de la limite de température.

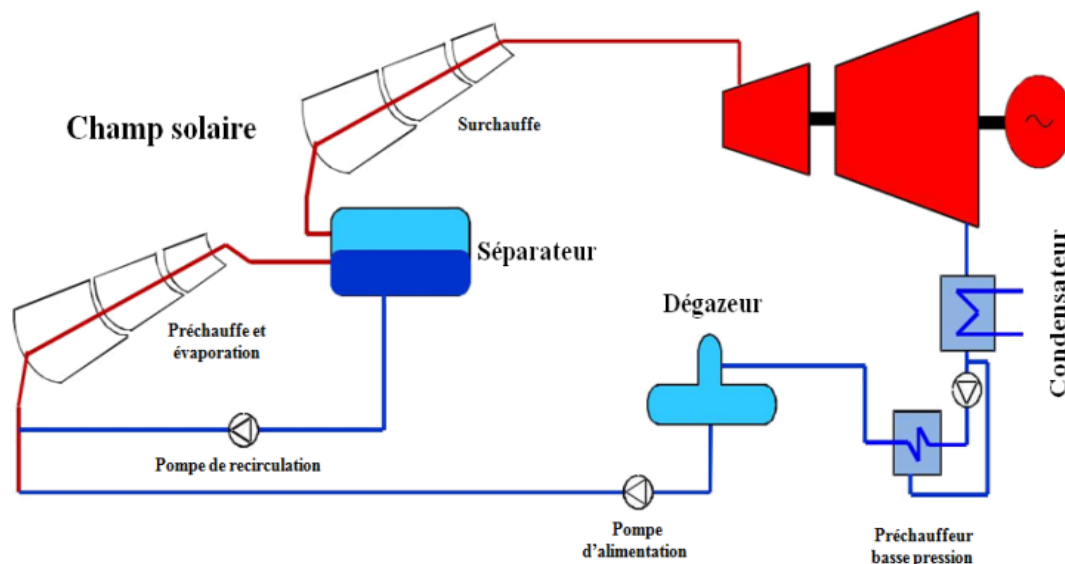


FIG. I.8 : Une centrale à capteurs cylindro-paraboliques à génération directe de vapeur (DSG)

Un des principaux défis de ce concept concerne les conditions de température et de pression nécessaires pour la détente dans une turbine à vapeur, qui avoisinent 100 bars et 400 °C. À ces niveaux, l'écoulement diphasique stratifié de l'eau dans les tubes absorbeurs engendre des effets d'asymétrie et d'instabilité, entraînant des gradients de température importants qui peuvent compromettre la durabilité des matériaux employés.

### I.4.3 Centrales solaires à miroirs de Fresnel

Les centrales solaires à miroirs de Fresnel utilisent un système de miroirs plats ou légèrement courbés pour concentrer la lumière solaire sur un récepteur linéaire situé au-dessus des miroirs. Ces miroirs, appelés miroirs de Fresnel, sont disposés en rangées et orientés pour suivre le mouvement du soleil, maximisant ainsi la captation de l'énergie solaire [26].

Le principe de fonctionnement repose sur la concentration du rayonnement solaire, qui est dirigé vers le récepteur où un fluide caloporteur, souvent de l'eau ou une huile thermique, circule. Ce fluide est chauffé à des températures élevées, permettant la production de vapeur qui entraîne des turbines pour générer de l'électricité.

Les avantages des centrales à miroirs de Fresnel incluent leur coût généralement inférieur par rapport aux systèmes à concentrateurs cylindro-paraboliques, en raison de la simplicité

de leur conception. Elles peuvent également être intégrées dans des installations à plus grande échelle et sont adaptées à des terrains variés.

Cependant, elles présentent des défis, notamment en matière de stockage de l'énergie et de performance dans des conditions de faible irradiation. Les systèmes de stockage thermique, souvent sous forme de sels fondus, peuvent être ajoutés pour améliorer l'efficacité énergétique et permettre la production d'électricité même lorsque le soleil ne brille pas.

Le récepteur est composé par des éléments suivants [23] :

- Le tube absorbant : Il s'agit d'un cylindre qui capte la chaleur concentrée par les miroirs (Figure I.9).
- Le réflecteur secondaire : Ce demi-cylindre est placé au-dessus du tube absorbant et a pour fonction d'augmenter le facteur de concentration du système, optimisant ainsi la captation de l'énergie solaire.
- La vitre : Cette paroi en verre est conçue pour réduire les pertes thermiques par convection, tout en permettant au rayonnement solaire de pénétrer et d'atteindre le tube absorbant.

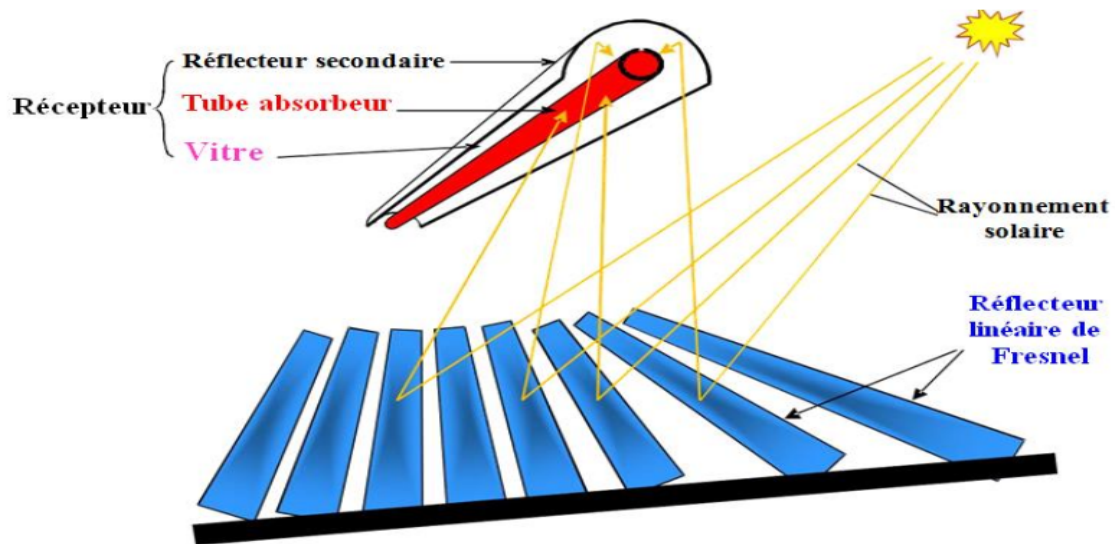


FIG. I.9 : Présentation schématique d'un récepteur à réflecteur linéaire de Fresnel

Un premier niveau de réflecteurs est installé au sol, ce qui permet au rayonnement de se réfléchir vers le foyer de la parabole, constitué par l'ensemble des miroirs. Ce dispositif est conçu pour concentrer efficacement le rayonnement.

Au-dessus de ce premier niveau, un second niveau de réflecteurs redirige le rayonnement concentré vers le tube récepteur. Ce second niveau joue un double rôle : d'une part, il assure la réflexion du rayonnement, et d'autre part, il sert d'isolant pour le tube récepteur. Pour cela, sa partie supérieure est recouverte d'une épaisse couche d'isolation, qui limite les pertes thermiques. La partie inférieure du dispositif est protégée par un vitrage, qui offre une isolation supplémentaire tout en permettant à la lumière de passer (voir Figure I.10).

Ainsi, l'ensemble de ce système de réflecteurs optimise à la fois la concentration du rayonnement et l'efficacité thermique du tube récepteur.

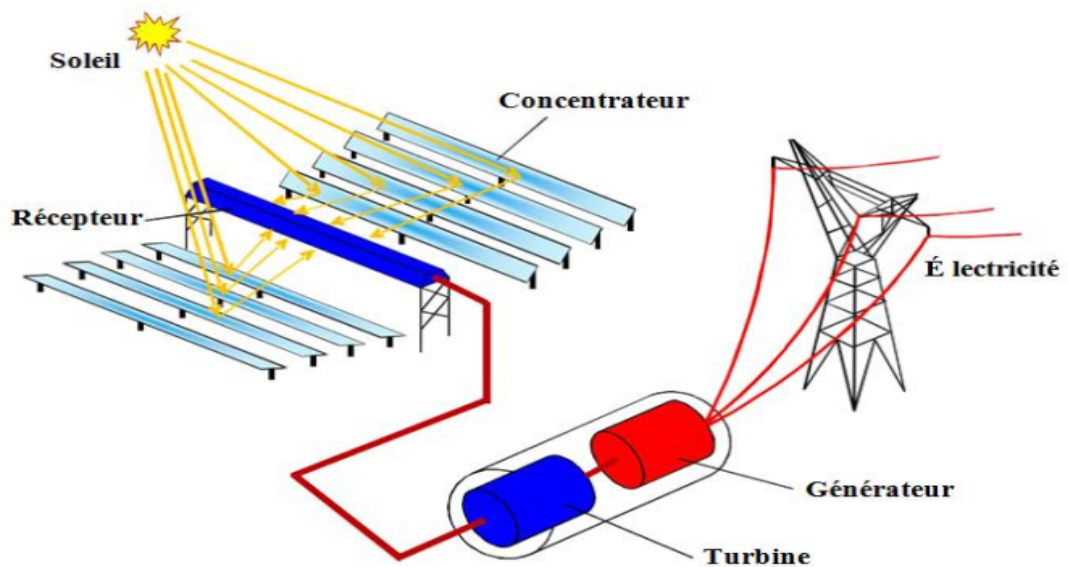


FIG. I.10 : Schéma de principe du système réflecteur linéaire de Fresnel (LFR)

#### I.4.4 Centrales solaires à concentrateurs paraboliques

Les centrales solaires à concentrateurs paraboliques de type parabole-Stirling sont des systèmes performants de production d'énergie solaire, qui combinent des miroirs paraboliques et un moteur Stirling pour convertir l'énergie solaire en électricité [24]. Le principe repose sur un grand miroir parabolique qui concentre les rayons solaires en un point focal, où la chaleur est captée et transformée en énergie mécanique, puis en électricité. Figure I.11.

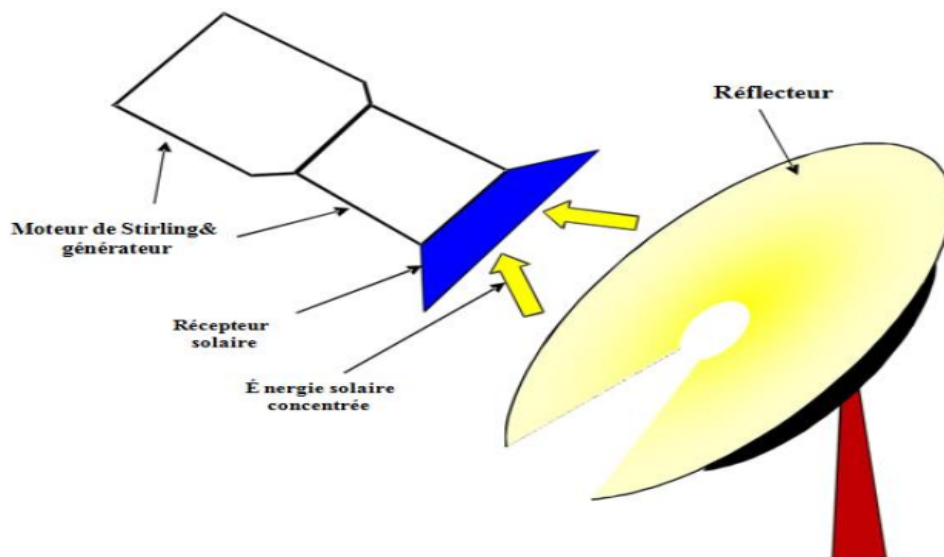


FIG. I.11 : Description de système parabole-Stirling

Le fonctionnement de ces centrales est basé sur l'utilisation d'un miroir parabolique

pour concentrer la lumière solaire vers un récepteur thermique placé au foyer de la parabole. Ce récepteur absorbe l'énergie solaire et la transfère à un moteur Stirling, un dispositif thermodynamique qui fonctionne en utilisant la différence de température entre une source chaude (le récepteur solaire) et une source froide (généralement l'air ambiant). À l'intérieur du moteur, un gaz, tel que l'hélium ou l'hydrogène, est comprimé et dilaté en fonction des variations de température, ce qui actionne un piston. Ce mouvement mécanique est ensuite converti en électricité par un générateur [25] comme illustré dans la Figure I.12.

En outre, les centrales parabole-Stirling présentent une faible empreinte carbone, car elles n'émettent pas de gaz à effet de serre pendant leur fonctionnement. Elles sont également bien adaptées à des environnements désertiques, où les conditions d'ensoleillement sont optimales, et permettent d'exploiter des zones où d'autres technologies solaires seraient moins efficaces.

L'un des principaux avantages de cette technologie réside dans son rendement énergétique élevé. Les centrales parabole-Stirling peuvent atteindre des rendements thermiques supérieurs à 30 %, grâce à la forte concentration de la lumière solaire et à l'efficacité du moteur Stirling. De plus, la modularité de ces systèmes permet de déployer des unités individuelles, ce qui les rend particulièrement adaptés pour des installations à plus petite échelle ou dans des régions isolées.

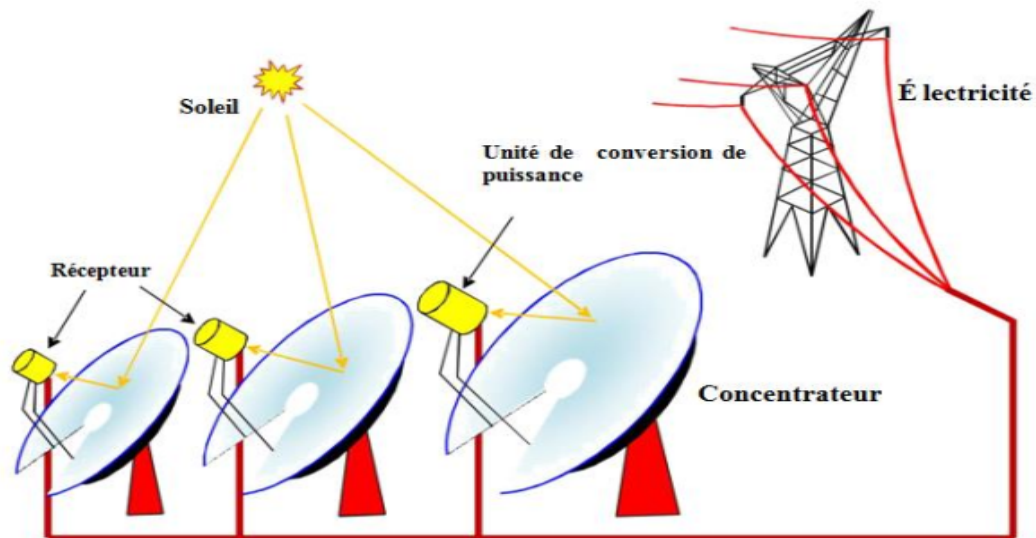


FIG. I.12 : Schéma de principe du système récepteur parabolique (DS)

Cependant, cette technologie comporte également des défis. Les coûts initiaux sont relativement élevés en raison des matériaux et des technologies nécessaires, notamment les miroirs paraboliques de haute précision et le moteur Stirling, qui nécessite une maintenance régulière. De plus, comme toutes les technologies de concentration solaire, ces centrales dépendent d'un ensoleillement direct, ce qui peut limiter leur efficacité dans des régions moins ensoleillées ou par temps nuageux.

## **I.5 Comparaison des quatre familles de CSP**

Le tableau I.5 est un tableau comparatif des quatre principales technologies de centrales solaires à concentration (CSP) [10, 16, 25, 26] :

## **I.6 Problème de commande des CSCP**

Pour concentrer efficacement les rayons solaires. Cependant, maximiser le rendement ne garantit pas toujours un fonctionnement optimal. L'optimum opérationnel n'est pas nécessairement associé au rendement énergétique maximal, mais plutôt à un rendement ajusté selon les besoins énergétiques à un moment donné. Autrement dit, il est parfois préférable de réguler la production d'énergie en fonction de la demande ou des conditions externes, ce qui nécessite un contrôle fin de la production thermique.

De nombreuses études ont porté sur la gestion et le contrôle de l'énergie thermique produite dans ces systèmes. L'objectif principal de ces recherches est de réguler la température de sortie du tube récepteur de manière à suivre une consigne précise, qui dépend des besoins énergétiques instantanés [5, 11]. Cela permet de garantir que l'énergie produite soit non seulement suffisante, mais également adaptée aux exigences du réseau ou des utilisateurs finaux.

Pour répondre à ce défi, deux grandes approches de contrôle ont été proposées : les techniques classiques et modernes.

### **I.6.1 Technique classique**

La technique classique de contrôle des centrales solaires à concentration consiste à ajuster l'orientation du concentrateur parabolique en fonction de la direction du flux de rayonnement solaire incident. L'objectif est d'optimiser la concentration de l'énergie solaire sur le tube récepteur afin d'atteindre la température de sortie désirée [21]. Ce procédé repose essentiellement sur l'ajustement manuel de l'intensité de rayonnement concentrée, suivant une approche empirique. Toutefois, cette méthode présente des limites importantes.

Le principal inconvénient de cette technique réside dans sa dépendance à des règles empiriques, souvent fondées sur des observations passées, sans modélisation précise du système. De plus, dans des systèmes complexes comme les centrales solaires, l'incertitude et les fluctuations des conditions environnementales sont inévitables, rendant la précision impérative pour maintenir un fonctionnement optimal. Cette méthode est particulièrement vulnérable aux perturbations externes telles que les changements brusques de l'intensité solaire, provoqués par des passages nuageux, ainsi que l'accumulation de sable ou d'impuretés sur les miroirs réflecteurs, réduisant la qualité de la réflexion des rayons. Par conséquent, cette approche ne permet pas d'atteindre les performances désirées en présence de telles perturbations, limitant son efficacité opérationnelle.

TAB. I.1 : Comparaison des quatre familles de CSP

Technologie de CSP	Cylindroparabolique	Récepteur central (tour)	Parabole (Dish)	Réflecteur de Fresnel
Principe	Concentration linéaire avec des miroirs cylindroparaboliques qui focalisent la lumière sur un tube récepteur	Miroirs héliostats réfléchissent la lumière vers un récepteur situé au sommet d'une tour	Miroirs paraboliques concentrent la lumière sur un moteur Stirling	Miroirs plats ou légèrement courbés concentrent la lumière sur un tube récepteur
Température de fonctionnement	300 à 400°C	600 à 1500°C	500 à 800°C	200 à 400°C
Rendement énergétique	Moyennement élevé (15–20%)	Très élevé (jusqu'à 35%)	Élevé (25–30%)	Faible à modéré (10–15%)
Coût d'installation	Modéré	Élevé	Élevé (en raison de la complexité du moteur Stirling)	Faible à modéré
Ensoleillement nécessaire	Ensoleillement direct, bonne tolérance aux variations	Besoin d'un ensoleillement direct intense	Ensoleillement direct requis pour un fonctionnement optimal	Ensoleillement direct mais peut tolérer des variations
Fluide caloporteur (HTF)	Huile synthétique, sel fondu, eau/vapeur	Air, sel fondu, eau/vapeur	Air	Huile synthétique, eau/vapeur
Maintenance	Moyenne, maintenance régulière des tubes récepteurs	Maintenance élevée, nettoyage des héliostats et entretien du récepteur de la tour	Maintenance élevée, surtout pour le moteur Stirling	Faible, structure simple et facile à entretenir
Machine thermodynamique	Turbine à vapeur	Turbine à gaz ou turbine à vapeur	Moteur de Stirling	Turbine à vapeur

Stockage thermique	Sel fondu, béton, <i>PCM</i>	Sel fondu, béton, <i>PCM</i>	Sel fondu, céramique, <i>PCM</i>	Sel fondu, céramique, <i>PCM</i>
Avantages	Technologie bien établie – Stockage thermique facile – Convient aux grandes installations	Rendement élevé – Très bon stockage thermique – Capacité à grande échelle	Très bon rendement – Convient aux petites unités modulaires – Excellente efficacité dans les zones désertiques	Simple et peu coûteux – Moins de terrain nécessaire – Installation plus facile
Inconvénients	Rendement limité par rapport aux tours solaires – Moins efficace à haute température	Coûts d'installation élevés – Besoin de nettoyage fréquent des héliostats	Coût élevé et complexité technique – Problème de stockage de l'énergie	Faible rendement – Moins efficace à haute température – Technologie moins mature

### **I.6.2 Technique moderne**

La technique moderne de contrôle s'appuie sur une approche plus sophistiquée qui exploite la relation physique entre la vitesse du fluide circulant dans le tube récepteur et sa température. Il est bien connu que lorsque la vitesse du fluide est faible, il reste plus longtemps exposé au rayonnement solaire concentré, ce qui élève sa température. À l'inverse, à une vitesse plus élevée, le fluide passe plus rapidement à travers le tube récepteur et atteint une température plus basse. Cette relation inversement proportionnelle entre la vitesse et la température du fluide permet de contrôler précisément la température de sortie du fluide en modifiant son débit.

Pour cela, une pompe à débit variable est installée à l'entrée du tube récepteur, permettant de réguler la vitesse du fluide en fonction des besoins thermiques. En ajustant le débit volumétrique de la pompe, il devient possible de moduler la température du fluide à la sortie du tube récepteur [21]. Cette méthode repose sur un système d'asservissement qui permet un contrôle automatique et dynamique du processus.

Le processus de cette approche moderne se décompose en trois étapes principales :

1► Définition des objectifs : Il s'agit d'identifier l'objectif thermique visé (la température de sortie désirée) et de spécifier les variables de commande (le débit du fluide) et les variables à contrôler (la température du fluide).

2► Modélisation du système : Une relation mathématique est établie pour décrire le comportement dynamique du système, c'est-à-dire la manière dont le débit influe sur la température du fluide. Cette modélisation permet de comprendre et de prédire la réponse du système face aux variations du débit.

3► Application de la théorie de commande : Sur la base de la modélisation effectuée, des algorithmes de contrôle (comme les régulateurs *PID* ou les stratégies de contrôle prédictif) sont appliqués pour ajuster automatiquement le débit de la pompe en fonction des écarts observés par rapport à la consigne, garantissant ainsi que la température de sortie soit maintenue à la valeur souhaitée. Cette approche moderne offre une régulation plus précise et plus réactive face aux variations des conditions solaires et thermiques, tout en minimisant les pertes d'énergie et en optimisant l'efficacité globale du système. Elle permet également une meilleure gestion des perturbations externes, rendant les centrales solaires à concentration plus performantes et robustes dans des environnements variés.

## I.7 Investigations sur le comportement dynamique du *CSCP*

### I.7.1 Modélisation du *CSCP*

La modélisation des centrales solaires à concentration parabolique (*CSCP*) est un processus essentiel pour comprendre et optimiser leur fonctionnement. Elle implique la représentation mathématique des différentes composantes du système, des interactions entre celles-ci et des phénomènes thermiques et hydrauliques qui régissent la production d'énergie. Une modélisation précise permet non seulement d'anticiper le comportement du système sous différentes conditions d'exploitation, mais aussi de concevoir des stratégies de contrôle efficaces pour améliorer les performances [5].

La modélisation de l'évolution de la température du fluide dans le tube récepteur débute par l'élaboration d'un bilan énergétique. Pour cela, nous nous concentrons sur un petit segment du tube s'étendant entre  $z$  et  $z + \Delta z$  comme illustré dans la Figure I.13.

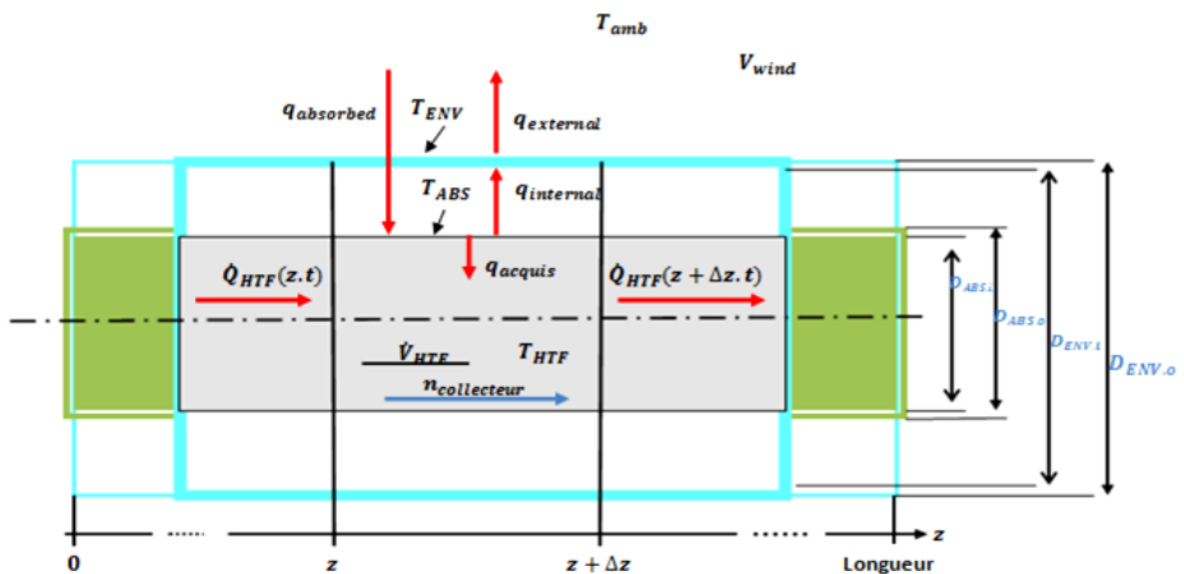


FIG. I.13 : Volume de Contrôle

L'équation différentielle partielle régissant la température du fluide, en tenant compte de l'évolution dans le temps  $t$ , est formulée comme suit :

$$\frac{d}{dt}(\Delta Q_{HTF}(z, t)) = (Q_{HTF}(z, t) - Q_{HTF}(z + \Delta z, t)) + q_{acquis}(z, t)\Delta z \quad (I.1)$$

Ou :

$q_{acquis}$  : est le transfert de chaleur par unité de longueur entre l'absorbeur et le fluid.  
Il résulte de la thermodynamique :

$$\Delta Q_{HTF}(z, t) = \rho_{HTF}c_{HTF}A_{ABS,i}\Delta z T_{HTF}(z, t) \quad (I.2)$$

Ou :

$\rho_{HTF}, c_{HTF}$  : sont la densité et la chaleur spécifique du fluide (respectivement).

$T_{HTF}(z, t)$  : est la température de fluide, qui est en fonction du temps et de la position longitudinale  $z$ . Où les deux premiers dépendent de ce dernier.

$A_{ABS,i}$  : est la superficie de la section transversale du tube.

La liste de toutes les dimensions de collecteur est donnée à l'annexe A.

Il résulte également de thermodynamique.

$$\dot{Q}_{HTF}(z, t) \frac{dQ_{HTF}(z, t)}{dt} = \rho_{HTF}c_{HTF} \frac{V_{HTF}(t)}{n_{collecteurs}} T_{HTF}(z, t) \quad (I.3)$$

Telle que :

$V_{HTF}$  : est le débit volumique de fluide dépend uniquement du temps car le fluide est considéré comme incompressible.

$n_{collecteurs}$  : est le nombre de collecteurs. ( $n = 50$  collecteurs).

Substituons I.2, I.3 dans I.1, mène à :

$$\rho_{HTF}c_{HTF}A_{ABS,i}\Delta z \frac{dT_{HTF}(z, t)}{dt} = \rho_{HTF}c_{HTF} \frac{\dot{V}_{HTF}(t)}{n_{collecteurs}} \left[ T_{HTF}(z, t) - T_{HTF}(z + \Delta z, t) \right] + q_{acquis}(z, t)\Delta z \quad (I.4)$$

De la définition du dérivé, il suit :

$$\frac{\partial T_{HTF}(z, t)}{\partial t} = \lim_{\Delta z \rightarrow 0} \frac{T_{HTF}(z, t) - T_{HTF}(z + \Delta z, t)}{\Delta z} \quad (I.5)$$

La division de I.4 par  $\Delta z$ , et lorsque  $\Delta z$  tend vers zéro nous obtenons le modèle suivant :

$$\rho_{HTF}c_{HTF}A_{ABS,i} \frac{\partial T_{HTF}(z, t)}{\partial z} = \rho_{HTF}c_{HTF} \frac{V_{HTF}(t)}{n_{collecteurs}} \frac{\partial T_{HTF}(z, t)}{\partial z} + q_{acquis}(z, t) \quad (I.6)$$

La condition à la limite de l'équation I.6 est :

$$T_{HTF}(0, t) = T_{HTF.inlet}(t) \quad (I.7)$$

Où :  $T_{HTF.inlet}(t)$  est la température du fluide à l'entrée du tube-récepteur.

$$T_{HTF}(z, 0) = T_{HTF.inlet}(t) \quad (I.8)$$

En analogie à l'équation I.1. L'équation différentielle de la température d'absorbeur,  $T_{ABS}$ , est obtenue :

$$\left(\frac{\partial}{\partial t}\right)(\Delta Q_{ABS}(z, t)) = q_{absorbed}(t) - q_{internal}(z, t) - q_{acquis}(z, t)\Delta z \quad (I.9)$$

Ici,  $q_{internal}$  est le transfert de chaleur par longueur entre l'absorbeur et l'enveloppe de verre. L'énergie solaire absorbée est  $q_{absorbed}$ . La thermodynamique mène à :

$$\Delta Q_{ABS}(z, t) = \rho_{ABS}C_{ABS}A_{ABS}\Delta z T_{ABS}(z, t) \quad (I.10)$$

Tell que  $\rho_{ABS}$ ;  $C_{ABS}$ ;  $T_{ABS}$  sont respectivement : la densité de l'absorbeur, la chaleur spécifique et la température.  $A_{ABS}$  est la section transversale de l'absorbeur.

Substituons I.10 dans I.9, mène après division par  $\Delta z$  à :

$$\rho_{ABS}C_{ABS}A_{ABS}\frac{\partial T_{ABS}(z, t)}{\partial t} = q_{absorbed}(t) - q_{internal}(z, t) - q_{acquis}(z, t) \quad (I.11)$$

La condition initiale de l'équation :

$$T_{ABS}(z, 0) = T_{ABS.init}(z) \quad (I.12)$$

L'enveloppe de verre est supposée n'avoir aucun gradient de température radial. L'équation différentielle de la température de l'enveloppe est obtenue grâce à des considérations similaires à celles utilisées pour obtenir l'équation différentielle de la température de l'absorbeur :

$$\rho_{ENV}C_{ENV}A_{ENV}\frac{\partial T_{ENV}(z, t)}{\partial t} = q_{internal}(z, t) - q_{external}(z, t) \quad (I.13)$$

Avec :

$\rho_{ENV}$ ;  $C_{ENV}$  et  $T_{ENV}$  sont respectivement : la densité de l'enveloppe, la chaleur spécifique et la température. Le transfert de chaleur par longueur entre l'enveloppe et l'environnement est  $q_{external}$ . La condition initiale de l'équation :

$$T_{ENV}(z, 0) = T_{ENV.init}(z) \quad (I.14)$$

La dynamique d'interaction des températures donnée par les équations différentielles I.6, I.11 et I.13 est déterminée par le transfert de chaleur entre le fluide  $HTF$ , l'absorbeur et l'enveloppe.

## **I.7.2 Comportement dynamique du CSCP**

La température de sortie du collecteur dans une centrale solaire à concentration parabolique est affectée par plusieurs facteurs clés, notamment les fluctuations de l'intensité du rayonnement solaire, la température d'entrée du fluide caloporteur, le débit volumique, la température ambiante, ainsi que la vitesse du vent. Chacun de ces paramètres joue un rôle crucial dans la régulation de la température et, par conséquent, dans l'efficacité du système de collecte d'énergie solaire.

Le comportement dynamique de la centrale est modélisé à l'aide d'un cadre mathématique constitué d'équations algébriques différentielles non linéaires. Ce modèle mathématique, comme discuté précédemment, permet de capturer les interactions complexes entre les différentes variables en jeu. La résolution de ces équations est essentielle, car elle offre la possibilité d'analyser et de prédire le comportement dynamique du système au fil du temps, en réponse aux variations des conditions environnementales.

Cependant, obtenir des solutions analytiques à ces équations s'avère souvent difficile en raison de leur non-linéarité et de la complexité inhérente aux équations différentielles partielles (*EDP*) concernées. Cela rend nécessaire l'adoption de méthodes numériques, qui permettent de simuler et d'étudier le comportement dynamique de la centrale solaire de manière plus détaillée. Ces simulations fournissent des informations précieuses sur le fonctionnement du système, permettant ainsi d'optimiser son efficacité et d'adapter les stratégies de contrôle en fonction des variations des conditions ambiantes [4, 11, 20].

## **I.8 Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons examiné le problème de commande d'un système de production d'énergie régi par des équations aux dérivées partielles. Dans un premier temps, nous avons établi un état des lieux des centrales solaires thermiques, en décrivant leurs principes de fonctionnement ainsi que les différentes technologies associées. Par la suite, nous avons procédé à une classification des différents types de stations solaires thermiques. Nous avons également mis en évidence les défis liés au contrôle de ces systèmes et les diverses techniques qui ont été proposées pour y remédier. Enfin, nous avons synthétisé une modélisation mathématique du comportement dynamique de ce système en nous basant sur les lois de conservation de l'énergie.

Ce chapitre a démontré l'importance significative du problème traité dans cette thèse au sein du secteur industriel, tout en permettant une meilleure compréhension de la technologie des concentrateurs solaires. Dans le chapitre suivant, nous nous pencherons sur une méthode de linéarisation de ce système complexe, caractérisé par des équations différentielles non linéaires, afin de tirer parti de certaines propriétés mathématiques lors de la conception des lois de commande et de la surveillance de ce processus.



---

## Du modèle non linéaire vers multi-modèle

### II.1 Introduction

Ces dernières années, les concentrateurs solaires cylindro-paraboliques se sont imposés comme une référence parmi une vaste gamme de concentrateurs solaires, suscitant un intérêt croissant dans le domaine de la recherche. Leur popularité s'explique par leur capacité à optimiser et à contrôler efficacement l'énergie thermique produite. Toutefois, la principale difficulté réside dans la complexité du modèle non linéaire qui régit leur fonctionnement, rendant la synthèse des contrôleurs délicate et difficile à mettre en œuvre. Pour surmonter cet obstacle, l'approche privilégiée consiste à représenter ces systèmes par des modèles *LPV* (Linear Parameter Varying), et plus spécifiquement par des multi-modèles de type *Takagi – Sugeno (TS)*.

Dans ce chapitre, nous présentons, d'une part, des définitions et théorèmes fondamentaux qui sont indispensables pour une compréhension approfondie des outils et méthodes décrits dans ce mémoire. D'autre part, nous offrons une synthèse bibliographique des principaux problèmes rencontrés dans la modélisation des systèmes non linéaires, avec un accent particulier sur la représentation et la stabilisation de ces systèmes à l'aide des multi-modèles *TS*.

L'organisation de ce chapitre est structurée de la manière suivante : dans la première section, nous introduisons la modélisation des systèmes *LPV* ainsi que les systèmes *LPV* polytopiques. Ensuite, nous explorons les systèmes non linéaires et l'approche multi-modèles *TS*. Enfin, la dernière partie est consacrée aux principes fondamentaux de la stabilité et à la stabilisation des multi-modèles flous de *Takagi – Sugeno*.

## II.2 Représentation des systèmes linéaire à paramètres variables (LPV)

Un système *LPV* est décrit par des équations d'état linéaires dont les matrices de dynamique dépendent de paramètres variant au cours du temps. Ces paramètres, appelés paramètres programmants ou paramètres de variation [27, 30, 31], sont notés  $\xi(t) \in \mathbb{R}^L$ , et peuvent dépendre de l'état du système ou d'entrées externes, comme les conditions environnementales ou des variables de commande.

L'équation générale d'un système *LPV* s'écrit sous la forme :

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = A(\xi(t))x(t) + B(\xi(t))u(t), \\ y(t) = C(\xi(t))x(t), \end{cases} \quad (\text{II.1})$$

où  $A \in \mathbb{R}^{n \times n}$ ,  $B \in \mathbb{R}^{n \times m}$ ,  $C \in \mathbb{R}^{p \times n}$  sont des matrices représentant l'espace d'état qui varient en fonction du paramètre variable  $\xi(t)$ .

$\xi(t)$  est le vecteur des paramètres variables dans le temps [28].

Le terme *LPV* (Linear Parameter Varying) désigne des systèmes dynamiques dont les paramètres peuvent être mesurés et connus en temps réel, permettant ainsi de représenter le système comme linéaire tout en tenant compte des variations de ces paramètres. En revanche, un système *LTV* (Linear Time-Varying) est caractérisé par des coefficients qui varient uniquement en fonction du temps, faisant de lui un cas particulier d'un système *LPV* [32]. Dans un système *LTV*, le vecteur des paramètres variables est équivalent au temps lui-même, c'est-à-dire :

$$\xi(t) = t; L = 1$$

Il est possible de rapprocher des systèmes non linéaires à l'aide d'une catégorie spécifique de systèmes *LPV*, désignée sous le terme de quasi-*LPV*. Dans cette approche, certains éléments des paramètres variant  $e(t)$  sont définis comme des signaux issus du système lui-même. Il est important de noter que la forme d'un modèle quasi-*LPV* n'est pas unique; chaque représentation quasi-*LPV* est associée à un ensemble particulier de variables qui dépendent des spécificités du système étudié. Les systèmes quasi-*LPV* peuvent être obtenus soit par une transformation *LPV* directe, soit en recourant à la représentation de *Takagi – Sugeno (TS)* [32].

### II.2.1 Système *LPV* polytopique

Dans un système *LPV* polytopique, les matrices qui décrivent le comportement dynamique du système dépendent de paramètres variables, et ces matrices sont définies à partir de plusieurs points d'opération ou modèles linéaires [33]. Cela peut être formulé comme suit :

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = \sum_{i=1}^h \mu_i(\xi(t))(A_i x(t) + B_i u(t)), \\ y(t) = \sum_{i=1}^h \mu_i(\xi(t))(C_i x(t)), \end{cases} \quad (\text{II.2})$$

$x(t)$  est le vecteur d'état,  $u(t)$  est le vecteur d'entrée,  $y(t)$  est le vecteur de sortie,  $A_i, B_i, C_i$  : sont les matrices des sous-modèles,  $\mu_i(\xi(t))$  : sont des fonctions de pondération qui varient en fonction du vecteur de paramètres et satisfont les conditions :

$$\mu_i(\xi(t)) \geq 0, \quad \sum_{i=1}^h \mu_i(\xi(t)) = 1, \quad \text{et } h = 2^l, \quad (\text{II.3})$$

Le terme polytopique vient du fait que le vecteur  $\mu_i(\xi(t))$  évolue dans un polytope défini par :

$$\Omega = \left\{ \mu_i(\xi(t)) \in \mathbb{R}^h ; \mu_i(\xi(t)) \geq 0, \forall i, \sum_{i=1}^h \mu_i(\xi(t)) = 1 \right\}, \quad (\text{II.4})$$

Il est essentiel de souligner que tout système à paramètres variables peut être formulé comme un système polytopique. La modélisation *LPV* polytopique offre un cadre adéquat pour aborder les problèmes d'observation et de diagnostic des systèmes, notamment grâce à l'utilisation des inégalités matricielles linéaires (*LMI*) [37, 38]. Cette approche permet de modéliser non seulement le comportement de divers systèmes dynamiques, mais également de représenter les défauts et les erreurs de modélisation.

Une piste intéressante à explorer consiste à réécrire le système quasi-*LPV* sous forme de *Takagi-Sugeno* ( $T-S$ ) en appliquant une série de transformations polytopiques convexes. Il est important de noter que la représentation polytopique dérivée d'un modèle *LPV* peut généralement être exprimée de manière équivalente, au moins sur un compact de l'espace d'état, sous forme  $T-S$ . De plus, un système  $T-S$  peut aussi être considéré comme un système *LPV*. En effet, lorsque les paramètres varient dans un ensemble compact, il est possible de reformuler ces modèles de manière directe et systématique sous forme  $T-S$  [29].

Il existe un lien étroit entre les représentations *LPV* (Linear Parameter Varying) et  $T-S$  (*Takagi-Sugeno*). Les systèmes *LPV* peuvent décrire des modèles  $T-S$  en traitant les  $n$  paramètres de décision  $\dot{z}$  *LPV* comme des fonctions d'appartenance  $T-S$ . Ainsi, dans le cadre des systèmes *LPV* polytopiques, les sommets (ou vertices) correspondent aux sous-systèmes linéaires du modèle  $T-S$ . Cette relation permet d'exploiter les avantages des deux approches, facilitant l'analyse et la conception de contrôleurs robustes et adaptatifs. En somme, la dualité entre ces représentations renforce la compréhension des dynamiques complexes des systèmes et ouvre la voie à des stratégies de contrôle optimisées.

## II.3 Vers la représentation multi-modèle

Les processus physiques sont souvent modélisés par des systèmes dynamiques décrits par des équations d'état sous la forme suivante, qui constitue une représentation d'état

explicite [39, 40] :

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x(t), u(t)), \\ y = h(x(t)), \end{cases} \quad (\text{II.5})$$

$x(t)$  est le vecteur d'état, représentant l'état interne du système à l'instant  $t$ .

$u(t)$  est le vecteur d'entrée, correspondant aux actions ou aux stimuli appliqués au système.

$y(t)$  est le vecteur de sortie, qui représente les résultats ou les réponses du système.

$f$  et  $h$  représentent les fonctions linéaires et/ou non linéaires.

La commande d'un processus dépend fortement d'une modélisation précise du système, mais cela devient particulièrement délicat lorsqu'il s'agit de systèmes complexes et fortement non linéaires. Dans ce contexte, deux situations peuvent se présenter : d'une part, on peut recourir à des hypothèses simplificatrices pour obtenir un modèle [36, 39], mais cela peut ne pas refléter toute la complexité du système, entraînant ainsi des performances de commande sous-optimales. D'autre part, obtenir un modèle très complexe peut rendre celui-ci difficilement exploitable pour la commande, car sa complexité complique l'analyse et la conception des contrôleurs. C'est pourquoi la représentation multi-modèles émerge comme une approche pratique et alternative pour appréhender le comportement d'un processus dans différentes zones de fonctionnement. Ce concept repose sur le principe de "diviser pour régner", consistant à décomposer un phénomène en sous-modèles plus simples et gérables. En utilisant cette approche, il devient possible d'analyser et de contrôler le système de manière plus efficace, en tenant compte des différentes dynamiques manifestées dans divers régimes d'opération [40, 41]. Ainsi, la représentation multi-modèles permet une meilleure adaptation des stratégies de contrôle face à la complexité intrinsèque des systèmes non linéaires.

Le contexte de la modélisation multi-modèle repose sur plusieurs termes clés, notamment :

### II.3.1 Zone de fonctionnement

Les zones de fonctionnement représentent les domaines de validité des modèles locaux dans le cadre de la modélisation multi-modèle, chaque domaine étant défini autour d'un point de fonctionnement spécifique, ce qui permet de cerner les conditions dans lesquelles un modèle particulier est applicable [39].

Ces zones peuvent être classées en deux catégories : les domaines de validité disjoints, où les zones de fonctionnement ne se chevauchent pas, ce qui signifie que chaque modèle est valide uniquement dans sa propre région. Dans ce cas, lorsqu'un système entre dans une nouvelle zone, il doit passer à un autre sous-modèle sans ambiguïté [29], car il n'existe aucune zone de recouvrement. À l'inverse, les domaines de validité avec recouvrement permettent à certaines zones de fonctionnement de se chevaucher, rendant plusieurs sous-modèles valides simultanément dans une plage de conditions donnée comme l'indique dans la Figure II.1.

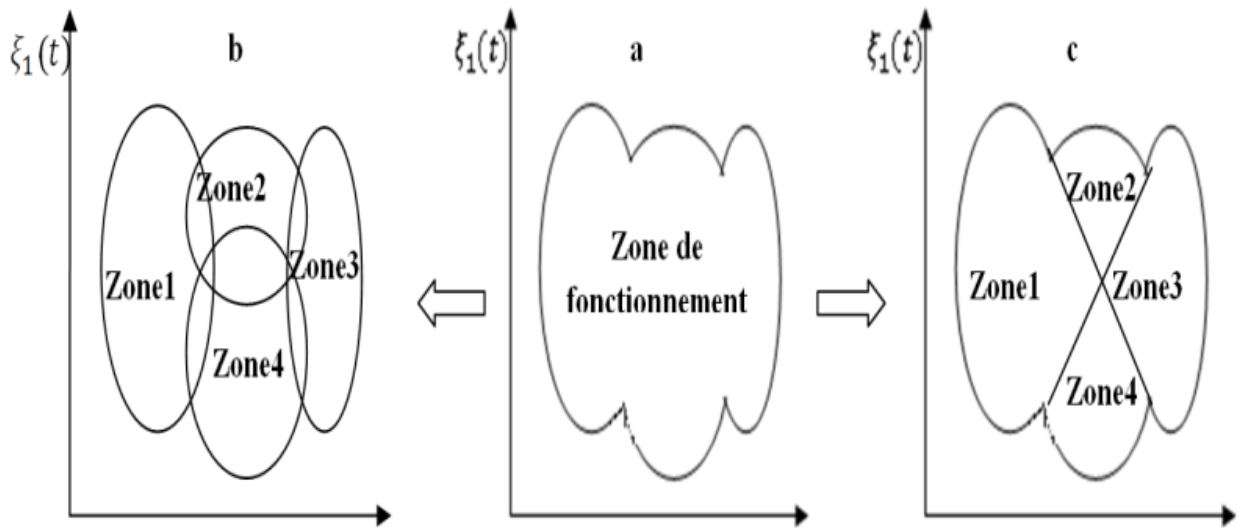


FIG. II.1 : Schéma de principe de l'approche multi-modèles *a)*–Système non linéaire *b)*–, *c)*– Représentation multi-modèles

Dans ces conditions (Figure II.1.c), les coefficients de pondération sont de type booléen, prenant uniquement des valeurs de 0 ou 1, ce qui signifie qu'à un instant donné, un seul modèle est valide. Ce type de partitionnement est courant dans le cas des systèmes à configurations multiples ou à plusieurs modes de fonctionnement, le modèle résultant étant qualifié d'affine par morceaux. Une autre situation (Figure II.1.b), qui peut survenir dans une description multi-modèle est celle où les domaines de validité se chevauchent ou possèdent des zones communes. Ce chevauchement est dû à la substitution des fonctions d'activation à front tendu par des fonctions à pente douce. Dans ce contexte, ces fonctions deviennent des fonctions à dérivées continues, dont la pente détermine la vitesse de transition d'un modèle à un autre [29].

### II.3.2 Sous-modèle

Un sous-modèle est une approximation du comportement d'un système dans une plage donnée d'opérations ou d'états. Cela permet de simplifier l'analyse en se concentrant sur les comportements pertinents dans une zone d'intérêt [31].

### II.3.3 Variable de prémisses

La variable de prémisses, notée  $\xi(t)$ , est une variable vectorielle qui caractérise un système et peut être mesurable ou non. Elle est essentielle dans les modèles flous et les systèmes dynamiques, car elle sert de fondement pour établir des règles influençant le comportement du système. Par exemple, cette variable peut représenter des états comme la position, ainsi que des signaux de commande appliqués au système. Dans le cadre des systèmes flous, les valeurs des variables de prémisses déterminent leur degré d'appartenance à différents

ensembles flous, ce qui permet d'évaluer les conclusions des règles [37].

### II.3.4 Fonction d'activation

La fonction de pondération détermine le degré d'activation du sous-modèle local associé à un système, en fonction de la zone dans laquelle il évolue. Cette fonction indique dans quelle mesure le modèle local contribue au modèle global, assurant ainsi une transition progressive entre ce modèle et ses voisins. Les fonctions de pondération normalisent les lois  $\mu_i(\xi(t))$ , qui représentent les poids de pondération des modèles locaux. Ces fonctions sont directement dépendantes des variables de décision, ce qui signifie qu'elles s'ajustent en fonction des conditions spécifiques du système, permettant ainsi une modélisation plus précise et dynamique du comportement global [30].

$$\mu_i(\xi(t)) = \frac{\mu_i(\xi(t))}{\sum_{i=1}^h \mu_i(\xi(t))}, \quad (\text{II.6})$$

Les fonctions d'activation peuvent être élaborées à partir de deux types principaux : celles à dérivées discontinues, telles que les fonctions triangulaires ou trapézoïdales, et celles à dérivées continues, comme les fonctions gaussiennes. Le choix de ces fonctions est crucial, car elles doivent respecter certaines propriétés de somme convexe [33].

$$\begin{cases} 0 \leq \mu_i(\xi(t)) \leq 1, \\ \sum_{i=1}^h \mu_i(\xi(t)) = 1, \end{cases} \quad \forall i = 1, \dots, h. \quad (\text{II.7})$$

Ces propriétés garantissent que la combinaison des différentes fonctions d'activation est toujours convexe, ce qui est essentiel pour assurer la stabilité et la cohérence des modèles dans lesquels elles sont intégrées. En respectant ces propriétés, les fonctions d'activation permettent une modélisation précise et efficace du comportement des systèmes, tout en facilitant les transitions entre différents sous-modèles [34].

### II.3.5 Multi-modèles

Un multi-modèle est un cadre conceptuel constitué de plusieurs sous-modèles qui sont intégrés par un mécanisme d'interpolation, afin de décrire le comportement dynamique global d'un système complexe. Ces sous-modèles, chacun représentant un aspect spécifique du système dans une plage opérationnelle définie, sont interconnectés par des fonctions de pondération. Ces fonctions ajustent dynamiquement l'influence de chaque sous-modèle en fonction des conditions présentes, garantissant ainsi une transition fluide entre eux [31].

Dans la littérature, on distingue deux grandes familles de multi-modèles en fonction de l'utilisation du vecteur d'état :

### Structure couplée

La structure couplée suppose que le multi-modèle repose sur un vecteur d'état unique et global. Dans ce cadre, l'état global est défini comme une somme pondérée des états des modèles locaux. Ce concept est également connu sous le nom de modèle flou de *Takagi – Sugeno* (Fuzzy  $T – S$  model), qui a été proposé dans la littérature. Ce modèle est basé sur des règles du type  $\text{SI prémisses ALORS conséquence}$ , permettant ainsi de formaliser les relations entre les variables [38].

Dans ce contexte, la représentation du multi-modèle est obtenue par l'interpolation de  $h$  modèles locaux linéaires. Cette approche permet d'intégrer les dynamiques des différents sous-modèles tout en maintenant une structure cohérente et unifiée [44]. Grâce à cette structure couplée, il est possible de capturer efficacement les comportements complexes d'un système tout en s'appuyant sur des modèles locaux plus simples, facilitant ainsi l'analyse et le contrôle du système dans son ensemble [40].

Le modèle global d'une structure multi-modèle couplée peut être décrit par l'équation d'état suivante :

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = \sum_{i=1}^h \mu_i(\xi(t))(A_i x(t) + B_i u(t)), \\ y(t) = Cx(t), \end{cases} \quad (\text{II.8})$$

$\dot{x}(t)$  : Vecteur des dérivées d'état global du système à l'instant  $t$ .

$h$  : Nombre de sous-modèles locaux.

$\mu_i(\xi(t))$  : Fonction de pondération associée au  $i$ ème sous-modèle, qui dépend de la variable de prémisses.

$A_i$  : Matrice d'état du  $i$ ème sous-modèle linéaire.

$B_i$  : Matrice de commande du  $i$ ème sous-modèle  $y(t)$ .

$x(t)$  : Vecteur d'état global à l'instant  $t$ .

$y(t)$  : Vecteur de sortie du système.

$u(t)$  : Vecteur d'entrée (ou commande) du système à l'instant  $t$ .

$\xi(t)$  : Variable de prémisses ou variable d'entrée, qui détermine la contribution de chaque sous-modèle en fonction des conditions du système.

La structure couplée est la représentation la plus largement adoptée dans les systèmes multi-modèles, car elle permet de combiner plusieurs sous-modèles locaux tout en assurant une continuité fluide entre eux. En utilisant la transformation par secteurs non linéaires, on peut déduire le modèle global de manière simple et sans perte d'information [41].

### Structure découplée

La représentation d'état dans cette structure suppose que le processus est composé de modèles locaux découplés et admet des vecteurs d'états indépendants. Cette structure

proposée par Filev [40], est issue d'une interpolation de sous-modèles à états découplés [38]. En conséquence, chaque sous-modèle est caractérisé par un espace d'état propre à l'intérieur duquel il évolue indépendamment des autres sous-modèles [40]. Pour le cas des systèmes singuliers le modèle global peut être donné par :

$$\begin{cases} \dot{x}_i(t) = \sum_{i=1}^h \mu_i(\xi(t))(A_i x(t) + B_i u(t)), \\ y_i(t) = C_i x(t), \end{cases} \quad (\text{II.9})$$

La structure découplée proposée par Filev repose sur l'utilisation de  $h$  sous-modèles affines fonctionnant de manière indépendante, chacun possédant son propre espace d'état. Ces sous-modèles sont interconnectés en parallèle, et leurs sorties sont combinées pour former une sortie globale, exprimée comme une somme pondérée des sorties des sous-modèles. Bien que chaque sous-modèle soit linéaire, la combinaison de ces modèles permet de capturer des comportements non linéaires complexes grâce à des poids de pondération qui modulent l'impact de chaque sous-modèle. Les signaux de sortie de ces sous-modèles, considérés comme des signaux artificiels, jouent un rôle clé dans la compréhension et l'analyse des dynamiques du système, tout en facilitant l'optimisation des performances du modèle global.

## II.4 Obtention d'une structure multi-modèles couplée

Dans cette section, nous décrivons les trois méthodes d'obtention d'une structure multi-modèles couplée à partir d'un modèle non linéaire (Figure II.2).

### II.4.1 Multi-modèles par identification

Cette méthode commence par le choix a priori de la structure du modèle ainsi que des fonctions d'activation. À partir de jeux de données d'entrées-sorties récoltées à partir des mesures effectuées sur le système réel, des techniques d'identification sont mises en œuvre [30]. Ces techniques permettent d'estimer les paramètres des sous-modèles et de déterminer comment ces derniers interagissent au sein de la structure multi-modèle [29]. L'objectif est de construire une représentation fidèle du comportement dynamique du système à partir de données empiriques, facilitant ainsi le contrôle et la supervision [32, 43].

### II.4.2 Multi-modèles par linéarisation

Cette approche consiste à linéariser le modèle non linéaire autour de plusieurs points de fonctionnement. Chaque point de fonctionnement donne lieu à un sous-modèle linéaire, et l'ensemble est agrégé à l'aide de fonctions d'appartenance floues, telles que triangulaires ou trapézoïdales [27]. Le modèle *Takagi – Sugeno* obtenu représente ainsi une approximation du modèle non linéaire. Cependant, les fonctions d'appartenance choisies ne garantissent

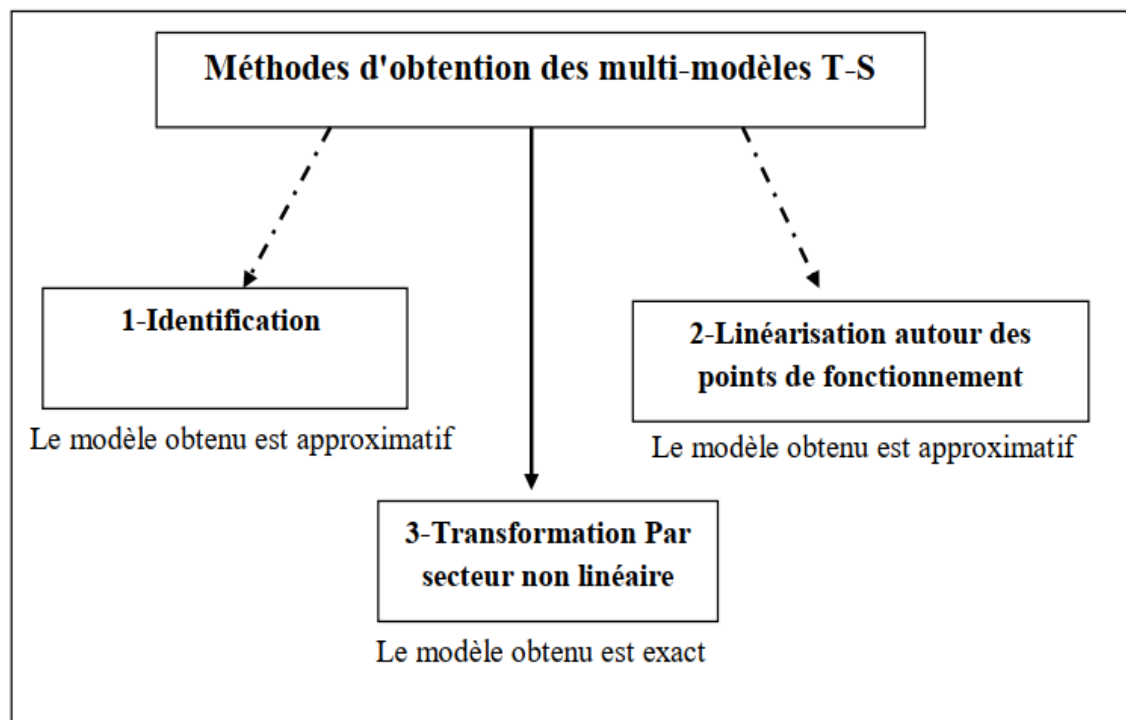


FIG. II.2 : méthodes d'obtention des multi-modèles

pas nécessairement une caractérisation précise des mécanismes d'interpolation non linéaires entre les sous-systèmes. Cela peut conduire à des limitations dans la précision de la représentation du comportement non linéaire du système [33].

### II.4.3 Modélisation par l'approche des secteurs non linéaires

Cette méthode repose sur la conversion d'un système non linéaire affine en commande en utilisant une Transformation Polytopique Convexe (TPC). Elle s'appuie sur des fonctions scalaires non linéaires et ne présente pas d'erreur d'approximation. Un des avantages majeurs de cette technique est qu'elle réduit le nombre de sous-modèles locaux par rapport aux méthodes de linéarisation classiques. Elle est fréquemment employée pour analyser la stabilité des systèmes non linéaires modélisés sous forme *Takagi – Sugeno* ainsi que pour concevoir des régulateurs. L'approche par secteur non linéaire permet de créer un modèle *Takagi – Sugeno* qui est équivalent au système non linéaire d'origine sans perte d'information. Elle se révèle moins conservatrice puisqu'elle repose uniquement sur les bornes supérieures et inférieures des termes non linéaires. Le modèle  $T - S$  obtenu à partir de cette approche constitue une représentation polytopique convexe robuste, garantissant une description fidèle des dynamiques du système [28, 39].

Dans ce manuscrit, l'accent est mis sur la troisième méthode, car elle offre des avantages significatifs en termes de précision et de maîtrise des fonctions d'appartenance qui régissent l'interconnexion entre les modèles locaux linéaires invariants dans le temps (LTI). Contrairement à l'approche par linéarisation, l'approche par secteur non linéaire présente deux atouts majeurs. Premièrement, elle minimise les erreurs lors de la conversion du modèle

analytique non linéaire en un modèle *Takagi–Sugeno* ( $T-S$ ), assurant ainsi une meilleure correspondance entre les dynamiques du système d'origine et sa représentation simplifiée. Deuxièmement, elle permet d'optimiser le nombre de sous-modèles locaux nécessaires pour capturer fidèlement le comportement global du système, réduisant ainsi la complexité tout en conservant une grande précision.

Soit le système non linéaire décrit par :

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = f(x(t), u(t)), \\ y(t) = h(x(t)), \end{cases} \quad (\text{II.10})$$

Avec  $x(t), y(t)$  et  $u(t)$  représentent respectivement, l'état du système, la sortie, et la commande. On peut écrire le système II.10 sous une forme LPV :

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = F(\xi(t))x(t) + G(\xi(t))u(t), \\ y(t) = H(\xi(t))x(t), \end{cases} \quad (\text{II.11})$$

Soit  $k$  le nombre des fonctions non linéaires présentes dans le système (II.11). On les note  $f_i$  ou  $i = 1, \dots, k$  Supposons qu'il existe un compact  $C$  des variables  $\xi(t)$  où les non-linéarités sont bornées [29] :

$$f_i \in [f_{\min}^i, f_{\max}^i], \quad \text{pour } i = 1, \dots, k. \quad (\text{II.12})$$

Les non-linéarités  $f_i$  peuvent alors s'écrire sous la forme suivante :

$$\begin{cases} f_i(\xi(t)) = f_{\min}^i w_{\max}^i(\xi(t)) + f_{\max}^i w_{\min}^i(\xi(t)), \\ w_{\max}^i(\xi(t)) = \frac{f_i(\xi(t)) - f_{\min}^i}{f_{\max}^i - f_{\min}^i}, \\ w_{\min}^i(\xi(t)) = \frac{f_{\max}^i - f_i(\xi(t))}{f_{\max}^i - f_{\min}^i}. \end{cases} \quad (\text{II.13})$$

À partir des fonctions des poids  $w_{\max}^i, w_{\min}^i$ , on peut définir les fonctions d'activation  $\mu_i(\xi(t))$  comme suit :

$$\mu_i(\xi(t)) = \prod_{l=1}^2 w_l^i(\xi(t)), \quad h = 1, \dots, 2^k, \quad l = 1, 2. \quad (\text{II.14})$$

Le système (II.10) qui possède  $h = 2^k \in N$  sous-modèles linéaires, devient par la transformation par secteur non linéaire sous la forme suivante :

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = \sum_{i=1}^{h=2^k} \mu_i(\xi(t))(A_i x(t) + B_i u(t)), \\ y(t) = \sum_{i=1}^{h=2^k} \mu_i(\xi(t))(C_i x(t)), \end{cases} \quad (\text{II.15})$$

## II.5 Stabilité et stabilisation des systèmes flous de *Takagi – Sugeno*

La stabilité des systèmes non linéaires, y compris les systèmes flous de *Takagi – Sugeno* ( $T - S$ ), a fait l'objet de nombreuses recherches. Un des outils fondamentaux utilisés pour analyser la stabilité est la théorie de Lyapunov. Le concept clé de cette théorie repose sur l'idée qu'une fonction représentant l'énergie du système, si elle décroît au fil du temps, tend à amener le système vers un point d'équilibre. En d'autres termes, la fonction de *Lyapunov* mesure la distance entre les variables d'état du système et ce point d'équilibre, offrant ainsi un moyen de garantir la stabilité du système [35].

Cependant, la principale difficulté de cette approche réside dans la recherche de fonctions de Lyapunov appropriées. Il existe deux grandes catégories de ces fonctions : les fonctions de *Lyapunov* quadratiques et non quadratiques. Dans ce mémoire, l'accent est mis sur la stabilité à travers l'utilisation de fonctions de *Lyapunov* quadratiques. Cette classe de fonctions est largement utilisée en raison de sa simplicité et de son efficacité dans de nombreux contextes de modélisation [41], y compris les systèmes flous  $T - S$ . L'objectif est de démontrer que, sous certaines conditions, l'énergie du système tend à diminuer, garantissant ainsi sa stabilité globale.

### II.5.1 Stabilité quadratique des systèmes flous de *Takagi – Sugeno*

Fait référence à l'analyse de stabilité d'un système non linéaire, modélisé sous forme floue  $T - S$ , à l'aide d'une fonction de *Lyapunov* quadratique. Dans ce contexte, on considère que la fonction de Lyapunov est de forme quadratique, c'est-à-dire qu'elle est représentée par une fonction positive définie qui dépend des variables d'état du système et qui diminue au fil du temps, garantissant ainsi la stabilité [41, 42, 44].

#### Principe de la stabilité quadratique

Notre objectif est d'assurer la stabilité des systèmes flous de *Takagi – Sugeno* en adoptant la méthode de stabilisation quadratique basée sur la seconde approche de Lyapunov. Cette stabilité est garantie lorsque les conditions, exprimées sous la forme d'un ensemble d'inégalités matricielles linéaires (*LMI*), issues des théorèmes suivants, sont respectées.

**Théorème** Le modèle II.15 est globalement asymptotiquement stable s'il existe une matrice  $P$  symétrique et définie positive telle que les *LMI*s suivantes sont réalisables.

$$E^T P = P^T E > 0, \tag{II.16}$$

$$A_i^T P + P A_i < 0, \quad \forall i \in \{1, \dots, h\}. \quad (\text{II.17})$$

Ce théorème fournit une condition suffisante pour garantir la stabilité asymptotique du multi-modèle II.8. L'inégalité matricielle II.17 peut être traitée à l'aide d'outils numériques basés sur les inégalités matricielles linéaires (*LMI*). La présence de la matrice  $P$  est conditionnée par deux critères :

- ▶ Le premier critère concerne la stabilité de chacun des modèles locaux, ce qui signifie que chaque matrice  $A_i$  doit être de type *Hurwitz*.
- ▶ Le second critère se rapporte à l'existence d'une fonction de Lyapunov qui soit commune à tous les  $h$  modèles [39].

### Stabilité quadratique des systèmes sous de *Takagi – Sugeno*

Au cours des dernières années, de nombreuses recherches ont été réalisées pour étudier la stabilité et la stabilisation des multi-modèles de type *Takagi – Sugeno* à l'aide de contrôleurs. Ces travaux s'appuient sur la seconde méthode de *Lyapunov* afin de parvenir, lorsque cela est possible, à une formulation sous forme d'inégalités linéaires matricielles. La stabilisation la plus courante utilise des lois de commande de type compensation parallèle distribuée (*PDC*, Parallel Distributed Compensation), ainsi que ses variantes, comme la *PDC* proportionnelle (*PPDC*). De plus, on trouve également des lois de commande basées sur la compensation par division et la fusion (*CDF*) [35, 37, 38]. Lorsque l'état du système n'est pas accessible, il est possible d'envisager une stabilisation par retour de sortie. Dans ce contexte, on peut distinguer trois approches :

- ▶ Retour de sortie statique :  
Ce type de contrôleur est particulièrement simple et contribue à réduire le coût des calculs en temps réel [35].
- ▶ Retour de sortie dynamique :  
La commande par retour de sortie dynamique améliore les performances en boucle fermée. Cependant, cette approche peut être conservatrice en raison de l'apparition de termes croisés dans les inégalités matricielles linéaires (*LMI*) [42, 44].
- ▶ Retour de sortie basé sur un observateur :  
Ce type de contrôleur implique l'utilisation d'un observateur pour estimer les variables d'état qui ne peuvent pas être mesurées. Une loi de commande statique par retour d'état permet ensuite de stabiliser le système tout en intégrant des spécifications concernant la dynamique souhaitée [33, 35].

## II.6 Conclusion

La représentation Quasi-*LPV* (Linear Parameter-Varying) des systèmes non linéaires constitue une approche novatrice et efficace pour la modélisation des systèmes complexes. En fragmentant le comportement dynamique d'un système en plusieurs zones distinctes,

chacune régie par un modèle local, cette méthode permet de capter la variabilité intrinsèque des systèmes non linéaires, notamment dans des applications critiques comme les centrales solaires thermiques. Les fonctions d'activation, agissant comme des ponts entre les sous-modèles, jouent un rôle clé dans l'approximation précise du comportement global du système en ajustant en continu la contribution de chaque modèle local en fonction des conditions de fonctionnement.

Le multi-modèle est perçu comme une approximation universelle, car il est possible d'approcher tout système non linéaire avec une précision déterminée en augmentant le nombre de modèles locaux et en optimisant les fonctions d'activation. Les outils d'analyse utilisés pour les systèmes linéaires peuvent également être appliqués, en partie, aux multi-modèles lorsque les modèles locaux sont de nature linéaire. Par ailleurs, diverses structures permettent de relier les différents modèles locaux afin de produire la sortie globale du multi-modèle.

---

## Diagnostic des défauts des *SEGS* à base d'observateurs

### III.1 Introduction

Les centrales solaires à concentration cylindro parabolique (*CSCP*) jouent un rôle essentiel dans la production d'énergie durable à grande échelle, mais comme tout système industriel complexe, elles sont sujettes aux défauts, pannes, défaillances et dégradations. Bien que ces installations soient largement automatisées et soutenues par des sources d'énergie de secours en cas de faible ensoleillement, les défaillances peuvent passer inaperçues pendant de longues périodes. Cela est dû au fait qu'elles n'affectent pas immédiatement le service rendu. Cependant, ne pas détecter rapidement ces défauts impacte directement la rentabilité financière des installations, qui repose sur leur capacité à capter de manière optimale l'énergie gratuite du soleil. Il est donc crucial de détecter et diagnostiquer les défaillances de manière précoce et automatisée pour garantir la fiabilité et l'efficacité des *CSCP*.

Dans ce cadre, le développement de mécanismes avancés de détection automatique des défauts et de diagnostic *FDI* pour les centrales solaires thermiques est fondamental. La conception d'un système *FDI* efficace est une étape clé pour parvenir à des systèmes de commande robustes, capables de maintenir un fonctionnement optimal malgré les défaillances. Dans ce chapitre, nous nous focaliserons sur l'utilisation d'observateurs pour le diagnostic des défauts dans les *CSCP*, en particulier à travers l'approche des modèles flous de type *Takagi – Sugeno* ( $T - S$ ). Ce chapitre est structuré comme suit : dans la première section, nous introduisons les concepts fondamentaux liés à la détection et à la localisation des défauts (*FDI*). La deuxième section présente les résultats d'une étude bibliographique sur les défauts affectant les centrales solaires thermiques, ainsi que leur analyse. La troisième section est dédiée à une revue des méthodes existantes pour la détection et le diagnostic de ces défauts. Par la suite, nous exposons un état de l'art sur le diagnostic des défauts basé sur

des observateurs, en abordant les principes d'estimation d'état ainsi que la conception des observateurs pour les systèmes non linéaires

## III.2 Concepts fondamentaux liés au diagnostic

Dans la littérature spécialisée, deux grandes catégories de méthodes de diagnostic se distinguent clairement [45, 55]. Chacune d'elles présente des avantages et des inconvénients en fonction du contexte d'application, de la criticité du système et des exigences économiques et techniques.

- **Première catégorie : Méthodes basées sur la redondance matérielle :**

La redondance matérielle consiste à dupliquer les capteurs ou équipements qui mesurant une même grandeur physique afin de garantir une plus grande fiabilité du système de diagnostic [47]. Bien que ces approches soient robustes et particulièrement fiables, elles impliquent des coûts élevés et une complexité matérielle accrue. En effet, l'installation de capteurs redondants dans les systèmes critiques est souvent nécessaire lorsque les enjeux de sécurité, qu'il s'agisse de protéger les vies humaines ou de garantir l'intégrité du processus industriel, surpassent les contraintes économiques [48]. Ce type de méthode est couramment utilisé dans des secteurs où la défaillance d'un composant pourrait entraîner des conséquences désastreuses, comme l'aéronautique, les centrales nucléaires, ou encore les dispositifs médicaux. Malgré leur efficacité, ces méthodes deviennent rapidement impraticables dans des environnements où l'espace, le poids ou les ressources sont limités, ou encore lorsque les coûts doivent être optimisés.

- **Seconde catégorie : Méthodes basées sur des algorithmes de diagnostic :**

À l'opposé de la redondance matérielle, les méthodes algorithmiques offrent une approche plus flexible et économique pour le diagnostic des défauts [55]. Ces méthodes s'appuient sur des algorithmes sophistiqués capables d'analyser les données du système et d'en déduire des informations concernant son état de santé [50]. Dans ce contexte, il est souvent supposé que toutes les variables d'état du système sont directement mesurables. Cependant, cette hypothèse est rarement vérifiée en pratique. En raison des contraintes techniques et économiques [52], il est souvent impossible de mesurer l'intégralité des variables d'état. Par conséquent, il devient indispensable de recourir à des techniques d'estimation d'état, telles que l'utilisation d'observateurs ou de filtres, qui permettent de reconstruire ces variables à partir des données d'entrée et de sortie disponibles [61]. Cette approche présente l'avantage de réduire la dépendance au matériel tout en offrant une solution efficace pour le diagnostic des systèmes complexes où la mesure complète des états serait irréaliste ou trop coûteuse [45].

Ces deux catégories de méthodes de diagnostic, bien que fondamentalement différentes, sont complémentaires. Les systèmes critiques peuvent combiner des redondances matérielles pour des éléments vitaux tout en utilisant des algorithmes d'estimation pour surveiller d'autres. Ces deux catégories de méthodes de diagnostic, bien que fondamentalement différentes, sont complémentaires. Les systèmes critiques peuvent combiner des redondances matérielles pour des éléments vitaux tout en utilisant des algorithmes d'estimation pour

surveiller d'autres aspects du système. Cela permet d'atteindre un équilibre entre fiabilité et efficacité économique, tout en assurant une détection rapide et précise des défaillances potentielles [53].

### III.2.1 Définitions et concepts clés

Les définitions suivantes ont été établies par le comité technique SAFEPROCESS de l'IFAC (International Federation of Automatic Control), une organisation de référence dans le domaine du contrôle automatique. Ces définitions constituent un cadre conceptuel essentiel pour le diagnostic des systèmes et la gestion des anomalies [45, 51, 53, 55, 68] :

- **Faute**

Une faute se réfère à la cause ou à l'origine d'une anomalie dans un système. Elle est le facteur déclencheur d'une erreur et représente l'événement que lon cherche à anticiper ou à rendre tolérable pour assurer la robustesse du système.

- **Erreur**

L'erreur désigne l'écart entre une valeur mesurée (réalité) et une valeur calculée ou observée (estimation). Elle est généralement provoquée par une ou plusieurs fautes dans le système et reflète la déviation par rapport aux performances attendues.

- **Défaut**

Un défaut est un décalage inacceptable par rapport aux caractéristiques nominales d'un composant ou d'un sous-système (qu'il s'agisse d'actionneurs, de capteurs ou du système lui-même). Il correspond à une altération du comportement normal et peut avoir des répercussions sur l'intégrité fonctionnelle du système.

- **Défaillance**

La défaillance survient lorsque le système ne peut plus assurer de manière continue sa fonction principale, conformément aux spécifications opérationnelles. Elle est le résultat direct d'un ou de plusieurs défauts, et entraîne une interruption prolongée des capacités du système.

- **Panne**

Une panne représente un état critique dans lequel le système est totalement incapable de remplir sa mission suite à une défaillance. Elle marque la perte de toute capacité fonctionnelle du système jusqu'à ce qu'une intervention soit effectuée.

- **Perturbation**

Une perturbation est une déviation temporaire du comportement attendu d'un système physique par rapport à une référence. Bien qu'elle puisse influencer les performances, elle ne constitue pas nécessairement une anomalie. La différence entre perturbation et défaut réside dans le fait que les perturbations sont généralement considérées comme des événements normaux, alors que les défauts sont classés comme des anomalies.

- **Résidu**

Le résidu est un indicateur utilisé pour la surveillance des anomalies dans un système. Il est calculé à partir des relations de redondance analytique entre les mesures réelles et les sorties estimées par un modèle. En diagnostic, il permet de détecter la présence d'une ou plusieurs fautes en signalant un comportement anormal du système.

- **Symptôme**

Le symptôme est un signe observable ou mesurable qui permet d'identifier un changement dans l'état de fonctionnement d'un système. Il correspond à un ensemble d'événements ou de données à partir desquels un défaut peut être suspecté et signalé par le système de détection.

- **Détection de défaut (Fault Detection)**

La détection de défaut consiste à identifier le moment exact où une anomalie se produit dans un système. Cette fonction repose généralement sur l'analyse des résidus générés en comparant les sorties du modèle théorique aux performances du système réel, et permet de déterminer si un défaut est présent.

- **Localisation de défaut (Fault Isolation)**

Après la détection d'un défaut, il est essentiel de déterminer le composant ou la partie du système affecté par l'anomalie. Cette étape, appelée localisation ou isolation du défaut, repose sur la génération de résidus qui sont sensibles à certains défauts tout en restant insensibles aux autres, facilitant ainsi l'identification précise de l'élément défectueux.

- **Identification (Estimation de défaut)**

L'identification consiste à déterminer la gravité et l'évolution d'un défaut dans le temps. Cela implique de quantifier la taille du défaut ainsi que son comportement dynamique pour mieux comprendre son impact sur le système.

- **Diagnostic (Diagnosis)**

Le diagnostic englobe l'ensemble du processus de gestion des défauts, incluant leur détection, localisation et identification. Il vise à déterminer le type, l'ampleur, l'emplacement exact et le moment de survenue d'un défaut pour faciliter la prise de décisions correctives appropriées.

- **Redondance analytique**

La redondance analytique est une méthode qui consiste à estimer des variables d'un système à l'aide d'un modèle mathématique, lorsque ces variables ne sont pas directement mesurées. Elle permet de créer des relations de substitution, offrant ainsi une meilleure robustesse au système en cas de défaillance des capteurs.

- **Modélisation du défaut**

La modélisation du défaut implique la création d'un modèle mathématique qui représente les effets spécifiques d'un défaut sur un système. Cette étape permet de prédire

l'impact du défaut sur les performances globales du système, facilitant ainsi le diagnostic et les interventions correctives.

### III.2.2 Critères d'évaluation des performances

L'évaluation de l'efficacité d'un système de diagnostic repose sur plusieurs critères de performance essentiels qui déterminent sa capacité à détecter, localiser et identifier les défauts de manière fiable et précise. Ces critères permettent d'assurer que le système fonctionne conformément aux exigences opérationnelles et contribue à la sécurité et à l'efficacité des processus. Voici les principaux critères de performance à considérer [64, 68, 69] :

- **Déteçtabilité**

La déteçtabilité désigne la capacité dun système de diagnostic à identifier la présence d'une défaillance au sein d'un processus. Ce critère est étroitement lié à l'utilisation din-dicateurs de défaut, tels que les résidus. Un générateur de résidu doit être conçu pour être sensible aux défaillances spécifiques que l'on souhaite détecter, assurant ainsi une identification précise des anomalies.

- **Isolabilité**

Lisolabilité fait référence à la capacité du système de diagnostic à retracer directement la source dun défaut. Cette propriété est influencée par la structure des résidus et la méthodologie adoptée pour la détection. Un système efficace doit être en mesure de localiser avec précision l'origine de la défaillance, facilitant ainsi les interventions correctives nécessaires.

- **Sensibilité**

La sensibilité mesure l'aptitude du système à détecter des défauts d'une certaine amplitude. Elle dépend non seulement de la conception des résidus, mais également de la relation entre l'amplitude du bruit de mesure et celle du défaut. Un système hautement sensible sera capable de repérer des défauts même lorsque ceux-ci sont faibles, tout en minimisant les risques de fausses alarmes.

- **Robustesse**

La robustesse évalue la capacité du système à détecter des défauts malgré les erreurs de modélisation et les perturbations environnementales. Cela implique que le système doit être sensible aux défauts tout en demeurant insensible aux variations indésirables. En règle générale, la robustesse est définie en tenant compte de toutes les entrées inconnues pouvant affecter les performances du diagnostic.

### III.2.3 Classification des modes de fonctionnement

Un système peut présenter plusieurs modes de fonctionnement, chacun ayant des caractéristiques distinctes. Ces modes incluent [51–53, 80] :

- **Mode de fonctionnement nominal**

Ce mode représente l'état optimal dans lequel un équipement ou un système industriel remplit sa fonction conformément aux spécifications établies par le constructeur. Dans ce régime, tous les paramètres opérationnels sont à des niveaux idéaux, garantissant ainsi des performances maximales et une efficacité optimale.

- **Mode de fonctionnement dégradé**

Ce mode est caractérisé par une capacité d'exécution partielle de la mission assignée au système. Il peut s'agir d'une situation où le système continue de fonctionner, mais avec des performances réduites par rapport aux conditions normales. En d'autres termes, bien qu'il y ait une dégradation dans le fonctionnement, aucune défaillance critique n'est encore survenue, et le système peut souvent continuer à opérer, mais avec un rendement inférieur.

- **Mode de défaillance**

Ce mode indique que le système rencontre des dysfonctionnements significatifs. Cela peut résulter d'une dégradation progressive ayant conduit à une défaillance, ou bien d'une défaillance soudaine et imprévue. Dans ce cas, le système ne parvient pas à remplir sa fonction, ce qui nécessite généralement une intervention immédiate pour diagnostiquer et corriger le problème.

### III.3 Défauts affectant les centrales solaires thermiques

Les centrales solaires thermiques sont sujettes, comme tout système automatisé de production, à des pannes et des dysfonctionnements. Un défaut *ré originel* est un problème basique sous-jacent qui peut entraîner d'autres problèmes et des symptômes observables [61]. C'est ce défaut que l'on cherche à isoler à l'aide d'une méthode de détection et diagnostic de défaut. Sa sévérité, c'est-à-dire son importance, peut être variable. Par exemple l'opacification de la vitre d'un capteur peut être plus ou moins forte. Un défaut est caractérisé par sa signature : la façon dont il affecte le comportement du système global. Des défauts qui ont la même signature, c'est-à-dire le même effet sur le système, ne peuvent pas être distingués les uns des autres. On les regroupe alors dans une même classe de défauts. Nous allons maintenant présenter un état de l'art de ces défauts. Une première partie décrit les défauts recensés par la littérature. La seconde partie résume les travaux effectués sur l'analyse de l'impact de ces défauts sur le système global.

#### III.3.1 Recensement des défauts

Les centrales solaires thermiques sont soumises à divers défauts pouvant compromettre leur performance et leur fiabilité. Parmi les sous-systèmes, le transport primaire est celui qui rencontre le plus de dysfonctionnements. Les fuites constituent un défaut récurrent, bien que leur fréquence semble diminuer selon les études récentes. Parallèlement, le calorifugeage des conduites est souvent insuffisant, mal installé ou inadapté, ce qui pose problème, notamment pour les conduites extérieures qui doivent résister aux rayons ultraviolets et aux

attaques des oiseaux [54].

Un autre défaut fréquent est la pression trop faible dans le circuit, accompagnée de la présence d'air dans les canalisations, ces deux problèmes pouvant résulter d'une fuite sur le circuit primaire. De plus, le système de régulation subit de nombreuses avaries, généralement dues à un paramétrage inadéquat et à une mauvaise installation ou un mauvais positionnement des sondes de température, notamment la sonde de température capteur qui fournit souvent des mesures erronées [59].

En ce qui concerne la captation solaire, divers défauts peuvent survenir sur le capteur solaire, tels que la condensation, le vitrage endommagé, et des fuites au niveau de l'absorbeur dues à la corrosion. Cependant, ces défauts sont moins fréquents. De plus, les fixations des capteurs semblent souvent non conformes, ce qui peut également poser des problèmes [65].

D'autre part, le transport secondaire présente beaucoup moins de défauts que le transport primaire. Cela est compréhensible, car il utilise des systèmes classiques couramment employés par les plombiers-chauffagistes, tels que l'eau comme fluide caloporteur, avec des variations de températures moins significatives. Les études indiquent également peu de défauts au niveau du stockage et des échangeurs de chaleur, qui sont considérés comme des composants plus standards et mieux maîtrisés [61].

### III.3.2 Impact sur le système global

Bien que les centrales solaires thermiques (CSP) occupent une place importante dans la transition énergétique, peu d'études se sont intéressées à l'impact des défauts techniques sur leurs performances, contrairement à d'autres secteurs comme le photovoltaïque, où ce type de recherche est plus répandu. L'une des rares exceptions est l'analyse du déséquilibre hydraulique, un sujet abordé dans plusieurs travaux [65, 66], soulignant son effet sur la production d'énergie dans les champs solaires thermiques. À ce jour, l'étude de *Rehman* et al. [71] est la seule, à notre connaissance, à avoir évalué l'influence d'une large gamme de dysfonctionnements techniques sur les performances d'un système complexe incluant une pompe à chaleur et deux réservoirs de stockage, grâce à des simulations optimisées.

Par ailleurs, quelques recherches ont exploré l'impact des améliorations technologiques sur le comportement des systèmes solaires thermiques en adoptant des approches similaires à celles utilisées dans l'analyse des défauts, mais avec un objectif d'optimisation des performances. Par exemple, *Hellstrom* et al [61] ont examiné les effets de diverses améliorations appliquées aux capteurs solaires sur la production énergétique annuelle et les coefficients de performance, démontrant aussi l'influence de la température de fonctionnement sur la sensibilité des systèmes aux défauts.

Bien que limitées en nombre, ces études offrent des perspectives précieuses sur l'impact des défaillances techniques et des améliorations sur l'efficacité globale des centrales solaires thermiques. Une approche plus poussée, combinant par exemple la modélisation floue ou des systèmes intelligents, pourrait aider à mieux comprendre et prédire ces impacts [59].

### III.3.3 Modélisation des défauts

L'équation III.1 modélise un processus où les signaux d'entrée et de sortie sont représentés par des vecteurs. Le vecteur  $U(t)$  correspond aux signaux d'entrée mesurés à un instant  $t$ , tandis que  $Y(t)$  représente les signaux de sortie mesurés à cet instant. La fonction  $g$  décrit les relations, ou la dynamique, entre les entrées et les sorties. Ces relations dépendent d'un ensemble de paramètres  $\theta$  regroupés dans un vecteur. Ce vecteur caractérise le modèle, influençant ainsi les liens entre les signaux d'entrée et de sortie [68].

$$Y(t) = g[U(t), \theta]. \quad (\text{III.1})$$

En général, une telle équation peut être utilisée pour modéliser des systèmes dynamiques, qu'ils soient linéaires ou non linéaires. La connaissance de  $\theta$  permet de prédire les sorties  $Y(t)$  en fonction des entrées  $U(t)$ , ce qui est essentiel pour la modélisation, la commande, ou l'optimisation de systèmes complexe.

Les défauts d'un système sont généralement classés en deux catégories principales [53, 55] :

- **Défauts additifs** : Ces défauts se manifestent par une altération des signaux d'entrée  $U(t)$  ou de sortie  $Y(t)$ . On les qualifie d'additifs car ils se traduisent généralement par l'ajout d'une constante au signal de sortie, indépendamment des valeurs d'entrée. Cela entraîne une modification linéaire et fixe du signal, sans affecter la relation sous-jacente entre les entrées et les sorties.

- **Défauts multiplicatifs** : Ceux-ci impactent la fonction de transfert  $g$ , modifiant directement les paramètres du modèle. On parle de défauts multiplicatifs car, dans le cas où la fonction  $g$  est représentée par une matrice  $A(\theta)$  (comme dans une relation linéaire), ces défauts se manifestent par l'ajout d'une matrice perturbatrice  $\Delta A$  à la matrice initiale. Cela introduit un terme multiplicatif dans la relation entre les entrées  $U(t)$  et les sorties  $Y(t)$ , faisant ainsi dépendre l'impact du défaut des signaux d'entrée eux-mêmes.

$$Y(t) = [A(\theta) + \Delta A] \cdot U(t). \quad (\text{III.2})$$

On peut également inclure les défauts structurels dans cette classification, qui modifient les relations définies par la fonction  $g$ . Ces défauts nécessitent souvent la conception d'une version alternative de cette fonction, c'est-à-dire un modèle différent représentant le système. Par exemple, un bris de vitre dans un capteur solaire ne peut pas simplement être pris en compte en ajustant certains paramètres du modèle existant. Dans ce cas, il serait plus approprié de développer un modèle alternatif qui reflète l'absence de vitre, permettant ainsi de mieux représenter la nouvelle configuration du capteur [53, 66].

$$(a) \quad Y(t) = g[U(t), \theta + f(t)], \quad (b) \quad Y(t) = g[U(t), \theta + f(t)]. \quad (\text{III.3})$$

Les défauts additifs se manifestent généralement sous forme de dysfonctionnements liés à la métrologie, affectant les mesures des signaux. La majorité des autres types de

défauts sont de nature multiplicative ou structurelle. La forme de  $f(t)$ , qui décrit le défaut, dépend du modèle mathématique choisi pour représenter le processus. En règle générale, les chercheurs tentent de modéliser le défaut en utilisant une équation similaire à l'équation III.4, qui formalise ces perturbations dans le cadre du modèle choisi.

$$Y(t) = g[U(t), (1 - f) \cdot \theta]. \quad (\text{III.4})$$

Le vecteur  $f = [f_i \in [0; 1], \forall i]$  représente les défauts du système, où chaque composante  $f_i$  correspond à un défaut spécifique. Une valeur de 0 pour  $f_i$  indique l'absence de modification du paramètre concerné, c'est-à-dire que ce paramètre n'est pas affecté par un défaut. À l'inverse, une valeur proche de 1 indiquerait un défaut maximal, traduisant une altération complète du paramètre en question [64].

### III.4 Méthodes de détection et de diagnostic pour les CSP

Étant donné que les centrales solaires thermiques (CSP) sont vulnérables à divers défauts pouvant nuire à leurs performances, certains chercheurs se sont penchés sur les méthodes de détection et de diagnostic de ces anomalies. L'objectif est de développer des outils qui facilitent la maintenance et la réparation de ces installations. Idéalement, ces outils sont automatisés, ce qui permet de réduire le temps que les techniciens doivent consacrer à ces tâches, contribuant ainsi à diminuer les coûts associés.

Au cours de la dernière décennie, trois revues ont été publiées sur les méthodes de détection et de diagnostic appliquées aux CSP [59]. Dans les sections suivantes, nous présenterons un état de l'art des différentes approches développées pour la détection et le diagnostic des défauts dans ces systèmes.

Nous avons choisi de classer ces méthodes en fonction de l'approche prédominante qu'elles adoptent, tout en gardant à l'esprit que la plupart d'entre elles intègrent en réalité plusieurs techniques. Ce classement mettra en lumière les avantages et les inconvénients de chaque méthode, ainsi que les défis associés, les similarités et les différences entre les diverses approches.

#### III.4.1 Vue d'ensemble des approches

De nombreuses méthodes de diagnostic des défaillances ont été développées, et elles sont très variées. Ces méthodes peuvent être regroupées en deux grandes familles : celles qui ne reposent pas sur des modèles mathématiques (modèle qualitatif) et celles qui utilisent des modèles mathématiques du système (diagnostic basé sur un modèle quantitatif), comme illustré dans la Figure III.1. Pour plus de détails, le lecteur peut se référer aux références [52, 54].

Ces deux catégories se différencient par la source de connaissance du processus qu'elles mobilisent. D'une part, les approches qualitatives et quantitatives requièrent la construction

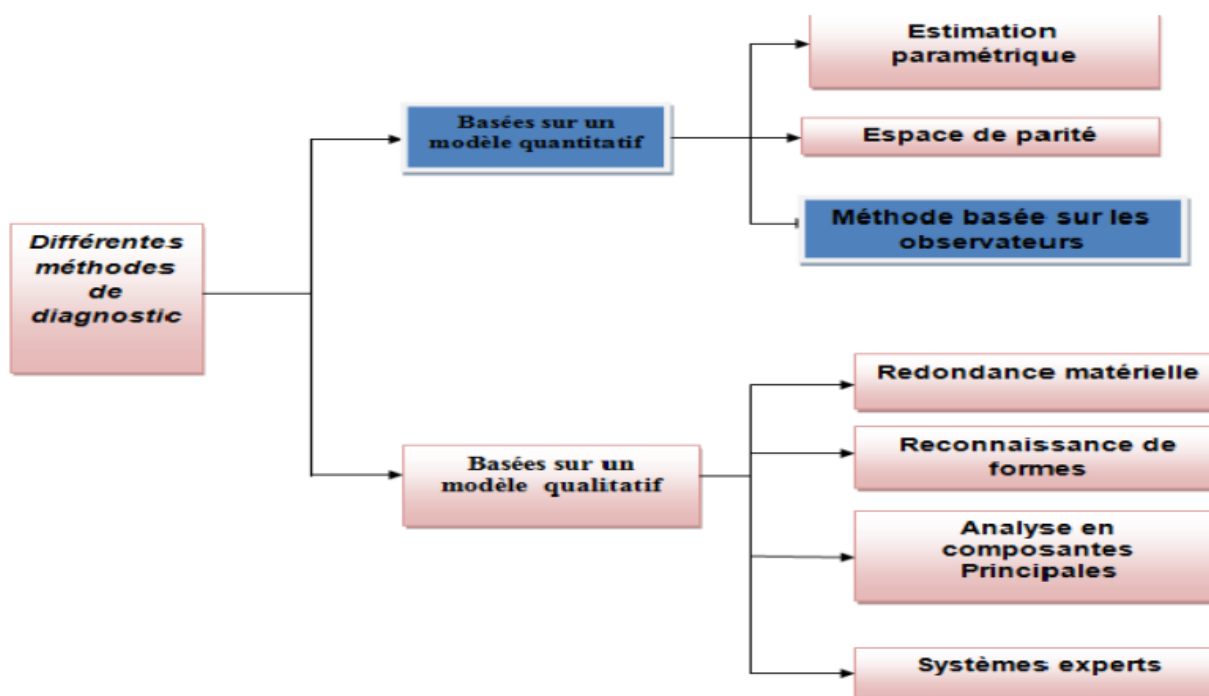


FIG. III.1 : Classification des principales méthodes de détection et diagnostic

d'un modèle du système surveillé ou, à tout le moins, d'une partie de celui-ci. Dans le cas de l'approche quantitative, le modèle repose sur des relations fonctionnelles mathématiques. En revanche, l'approche qualitative se concentre sur des fonctions qualitatives relatives aux différentes unités du procédé [56].

Dans les sections suivantes, nous réaliserons un état de l'art des méthodes de détection et de diagnostic des défauts appliquées aux centrales solaires concentrées (CSP), en nous basant sur ces deux grandes catégories.

### Méthodes qualitatifs

Les approches de diagnostic sans modèles mathématiques reposent sur le constat que le modèle du système n'est pas disponible. Ces méthodes sont particulièrement utiles lorsque la modélisation d'un système défectueux s'avère complexe ou difficile à réaliser. Les techniques de modélisation basées sur des règles exploitent des connaissances préexistantes pour établir un ensemble de règles de type 'si-alors-sinon', accompagnées d'un mécanisme d'inférence qui permet d'explorer cet ensemble de règles afin d'en tirer des conclusions pertinentes [52, 78]. Ces techniques peuvent s'appuyer sur l'expertise d'un ou plusieurs spécialistes (systèmes experts) ou recourir à une redondance matérielle, qui consiste à ajouter des capteurs pour obtenir des informations supplémentaires sur l'état du système.

Un système expert est un logiciel conçu pour aider à la prise de décision, imitant le raisonnement d'un expert humain face à des problèmes. Des outils tels que les arbres de défaillance et les graphes dirigés (digraphes) peuvent être employés pour générer ces règles.

En outre, les modèles basés sur la physique qualitative permettent de déterminer l'état d'un système même avec une connaissance partielle ou incertaine des processus physiques impliqués. Cette approche consiste à dériver des équations qualitatives à partir des équations quantitatives traditionnelles qui décrivent le système. Ces équations peuvent ensuite être résolues qualitativement pour fournir des valeurs descriptives des variables. Souvent, ces méthodes sont combinées avec la logique floue, ce qui améliore leur efficacité et leur adaptabilité dans le diagnostic des défauts [78].

- **Systemes experts**

Les systèmes experts jouent un rôle crucial dans la détection et le diagnostic des défauts en raison de leur simplicité de développement et de leur facilité d'utilisation. Ces systèmes sont parmi les premières méthodes employées dans le cadre des systèmes d'information sur les défaillances (*ISTGD*). Étant donné leur nature moins complexe sur le plan scientifique, il existe peu de littérature à leur sujet [56, 71]. Malgré cela, ils offrent de bonnes performances, notamment pour identifier les défauts liés à la régulation, qui sont généralement bien détectés par les systèmes experts modernes.

Cependant, ces méthodes présentent certaines limites. Elles ne garantissent pas une couverture exhaustive, ce qui signifie qu'elles peuvent manquer certains défauts. En outre, pour améliorer leur précision, une métrologie avancée est souvent requise, sauf si des algorithmes plus sophistiqués sont intégrés. Actuellement, la plupart des approches reposent sur des seuils fixes, alors que l'adoption de seuils adaptatifs, de logique floue ou de décisions probabilistes pourrait accroître leur robustesse et leur sensibilité.

Le projet **FUCKS** visait à créer un outil complet pour la détection et le diagnostic des défauts des chauffe-eau solaires, dont le produit final prend la forme d'un système expert. Cette méthode privilégie l'utilisation de mesures de pression au lieu de mesures de débit, ce qui permet souvent d'améliorer la précision des résultats [66].

De son côté, le projet **IP-SOLAR** a été conçu pour développer une procédure complète de détection et de diagnostic des défauts dans les applications solaires. Le cœur de cette procédure repose sur un système expert basé sur des règles, avec une attention particulière portée à l'adaptabilité de l'outil aux différents schémas hydrauliques. En outre, des algorithmes d'apprentissage automatique ont été intégrés pour renforcer la détection des défauts et évaluer leur gravité.

- **Autres méthodes basées sur des modèles qualitatifs**

À notre connaissance, il n'existe pas d'approche utilisant la physique qualitative dans le contexte des centrales solaires thermiques (*CSP*).

### **Méthodes quantitatives**

Les méthodes fondées sur des modèles quantitatifs exploitent la redondance analytique pour déterminer des résidus, qui reflètent les écarts entre le comportement observé d'un processus et celui prédit par un modèle théorique. Lorsque l'un ou plusieurs de ces résidus dépassent des seuils prédéfinis, cela indique la présence d'un défaut dans le système. Les

équations de parité, qui jouent un rôle central dans les méthodes d'espaces de parité, émanent de la comparaison entre le fonctionnement d'un système réel et celui d'un modèle idéal. Une revue exhaustive réalisée par Patton [70] aborde les différents concepts associés à ces méthodes, ainsi que les défis et limitations qui en découlent. De plus, les observateurs constituent des extensions spécifiques de modèles d'états, conçues pour surveiller des états particuliers tout en restant insensibles à des entrées inconnues, telles que le bruit inhérent au processus, les erreurs de mesure, ainsi que les incertitudes liées à la modélisation. Ces caractéristiques font des méthodes basées sur des modèles quantitatifs des outils puissants pour le diagnostic et la surveillance des systèmes complexes.

#### • Espaces de parité

L'approche des espaces de parité est principalement utilisée pour la détection des défauts, bien qu'elle offre peu d'informations sur la nature des dysfonctionnements sous-jacents. Cette méthode nécessite souvent un nombre élevé de paramètres, ce qui peut considérablement allonger le temps de paramétrage et augmenter le risque d'erreurs de modélisation. Le résidu est calculé en comparant une valeur simulée à une mesure correspondante d'une même variable [49].

Dans le contexte des centrales solaires thermiques, comme évoqué au **chapitre 1**, les variables couramment analysées incluent l'énergie solaire produite au niveau de la boucle primaire ou celle livrée à l'utilisateur final, ainsi que la température de sortie du champ solaire. Suivre la production d'énergie permet d'obtenir une vue d'ensemble de l'état de santé général du système. Cependant, il est important de noter qu'aucun diagnostic précis ne peut être établi en se basant uniquement sur cette méthode. Pour renforcer la sensibilité et la capacité d'isolation des mesures, des techniques avancées peuvent être mises en œuvre pour créer des résidus améliorés, tels que des résidus structurés ou directionnels. Cela nécessite d'élargir l'espace de parité en ajoutant de nouvelles variables (comme la température, l'énergie ou la puissance à divers points du système), offrant ainsi davantage de degrés de liberté [79].

Actuellement, les espaces de parité sont largement employés dans les centrales solaires à concentration pour vérifier les performances des installations et établir des contrats incluant des garanties de production solaire [49].

#### • Observateurs

Les observateurs représentent une classe de méthodes fondées sur des modèles quantitatifs, bien que leur application dans les centrales solaires thermiques à concentration (CSP) soit encore relativement restreinte. Jusqu'à présent, *Kicsinyet Varga* [66] ont développé un observateur d'état non linéaire global en temps réel, avec des résultats encourageants. Néanmoins, d'autres types d'observateurs pourraient offrir des performances supérieures en fonction des contextes spécifiques. Parmi les observateurs les plus adaptés à la détection et au diagnostic des défauts, on retrouve les filtres de Kalman, les observateurs de sortie [67], ainsi que les observateurs à mode glissant [57].

De manière générale, les systèmes experts et les approches fondées sur les espaces de parité dominent actuellement la détection et le diagnostic des défauts dans les CSP, en raison de leur simplicité de développement, de leur facilité d'utilisation, et de leur compréhension intuitive. Cependant, même les approches hybrides qui combinent ces deux

méthodes rencontrent des limites dans la détection et le diagnostic de l'ensemble des défauts, avec la technologie de métrologie disponible aujourd'hui. Par exemple, des anomalies comme les déséquilibres hydrauliques ou la présence de bulles dans le fluide caloporteur restent difficilement détectables. De plus, les méthodes actuelles ne permettent pas d'isoler efficacement les différentes causes de dégradation des performances des capteurs solaires, ni de localiser précisément les défauts au sein du système.

À l'inverse, les observateurs se sont révélés prometteurs dans des applications spécifiques, telles que la localisation des fuites [59]. Ces méthodes offrent un potentiel qui mériterait d'être exploré davantage dans le cadre des centrales solaires thermiques, notamment pour répondre à des problématiques complexes de diagnostic.

Dans les sections suivantes, nous approfondirons les méthodes de diagnostic basées sur des observateurs mathématiques et analyserons leur potentiel pour améliorer la détection des défauts dans les systèmes solaires thermiques.

### III.4.2 Concepts de diagnostic à base de Modèle

Le processus de détection et de diagnostic de défauts peut être conceptualisé comme une série de transformations appliquées aux données recueillies sur le système étudié [60]. La Figure III.2 propose un schéma simplifié de cette approche, en introduisant également la terminologie spécifique qui sera utilisée dans les sections suivantes de ce document.

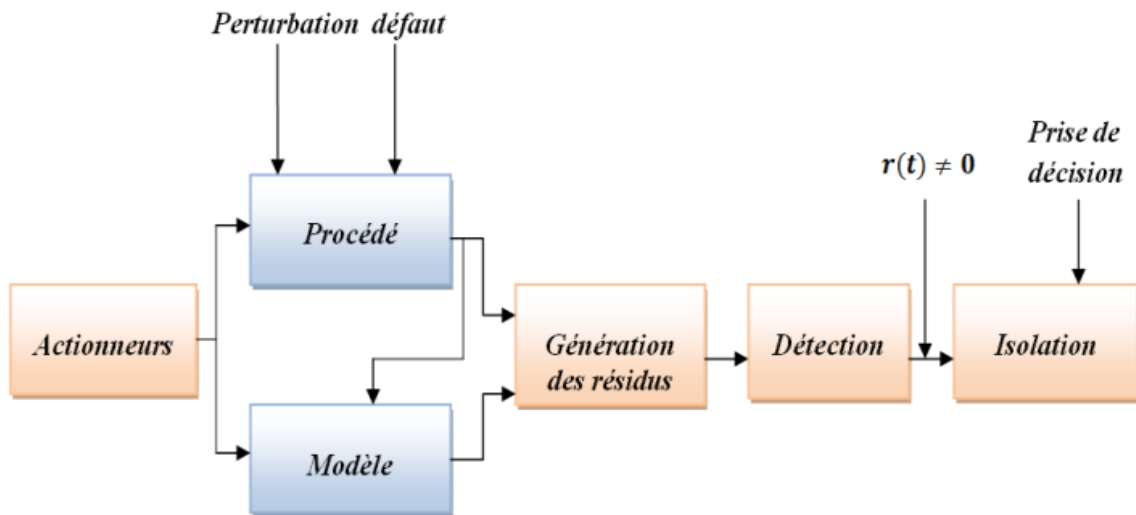


FIG. III.2 : Les différentes étapes d'une méthode de détection et diagnostic de défauts

#### Génération des résidus

La première phase de ce processus consiste à analyser et à combiner les mesures pour en extraire des indicateurs caractéristiques qui reflètent le comportement du système étudié. Cette étape est communément appelée "génération des résidus". En régime normal, les

résidus tendent vers zéro, tandis qu'en cas de dysfonctionnement, ils s'écartent significativement de cette valeur. La Figure III.3 présente une structure générale d'un générateur de résidus, illustrant cette approche [68].

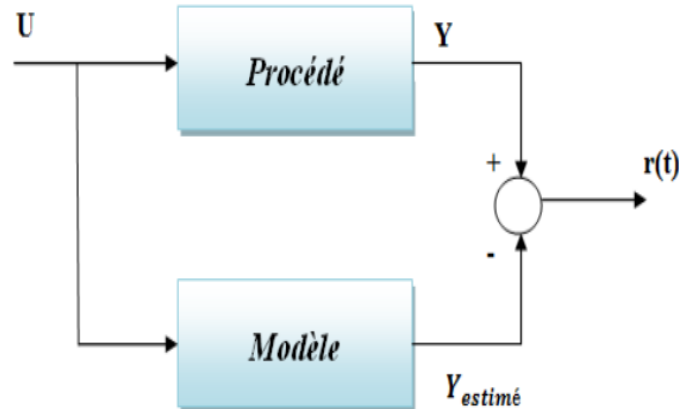


FIG. III.3 : Un schéma simple de génération de résidu

### Évaluation des résidus

Cette phase est consacrée à l'analyse des indicateurs de défaut générés et à l'établissement d'un seuil (qu'il soit fixe, adaptatif ou statistique) qui permettra de détecter tout changement d'état dans le fonctionnement du système. Il est primordial que ces résidus soient conçus pour être robustes et peu sensibles aux perturbations et incertitudes, afin de réduire au maximum le risque de déclenchement de fausses alarmes [62].

### Prise de décision

La phase de prise de décision vise à identifier et à localiser précisément la source de l'anomalie au sein du système [67].

## III.5 Diagnostic des défauts à base d'observateurs

En automatique, la notion d'observabilité est essentielle et intimement liée à celle de contrôle. Elle joue un rôle aussi crucial que l'identification des paramètres dans l'estimation d'un modèle. L'observabilité permet de reconstruire les variables d'état d'un système à partir des mesures d'entrée et de sortie. Si le système est observable, on peut alors concevoir un observateur, un modèle dynamique capable de produire une estimation précise des variables d'état ou de sortie [55, 62, 65].

### III.5.1 Notions d'observabilité dans les systèmes linéaires

Les critères d'observabilité des systèmes linéaires sont largement documentés dans la littérature. Ici, nous nous concentrerons sur les systèmes linéaires déterministes et réguliers.

Considérons un système linéaire décrit par les équations suivantes :

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = Ax(t) + Bu(t), \\ y(t) = Cx(t) + Du(t). \end{cases} \quad (\text{III.5})$$

Les matrices  $A$ ,  $B$  et  $C$ ,  $D$  ont des dimensions appropriées.

Un système linéaire est considéré comme observable si, en se basant sur ses entrées  $u(t)$  et ses sorties  $y(t)$ , il est possible de déterminer complètement son état interne  $x(t)$  sur un certain intervalle de temps. En d'autres termes, l'observabilité signifie que toute variation dans l'état initial du système peut être détectée à partir des mesures des sorties [62, 64].

Le critère classique pour vérifier l'observabilité d'un système linéaire repose sur la matrice d'observabilité. Cette matrice, définie comme suit pour un système linéaire de dimension  $n$ , est :

$$O = \begin{bmatrix} C \\ CA \\ CA^2 \\ \vdots \\ CA^n \end{bmatrix}. \quad (\text{III.6})$$

Si cette matrice d'observabilité  $O$  a un rang maximal égal à  $n$ , alors le système est observable. Cela signifie que toutes les variables d'état peuvent être reconstruites à partir des mesures de sortie et des entrées connues ; le système III.5 est complètement observable si :

$$\text{rang} \begin{bmatrix} sI - A \\ C \end{bmatrix} = n. \quad (\text{III.7})$$

Pour tout nombre complexe  $s$  si un système linéaire est complètement observable, cela signifie qu'il est également globalement observable. En d'autres termes, toutes les composantes du vecteur d'état du système peuvent être observées et reconstruites à l'aide d'un observateur. En revanche, dans le cas d'un système non linéaire, il est nécessaire de faire la distinction entre l'observabilité globale et l'observabilité locale [62].

### III.5.2 Synthèse d'observateurs pour un système linéaire

Un observateur est conçu pour estimer l'état d'un système ou une fonctionnelle linéaire de cet état, telle que la sortie du système. La différence entre la sortie mesurée et son estimation produit des signaux appelés "résidus". L'analyse de ces résidus fournit des informations

précieuses sur l'état de fonctionnement des capteurs et des actionneurs, ainsi que sur la santé générale du système [45].

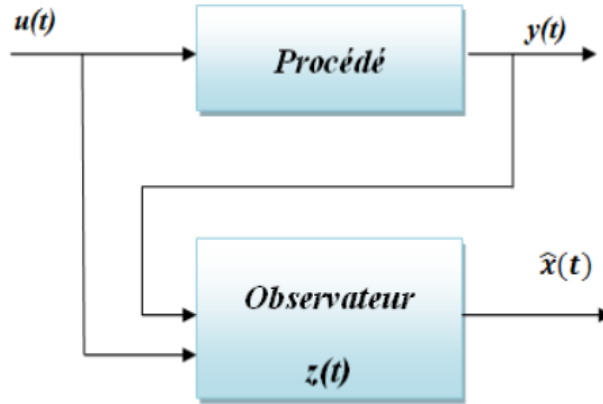


FIG. III.4 : Principe de l'observateur

Le principe de l'observateur, illustré à la figure III.4, repose sur l'utilisation d'un reconstruteur d'état qui reçoit en entrée les signaux d'entrée et de sortie du processus. Sa sortie correspond à une estimation de l'état du processus. L'objectif est d'évaluer l'état d'un système linéaire déterministe, tel que décrit par l'équation III.5.

La construction d'un observateur implique la correction de l'erreur d'estimation entre la sortie mesurée et la sortie reconstruite [55]. Cet observateur est formulé de la manière suivante :

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}}(t) = A\hat{x}(t) + Bu(t) + K(y(t) - \hat{y}(t)), \\ \quad = (A - KC)\hat{x}(t) + Bu(t) + Ky(t), \\ \hat{y}(t) = C\hat{x}(t). \end{cases} \quad (\text{III.8})$$

Où  $K$  est le vecteur de dimension  $n$  appelé vecteur des gains, qui permet de régler la convergence de l'observateur.

L'observateur est conçu de manière à garantir que l'écart entre l'état réel du système et son estimation converge vers zéro lorsque  $t$  tend vers l'infini. Cela implique que les valeurs propres de la matrice  $(A - KC)$  doivent se situer dans le demi-plan gauche du plan complexe, ce qui est une condition essentielle pour assurer la stabilité de l'estimation [67] :

**Théorème 1 :** les valeurs propres de  $(A - KC)$  peuvent être fixées arbitrairement si et seulement si la paire  $(A, C)$  est observable.

En tenant compte des équations d'état et de sortie de l'observateur, comme illustré dans III.5, ainsi que celles du système donné dans III.8, nous pouvons établir le diagramme structurel présenté à la Figure III.5. Ce diagramme permet de visualiser les interactions entre l'observateur et le système, ainsi que la manière dont les entrées et les sorties sont liées. Il illustre clairement le flux d'information entre les différentes composantes, mettant en évi-

dence la relation entre les mesures du système et les estimations fournies par l'observateur [46, 47].

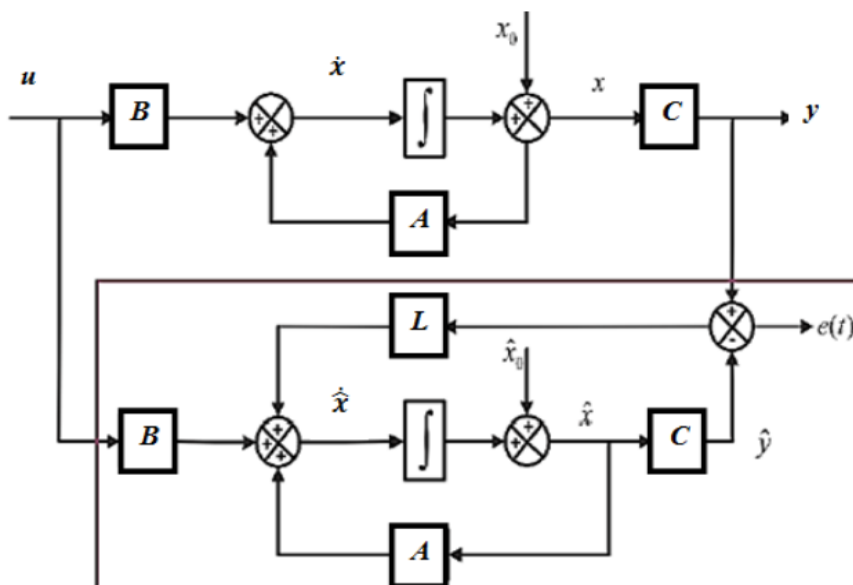


FIG. III.5 : Diagramme structurel d'observateur de Luenberger

Lorsqu'une paire  $(A, C)$  est observable, l'utilisateur dispose d'une grande flexibilité pour déterminer la matrice  $K$ . En général, cette matrice est choisie de manière à ce que les valeurs propres de  $(A - KC)$  se situent dans le demi-plan gauche du plan complexe. De plus, il est souhaitable que la partie réelle des valeurs propres de cette matrice soit plus négative, en valeur absolue, que celle des valeurs propres de la matrice d'état  $A$ . Ainsi, la dynamique de l'erreur d'observation s'avère plus rapide que celle du système étudié [60]. Cependant, deux considérations contradictoires doivent être prises en compte lors du choix de la matrice  $K$  :

- Des perturbations importantes sur la paire  $(A, B)$  peuvent nécessiter une valeur élevée pour  $K$  afin de renforcer l'impact des mesures sur l'estimation de l'état.
- À l'inverse, le bruit présent dans les mesures des grandeurs de sortie, qui est amplifié par le gain  $K$ , requiert une valeur relativement faible de cette matrice.

Ainsi, le choix du gain de l'observateur doit être effectué avec soin, en établissant un compromis qui permet de satisfaire au mieux ces deux contraintes.

### III.5.3 Architecture des bancs d'observateurs

Les bancs d'observateurs constituent une approche puissante et largement employée en raison de leur simplicité conceptuelle et de leur capacité d'adaptation aux systèmes linéaires comme non linéaires. Le principe fondamental repose sur la génération simultanée de plusieurs résidus, chacun étant conçu pour être sensible à un groupe particulier de défauts tout en restant robuste face aux autres. En cas de défaillance, seuls les résidus pertinents réagissent, facilitant ainsi l'isolation et la caractérisation précise du défaut détecté.

Cette approche permet une détection plus fine en minimisant les fausses alarmes grâce

à la sélectivité des résidus. Le banc d'observateurs est particulièrement utile dans des environnements complexes où des défauts multiples et de nature variée peuvent survenir simultanément [64].

Deux Grandes Stratégies de Banc d'Observateurs.

### Stratégie DOS (Dedicated Observer Scheme)

La stratégie DOS repose sur une architecture dans laquelle chaque observateur est associé à un capteur unique du système. La structure correspondante est illustrée dans la Figure III.6. Chaque observateur utilise une seule sortie mesurée pour fournir une estimation de cette même sortie, générant ainsi un résidu spécifique par capteur. Le résidu est calculé comme la différence entre la valeur mesurée et l'estimation fournie par l'observateur [45].

Dans le cas d'un capteur défectueux, une divergence apparaîtra entre les mesures réelles et les estimations issues de l'observateur associé à ce capteur. Les autres résidus, ne dépendant pas de la mesure du capteur défaillant, resteront insensibles à ce défaut. Ce comportement permet d'isoler rapidement l'anomalie en identifiant quel résidu a réagi.

Si aucun défaut n'est présent, le résidu devrait idéalement être nul. En pratique, toutefois, des erreurs de modélisation et du bruit de mesure peuvent entraîner des résidus non nuls. On dit alors que ces résidus sont statiquement nuls, c'est-à-dire qu'ils fluctuent autour de zéro sans atteindre une valeur significative [51].

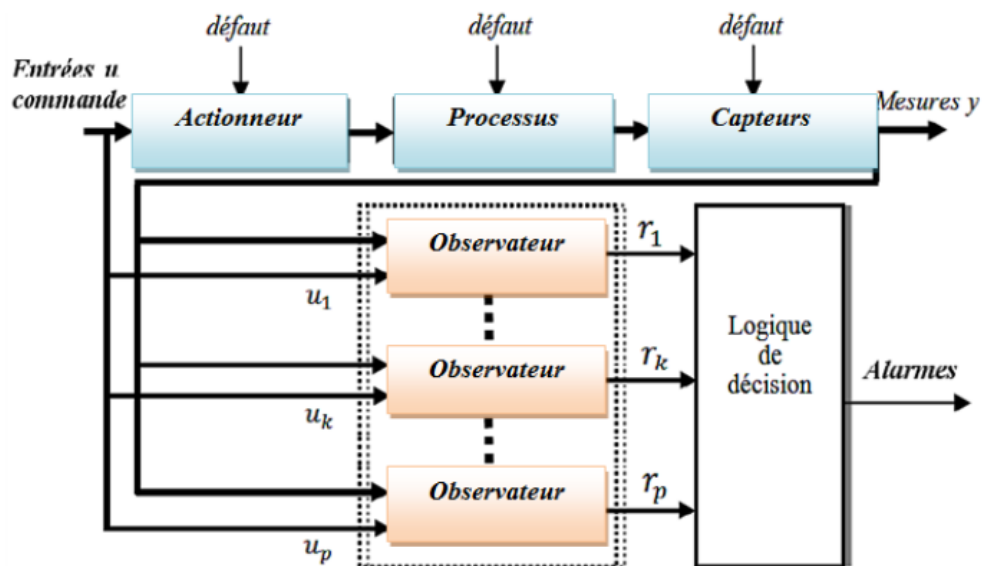


FIG. III.6 : Observateur DOS pour la détection des défauts capteurs

Le tableau III.1 présente une matrice de signatures des défauts associée à la structure DOS. Cette matrice indique la sensibilité de chaque résidu à un défaut donné. Une cellule marquée "1" signifie que le résidu correspondant est affecté par le défaut (d'entrée ou de sortie), tandis qu'une cellule marquée "0" signifie que ce défaut n'a pas d'impact sur le résidu concerné.

Cette matrice est un outil précieux pour l'isolation des défauts, permettant de détecter avec précision les capteurs défectueux en fonction des résidus activés.

TAB. III.1 : Signatures théoriques des défauts (résidus dédiés).

Résidus	Défauts				
	$f_1$	$f_2$	...	$f_{p-1}$	$f_p$
$r_1$	1	0	0	0	0
$r_2$	0	1	...	0	0
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
$r_{p-1}$	0	0	...	1	0
$r_p$	0	0	...	0	1

### La stratégie GOS (Generalized Observer Scheme)

La stratégie GOS est une extension améliorée de la structure DOS. Elle vise à accroître la robustesse et à améliorer la précision du diagnostic, notamment en cas de défauts multiples ou de bruit. Contrairement à la stratégie DOS, où chaque observateur utilise une seule mesure spécifique, la stratégie GOS repose sur une approche plus redondante.

Dans cette configuration, chaque observateur estime les sorties du système en utilisant l'ensemble des mesures, à l'exception d'une seule [60, 66]. Cela signifie que chaque observateur ignore volontairement une mesure différente, ce qui permet d'introduire une redondance dans le traitement. La Figure III.7 illustre cette structure.

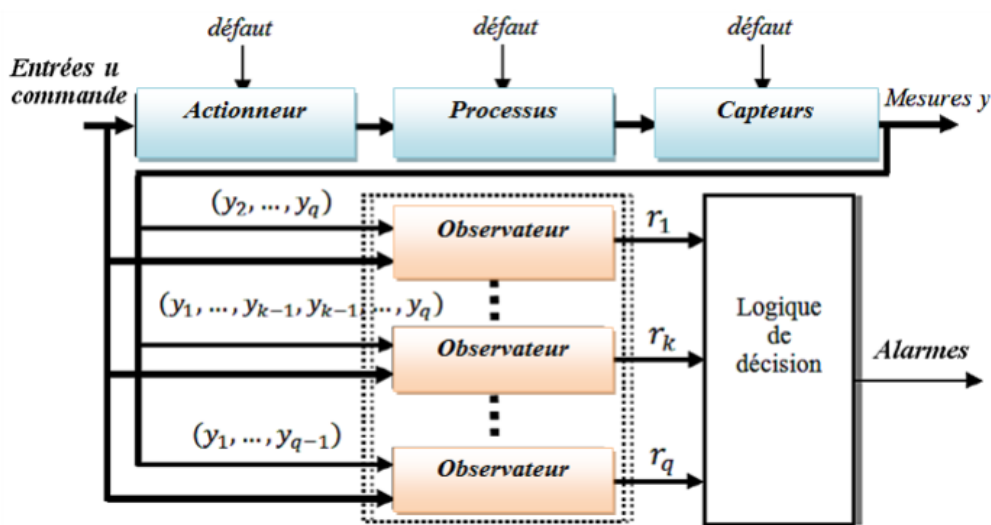


FIG. III.7 : Observateur GOS pour la détection des défauts capteurs

Lorsqu'un capteur devient défectueux, tous les observateurs détectent une anomalie dans les résidus, sauf celui qui ne prend pas en compte la mesure issue du capteur défaillant. Ce comportement permet de localiser rapidement le capteur fautif : si un seul observateur continue de produire un résidu nul (ou statiquement nul), cela indique que le capteur ignoré par cet observateur est défectueux. Cette redondance garantit une détection fiable même en présence de perturbations.

La Figure III.8 illustre une structure de banc d'observateurs GOS (Generalized Observer Scheme) adaptée pour détecter et diagnostiquer les défauts d'actionneurs. Ce schéma repose sur le même principe que celui utilisé pour les capteurs, mais appliqué ici aux entrées du système, c'est-à-dire aux actionneurs. Chaque observateur est configuré de manière à recevoir toutes les entrées et sorties, à l'exception d'une entrée spécifique qu'il ignore [67, 69].

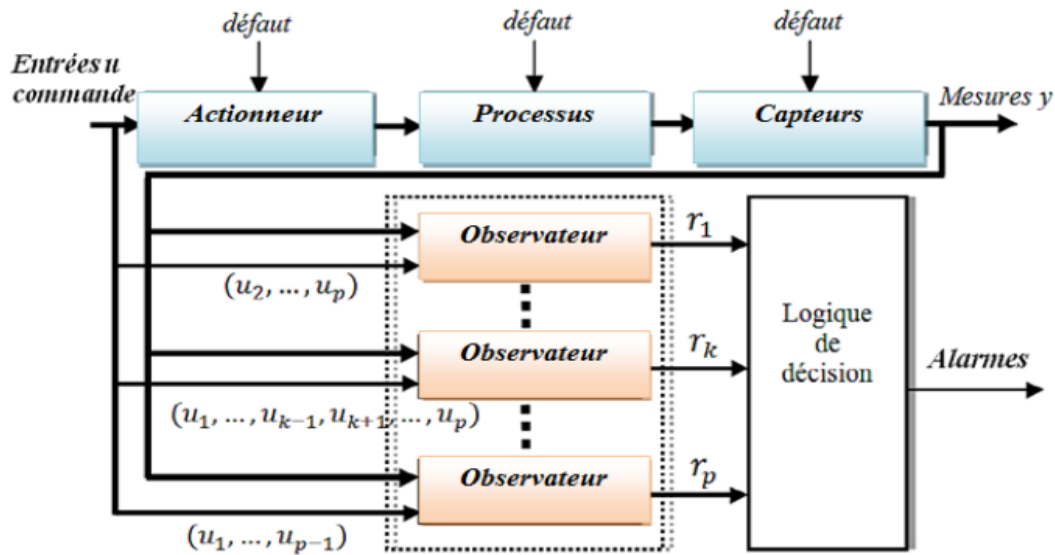


FIG. III.8 : Observateur GOS pour la détection des défauts d'actionneurs

Dans cette configuration, lorsqu'un actionneur devient défectueux, la réponse du système ne correspond plus aux estimations prévues. Cela provoque une différence entre les mesures réelles et les estimations pour tous les observateurs connectés à cet actionneur défaillant. Cependant, l'observateur qui ignore cette entrée spécifique (celle de l'actionneur défectueux) ne détecte aucune anomalie, car son estimation ne dépend pas de l'actionneur en question. Ainsi, il est possible d'identifier rapidement l'actionneur défectueux grâce à l'analyse des résidus générés par chaque observateur.

Le Tableau III.2 présente la matrice des signatures théoriques des défauts pour la structure GOS (Generalized Observer Scheme). Cette matrice fournit un aperçu de l'impact des défauts sur les différents observateurs en distinguant les observateurs affectés ou non par une défaillance donnée [64].

TAB. III.2 : Signatures théoriques des défauts (résidus généralisés).

Résidus	Défauts				
	$f_1$	$f_2$	...	$f_{p-1}$	$f_p$
$r_1$	0	1	1	1	1
$r_2$	1	0	1	1	1
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
$r_{p-1}$	1	1	...	0	1
$r_p$	1	1	...	1	0

### Comparaison entre la stratégie GOS et la stratégie DOS

La stratégie GOS offre une meilleure capacité d'isolation des défauts et une plus grande robustesse que la structure DOS. Cependant, cela se fait au prix d'une complexité supplémentaire. Le choix entre les deux stratégies dépend donc des besoins du système à diagnostiquer :

- La stratégie DOS est préférable lorsque la simplicité est une priorité et que les défauts sont rares.
- La stratégie GOS est recommandée pour des systèmes critiques, où la fiabilité du diagnostic et la gestion des défauts multiples sont essentielles.

En résumé, la structure GOS s'impose comme une solution robuste pour le diagnostic dans des environnements complexes, où chaque capteur joue un rôle essentiel et où l'identification rapide des anomalies est primordiale.

## III.6 Observateurs non linéaires

Ces dernières années, le contrôle et le diagnostic des systèmes dynamiques complexes et incertains soumis à des perturbations externes ont attiré une attention accrue. En pratique, il est souvent difficile, voire impossible, de mesurer directement toutes les variables d'état d'un système. Dans de telles circonstances, la conception d'un observateur repose uniquement sur les sorties mesurées et les entrées connues, offrant une approche efficace pour estimer l'état du système avec précision.

Les observateurs non linéaires jouent un rôle crucial pour les systèmes dont les dynamiques ne peuvent pas être représentées correctement par des modèles linéaires. Ces observateurs se déclinent principalement en trois catégories [62], chacune adaptée à des besoins spécifiques :

- **Observateur à mode glissant** : Très robuste vis-à-vis des incertitudes de modélisation et des perturbations. Il introduit une dynamique de glissement pour forcer l'erreur d'estimation

à zéro en un temps fini.

- **Filtre de Kalman étendu (EKF) :** Une extension du filtre de Kalman pour les systèmes non linéaires, où le modèle est linéarisé autour du point de fonctionnement à chaque itération. Bien que efficace, sa performance dépend fortement de la précision de la linéarisation.

- **Observateurs adaptatifs :** Utilisés lorsque le modèle contient des paramètres incertains ou variables dans le temps. Ces observateurs ajustent dynamiquement les paramètres du modèle pour minimiser l'erreur d'estimation.

Dans le cadre de la commande robuste, les systèmes à structure variable, notamment ceux utilisant un mode glissant, ont démontré des performances remarquables. Ces systèmes sont particulièrement adaptés pour gérer les incertitudes de modélisation et les perturbations externes, tout en garantissant la stabilité et une convergence rapide des erreurs d'estimation.

### III.6.1 Observateur à mode glissant

Dans cette section, nous visons à construire un observateur à mode glissant en nous appuyant sur les contributions théoriques reconnues, notamment celles d'Utkin [76, 77] et de *Walcott et Zak* [79, 80]. Nous détaillerons ces approches pour en extraire les principes fondamentaux, avant de présenter l'amélioration proposée par *Edwards et Spurgeon* [57, 58]. Leur méthodologie permet de corriger certaines limitations des approches précédentes, notamment en garantissant une meilleure convergence et une plus grande robustesse face aux incertitudes.

L'observateur à mode glissant repose sur la commande à structure variable, introduite par Utkin [77], qui utilise une surface de glissement pour forcer l'erreur d'estimation à zéro en un temps fini. Cependant, dans certaines situations, ces observateurs peuvent générer un phénomène indésirable connu sous le nom de chattering (oscillations rapides), qui peut affecter la précision de l'estimation. *Walcott et Zak* [76, 77] ont proposé une approche pour réduire cet effet, mais elle présente des limites, notamment dans la gestion des incertitudes et de la convergence asymptotique de l'état estimé.

#### Méthodes de Walcott et Zak

Le problème abordé par *Walcott et Zak* [79] consiste à concevoir un observateur d'état capable de garantir une convergence exponentielle de l'erreur d'estimation vers zéro, même en présence d'incertitudes ou de perturbations non modélisées. Leur approche repose sur une formulation robuste qui prend en compte des incertitudes bornées.

L'équation dynamique du système sous incertitude est donnée par :

$$f(x, u, t) = R\xi(x, t). \quad (\text{III.9})$$

Où la fonction  $\xi : R^n \times R_+ \rightarrow R_q$  est une fonction inconnue et bornée.

La norme de cette fonction est bornée par :

$$\|\xi(x(t), t)\| \leq \rho, \quad \forall x(t) \in \mathbb{R}^n, t \geq 0. \quad (\text{III.10})$$

Avec  $\rho$  une constante positive qui représente la borne maximale des incertitudes.

On considère qu'il existe une matrice  $G \in \mathbb{R}^{n \times p}$  que la matrice  $A_0 = (A - GC)$  a des valeurs propres stables, c'est-à-dire que toutes ses valeurs propres sont situées dans le demi-plan gauche du plan complexe. Pour assurer la stabilité exponentielle de l'erreur d'estimation, on introduit une paire de matrices de *Lyapunov* ( $P, Q$ ) symétriques et définies positives :

$$(A - GC)^T P + P(A - GC) = -Q. \quad (\text{III.11})$$

De plus, la matrice  $F$  est choisie de manière à satisfaire la relation suivante :

$$C^T F^T = PR$$

Ces conditions assurent la convergence asymptotique de l'erreur d'estimation et permettent de concevoir un observateur robuste face aux perturbations.

L'observateur proposé est de la forme :

$$\dot{\hat{x}}(t) = A\hat{x}(t) + Bu(t) - G(C\hat{x}(t) - y(t)) + v(t). \quad (\text{III.12})$$

Où  $v(t)$  : Terme de correction additionnel pour compenser les incertitudes est défini par :

$$v(t) = \begin{cases} -\rho \frac{P^{-1} C^T F^T F C e(t)}{\|F C e(t)\|}, & \text{si } F C e(t) \neq 0, \\ 0, & \text{sinon.} \end{cases} \quad (\text{III.13})$$

Avec :

$$e(t) = \hat{x}(t) - x(t).$$

La dynamique de l'erreur d'estimation d'état engendrée par cet observateur est régie par l'équation suivante :

$$\begin{aligned} \dot{V}(e(t)) &= \dot{e}^T(t) P e(t) + e^T(t) P \dot{e}(t) \\ &= ((A - GC)e(t) + v(t) - R\xi(x, t))^T P e(t) + e^T(t) P ((A - GC)e(t) + v(t) - R\xi(x, t)) \\ &= -e^T(t) Q e(t) + 2e^T(t) P v(t) - 2e^T(t) P R \xi(x, t). \end{aligned} \quad (\text{III.14})$$

Après simplification :

$$\dot{e}(t) = (A - GC)e(t) + v(t) - R\xi(x, t). \quad (\text{III.15})$$

Considérons la fonction de *Lyapunov* suivante :

$$V(e(t)) = e^T(t)Pe(t). \quad (\text{III.16})$$

Sa dérivée le long de la trajectoire de l'erreur d'estimation s'écrit :

$$\begin{aligned} \dot{V}(e(t)) &= \dot{e}^T(t)Pe(t) + e^T(t)P\dot{e}(t) \\ &= ((A - GC)e(t) + v(t) - R\xi(x, t))^T Pe(t) + e^T(t)P((A - GC)e(t) + v(t) - R\xi(x, t)) \\ &= -e^T(t)Qe(t) + 2e^T(t)Pv(t) - 2e^T(t)PR\xi(x, t). \end{aligned} \quad (\text{III.17})$$

Après développement :

$$\dot{V}(e(t)) = -e^T(t)Qe(t) + 2e^T(t)Pv(t) - 2e^T(t)C^T F^T \xi(x, t). \quad (\text{III.18})$$

On distingue deux cas :

**Cas 1 :** Lorsque  $FCe(t) \neq 0$ , en remplaçant l'expression de  $v(t)$  par l'équation III.13, la dérivée de la fonction de *Lyapunov* devient :

$$\begin{aligned} \dot{V}(e(t)) &= -e^T(t)Qe(t) - 2e^T(t) \frac{\rho (C^T F^T F C e(t))}{\|FCe(t)\|} - 2e^T(t)C^T F^T \xi(x, t) \\ &= -e^T(t)Qe(t) - 2\rho \|FCe(t)\| - 2e^T(t)C^T F^T \xi(x, t). \end{aligned} \quad (\text{III.19})$$

En utilisant le fait que la fonction inconnue  $\xi(x, t)$  est bornée par un scalaire positif  $\rho$ , la dérivée de la fonction de *Lyapunov* peut être majorée de la façon suivante :

$$\begin{aligned} \dot{V}(e(t)) &\leq -e^T(t)Qe(t) - 2\rho \|FCe(t)\| + 2\rho \|FCe(t)\| \\ &\leq -e^T(t)Qe(t) < 0. \end{aligned} \quad (\text{III.20})$$

Ce résultat montre que la dérivée de la fonction de *Lyapunov* est strictement négative, garantissant ainsi une décroissance exponentielle de l'erreur.

**Cas 2 :** Lorsque  $FCe(t) = 0$ , en remplaçant l'expression de  $v(t)$  par l'équation III.13, la dérivée de la fonction de *Lyapunov* devient :

$$\dot{V}(e(t)) = -e^T(t)Qe(t) < 0. \quad (\text{III.21})$$

Dans les deux cas, la dérivée de la fonction de *Lyapunov* est strictement négative. Cela prouve que l'erreur d'estimation converge asymptotiquement vers zéro, assurant ainsi la performance de l'observateur [63]. Pour garantir la convergence de l'erreur d'estimation vers zéro, les conditions suivantes doivent être satisfaites :

- Observabilité : la paire  $(A,C)$  est observable,
- Matrices de *Lyapunov* : il existe une paire de matrices de *Lyapunov*  $(P,Q)$  et une matrice  $F$  respectant les contraintes III.11.

L'inconvénient majeur de l'observateur de *Walcott* et *Zak* survient lorsque le terme  $FCe(t) = 0$  alors que l'erreur d'estimation de la sortie  $Ce(t) \neq 0$ , C'est-à-dire lorsque la matrice  $F$  est orthogonale au vecteur  $Ce(t)$ . Dans ce cas de figure, la convergence de l'observateur n'est pas garantie.

### Observateur en forme canonique

Edwards et Spurgeon [57, 58] ont proposé une méthode d'observation à mode glissant inspirée de la structure développée par *Walcott* et *Zak* [79], mais avec une amélioration notable. Leur approche vise à contourner le principal inconvénient de l'observateur de *Walcott* et *Zak* [62], tout en maintenant une robustesse élevée face aux incertitudes du système.

Considérons à nouveau le système dynamique suivant :

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + R\xi(x, u, t), \\ y(t) = Cx(t). \end{cases} \quad (\text{III.22})$$

Où  $A \in R^{n \times n}$ ,  $B \in R^{n \times m}$ ,  $C \in R^{p \times n}$  et  $D \in R^{n \times q}$  où  $p \geq q$ . On suppose que les matrices  $A$ ,  $B$  et  $R$  sont de plein rang et la fonction  $\xi : R_+ \times R^n \times R^m \rightarrow R^q$  est une fonction bornée inconnue telle que :

$$\|\xi(x, u, t)\| \leq \rho. \quad (\text{III.23})$$

Avant de procéder à l'estimation de l'état et des sorties du système III.18, deux changements de coordonnées seront appliqués pour simplifier l'analyse et faciliter la conception de l'observateur.

Pour obtenir une forme canonique, nous transformons l'état  $x(t)$  en deux sous-vecteurs distincts afin de séparer les parties observables du système. Ces transformations facilitent la construction de l'observateur à mode glissant.

### Transformation de l'état :

Décomposons le vecteur d'état  $x(t) \in \mathbb{R}^n$  comme suit :

$$x(t) = \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix}, \quad x_1(t) \in \mathbb{R}^q, \quad x_2(t) \in \mathbb{R}^{n-q}. \quad (\text{III.24})$$

Le vecteur  $x_1(t)$  correspond à la partie directement influencée par les perturbations, tandis que  $x_2(t)$  capture la dynamique restante.

**Forme canonique :**

La matrice  $A$  est alors décomposée en blocs compatibles avec cette séparation :

$$A = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix}. \quad (\text{III.25})$$

Où chaque sous-matrice  $A_{ij}$  correspond à une interaction spécifique entre  $x_1$  et  $x_2$ . De manière similaire, nous transformons la matrice de sortie  $C$  :

$$C = (C_1 C_2)$$

### III.6.2 Conception de multiobservateurs

Les techniques de détection et disolation de défauts basées sur des modèles mathématiques se sont avérées particulièrement efficaces pour les systèmes linéaires. Le principe fondamental repose sur la génération de résidus des signaux issus de la comparaison entre le comportement théorique (nominal) du système et son comportement réel. Ces résidus permettent d'identifier des écarts anormaux, révélateurs de pannes ou de dysfonctionnements [82].

Cependant, cette approche se complique lorsqu'elle est appliquée à des systèmes non linéaires, en raison de la nature dynamique de ces systèmes et de leurs comportements complexes. Les techniques classiques, comme la linéarisation autour d'un point de fonctionnement, sont souvent utilisées pour contourner ces difficultés. Elles consistent à représenter un système non linéaire sous une forme linéaire valable uniquement dans une petite région de l'espace d'état. À cela s'ajoute la génération de résidus robustes, capables de tolérer de faibles variations de paramètres [81].

Toutefois, ces stratégies ne sont efficaces que si le système reste suffisamment proche du point de linéarisation. Lorsque le système présente des changements de comportement significatifs ou une forte non-linéarité, la linéarisation devient insuffisante. Dans ces cas, un multi-modèle est nécessaire pour capturer et modéliser la diversité des dynamiques du système.

Ces dernières années, l'utilisation de multi-modèles a gagné en popularité auprès des chercheurs dans le domaine de l'automatique. En particulier, les systèmes non linéaires sont souvent décrits à l'aide de modèles *Takagi – Sugeno* ( $T - S$ ) [75], qui offrent une flexibilité

appréciable. Dans cette approche, le comportement global du système est exprimé comme une combinaison pondérée de plusieurs modèles locaux. Chaque modèle local correspond à une approximation linéaire ou bilinéaire du comportement du système dans une région spécifique.

À chaque modèle local est associé un observateur local qui estime l'état du système dans cette région donnée. L'estimation globale est ensuite obtenue en combinant linéairement les sorties de ces observateurs locaux. Grâce à cette structure, il est possible d'appliquer des techniques classiques de conception linéaire à chaque sous-modèle, ce qui simplifie significativement la synthèse. En d'autres termes, le système est vu comme une collection de modèles locaux, chacun étant plus facile à analyser et à contrôler [72].

Des chercheurs comme Tanaka et al [74]. Ont introduit de nouvelles conditions de stabilité pour les systèmes représentés sous forme de multi-modèles, tant en temps continu qu'en temps discret. Ces travaux ont permis de définir un cadre théorique rigoureux pour la conception de multi-observateurs. Une première tentative notable a été la construction d'un multiobservateur non linéaire comme une combinaison de plusieurs observateurs locaux[75].

De plus, *Assawinchaichote et al* [48] se sont intéressés à la conception d'un observateur flou robuste pour des systèmes non linéaires perturbés. En s'appuyant sur une approche de *Lyapunov*, ils ont démontré que l'erreur d'estimation d'état converge asymptotiquement vers zéro. Cette robustesse est particulièrement précieuse lorsque des incertitudes ou perturbations affectent le système, ce qui est souvent le cas dans des environnements réels [73]. Ces travaux confirment l'efficacité de la modélisation  $T - S$  dans la détection et l'isolation de défauts pour des systèmes non linéaires incertains.

L'utilisation de multiobservateurs dans un cadre *Takagi – Sugeno* présente plusieurs avantages :

- **Adaptabilité aux dynamiques changeantes** : Chaque observateur local est conçu pour un régime particulier du système, permettant une meilleure gestion des transitions entre les différents états de fonctionnement.

- **Robustesse aux incertitudes** : Les techniques de conception assurent une estimation précise même en présence de perturbations ou de variations des paramètres du système.

- **Réutilisation des méthodes linéaires** : L'approche  $T - S$  permet de profiter des avancées et outils développés pour les systèmes linéaires, rendant la conception plus intuitive.

- **Estimation fiable** : L'utilisation d'observateurs robustes assure une convergence rapide et précise de l'erreur d'estimation, même dans des conditions perturbées.

Grâce à cette approche, les défauts ou anomalies peuvent être détectés de manière plus fiable, ce qui améliore la sécurité et la performance globale des systèmes non linéaires complexes.

### Multi-observateurs à mode glissant

La conception d'un multi-observateur à structure variable, également appelée mode glissant, constitue une approche robuste pour la reconstruction du vecteur d'état et du vecteur de sortie en présence d'entrées inconnues. Ce type d'observateur est particulièrement adapté aux systèmes non linéaires soumis à des incertitudes et perturbations [56].

L'idée principale consiste à isoler les entrées inconnues dans une partie spécifique des équations du système, ce qui facilite leur gestion sans affecter l'estimation de l'état global. Chaque observateur local utilisé dans cette approche suit la structure proposée par Edwards et Spurgeon [57], qui est reconnue pour ses propriétés robustes. Ces observateurs sont conçus de manière à atténuer l'effet des perturbations et garantir une estimation stable et précise du système. L'objectif est de découpler une partie des entrées inconnues afin d'assurer une meilleure précision dans la reconstruction de l'état.

Considérons de nouveau un système non linéaire représenté par le multi-modèles suivant :

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = \sum_{i=1}^M \mu_i(\zeta(t))(A_i x(t) + B_i u(t) + R_i \bar{u}(t) + D_i), \\ y(t) = Cx(t). \end{cases} \quad (\text{III.26})$$

Nous considérons que les entrées inconnues  $\bar{u}(t)$  sont bornées et non nulles :

$$\|\bar{u}(t)\| \leq \rho. \quad (\text{III.27})$$

Où  $\rho$  est un scalaire positif et  $\|\cdot\|$  représente la norme euclidienne.

Le multi-observateurs correspondant est donné par :

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}}(t) = \sum_{i=1}^M \mu_i(\zeta(t))(A_i \hat{x}(t) + B_i u(t) + D_i - G_i(C\hat{x}(t) - y(t)) + K_i v_i(t)), \\ \hat{y}(t) = C\hat{x}(t). \end{cases} \quad (\text{III.28})$$

est capable d'estimer le vecteur d'état du multi-modèle III.24, s'il existe des matrices de gain  $G_i \in R^{n \times p}$ , telle que  $A_{0i} = A_i - G_i C$  sont stables, des paires de matrices de *Lyapunov*  $(P, Q_i)$  et des matrices  $F_i \in R^{m \times p}$  respectant les contraintes suivantes :

$$\begin{cases} A_{0i}^T P + P A_{0i} = -Q_i, \\ C^T F_i^T = P R_i, \quad \forall i \in \{1, \dots, M\}. \end{cases} \quad (\text{III.29})$$

Les matrices  $G_i$ ,  $K_i$  et les termes  $v_i(t)$ , avec  $v_i(t) \in R^q$  sont déterminés de manière à garantir la convergence asymptotique de  $\hat{x}(t)$  vers l'état  $x(t)$  du multimodèle III.26. La deuxième équation des contraintes III.28 permet le découplage des entrées inconnues.

L'erreur d'estimation d'état  $e(t)$  définie par :

$$e(t) = x(t) - \hat{x}(t). \quad (\text{III.30})$$

Et celle de l'erreur d'estimation du vecteur de sortie  $r(t)$  décrite par :

$$e_y(t) = y(t) - \hat{y}(t) = C(x(t) - \hat{x}(t)) = Ce(t). \quad (\text{III.31})$$

La dynamique de l'erreur d'estimation d'état est donnée comme suit :

$$\dot{e}(t) = \sum_{i=1}^M \mu_i(\zeta(t)) \left( (A_i - G_i C) e + R_i \bar{u}(t) + R_i v_i(t) \right). \quad (\text{III.32})$$

**Théorème 2 :** l'erreur d'estimation d'état entre le multi-modèle et le multiobservateur robuste converge asymptotiquement vers zéro, si les termes  $v_i(t)$  sont définis par :

$$v_i(t) = \begin{cases} \rho \frac{F_i e_y}{\|F_i e_y\|} & \text{si } e_y(t) \neq 0, \\ 0 & \text{si } e_y(t) = 0. \end{cases} \quad (\text{III.33})$$

Et s'il existe une matrice symétrique définie positive  $P$  qui satisfait les inégalités suivantes :

$$(A_i - G_i C)^T P + P(A_i - G_i C) < 0, \quad (\text{III.34})$$

**Preuve :** Pour démontrer la stabilité du système, considérons la fonction de *Lyapunov* suivante :

$$V(t) = e^T(t) P e(t). \quad (\text{III.35})$$

Sa dérivée par rapport au temps, qui a été évaluée le long de la trajectoire du système en utilisant les équations III.28 et III.30, peut être exprimée comme suit :

$$\dot{V}(t) = \sum_{i=1}^M \mu_i(\xi(t)) \left( e^T(t) (\bar{A}^T P + P \bar{A}) e(t) + 2e^T(t) P R_i \bar{u}(t) - 2e^T(t) P R_i v_i(t) \right) \quad (\text{III.36})$$

En utilisant la seconde partie de la contrainte III.34, cette dérivée devient :

$$\dot{V}(t) = \sum_{i=1}^M \mu_i(\xi(t)) \left( e^T(t) (\bar{A}^T P + P \bar{A}) e(t) + 2e^T(t) C^T F_i^T \bar{u}(t) - 2e^T(t) C^T F_i^T v_i(t) \right) \quad (\text{III.37})$$

$$\dot{V}(t) = \sum_{i=1}^M \mu_i(\xi(t)) \left( e^T(t) (\bar{A}^T P + P \bar{A}) e(t) + 2e_y^T(t) F_i^T \bar{u}(t) - 2e_y^T(t) F_i^T v_i(t) \right) \quad (\text{III.38})$$

Que l'on peut majorer par :

$$\dot{V}(t) \leq \sum_{i=1}^M \mu_i(\xi(t)) \left( e^T(t) (\bar{A}^T P + P \bar{A}) e(t) + 2\rho \|F_i e_y\| - 2e_y^T(t) F_i^T v_i(t) \right) \quad (\text{III.39})$$

En utilisant la relation III.34, nous obtenons :

Dans le cas où l'erreur d'estimation de la sortie  $e_y(t)$  est non nulle ( $e_y \neq 0$ ) en utilisant la relation III.34, en remplaçant  $v_i(t)$  par sa définition, on obtient :

$$\dot{V}(t) \leq \sum_{i=1}^M \mu_i(\xi(t)) \left( e^T(t) (\bar{A}^T P + P \bar{A}) e(t) + 2\rho \|F_i e_y\| - 2\rho e_y^T(t) \frac{F_i^T F_i e_y}{\|F_i e_y\|} \right) \quad (\text{III.40})$$

Ainsi :

$$\dot{V}(t) \leq \sum_{i=1}^M \mu_i(\xi(t)) \left( e^T(t) (\bar{A}^T P + P \bar{A}) e(t) \right) \quad (\text{III.41})$$

Lorsque les conditions de stabilité sont vérifiées (équations III.29 et III.34), la fonction de *Lyapunov* décroît le long des trajectoires du système, assurant ainsi que :

$$\lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = 0$$

Cela garantit que l'état estimé par le multiobservateur converge asymptotiquement vers l'état réel du système, même en présence d'entrées inconnues.

## III.7 Conclusion

Ce chapitre met en évidence que le diagnostic des défauts des centrales solaires cylindro-paraboliques (*CSP*) est insuffisamment exploré, malgré leur importance croissante. Les principales lacunes relevées incluent l'absence d'études complètes sur les défauts, un manque d'analyses de leur impact sur le système global, et des méthodes de détection limitées, en particulier pour identifier et localiser les défauts dans le champ solaire.

Pour relever ces défis, notre recherche s'est orientée vers des techniques avancées basées sur des observateurs non linéaires, visant à améliorer la détection et le diagnostic des défauts. Nous avons proposé une approche robuste utilisant le modèle *Takagi–Sugeno*, qui permet de représenter de manière plus complète le comportement des *CSP* en combinant plusieurs sous-modèles locaux. L'utilisation de multiobservateurs à mode glissant a été développée pour garantir la robustesse face aux perturbations, permettant d'isoler partiellement les entrées inconnues dans l'équation d'état.

La validité de ces observateurs a été démontrée par des fonctions de *Lyapunov*, prouvant la convergence de l'erreur d'estimation d'état vers zéro, ce qui assure que l'estimation suit fidèlement l'état réel, même en présence d'incertitudes. Les résultats montrent que la combinaison des multi-modèles *Takagi – Sugeno* et des multiobservateurs à mode glissant offre une solution robuste pour le diagnostic des défauts des CSP, ouvrant la voie à des applications industrielles dans la surveillance et la maintenance prédictive.

---

## Application et résultats

### IV.1 Introduction

Le système de génération d'électricité solaire, connu sous l'acronyme *SEGS* (Solar Electric Generating Systems), regroupe une série de centrales solaires thermiques utilisant des capteurs cylindro-paraboliques pour convertir le rayonnement solaire en électricité. Ces installations, qui allient innovation technologique et production durable, ont été présentées en détail dans le premier chapitre de ce document.

Ce chapitre se concentre plus particulièrement sur la centrale *SEGS VI*, une unité de 30 *MWe* mise en service en 1988 par Luz International Ltd. Située dans le désert de Mojave, en Californie du Sud, cette centrale constitue un exemple marquant des performances des centrales solaires cylindro-paraboliques (*CSP*) dans des conditions environnementales extrêmes.

En complément, ce chapitre aborde un aspect critique de l'exploitation des centrales solaires thermiques : le diagnostic des défauts. En s'appuyant sur un modèle simplifié du système *SEGS*, il explore des approches avancées pour la surveillance et la détection des anomalies. Ces mécanismes sont essentiels pour garantir une production énergétique fiable, prolonger la durée de vie des équipements, et optimiser les coûts d'exploitation en réduisant les interruptions liées à la maintenance ou aux pannes.

Dans ce cadre, l'accent est mis sur la modélisation et le diagnostic des défauts affectant les capteurs, les actionneurs et d'autres sous-systèmes critiques. Le modèle réduit de la centrale *SEGS* est reformulé dans un cadre *Takagi – Sugeno* ( $T - S$ ), permettant de gérer efficacement les systèmes non linéaires. Ce modèle sert de base au développement d'approches de diagnostic adaptées.

En particulier, le chapitre met en avant l'utilisation des Multi Observateur à Mode

Glissant (*FSMO*), reconnus pour leur robustesse face aux perturbations et incertitudes. Ces observateurs permettent de détecter et d'isoler les défauts avec une précision accrue en analysant les écarts entre les valeurs observées et celles prédites par le modèle. Enfin, des simulations détaillées sont présentées pour illustrer les performances du *FSMO* dans divers scénarios, avec ou sans défauts.

L'objectif principal de ce chapitre est de démontrer comment la combinaison de techniques de modélisation avancées et d'outils de diagnostic robustes peut améliorer la surveillance et la maintenance des centrales *SEGS*, ouvrant ainsi la voie à des solutions industrielles plus fiables et performantes.

## IV.2 Le modèle simplifié de la centrale solaire (SEGS)

### IV.2.1 Présentation Générale du SEGS

Les Systèmes de Génération Électrique Solaire (*SEGS*) sont des centrales solaires thermiques composées de deux sous-systèmes principaux :

**1• Un champ de capteurs solaires cylindro-paraboliques :** Ils captent le rayonnement solaire et le concentrent sur un tube absorbeur, chauffant ainsi un fluide caloporteur (*HTF*, Heat Transfer Fluid).

**2• Un cycle thermique basé sur le principe de Clausius-Rankine :** La chaleur collectée est utilisée pour produire de la vapeur dans un échangeur de chaleur, qui alimente une turbine reliée à un générateur électrique. [88]

### IV.2.2 Architecture du Modèle Simplifié

La Figure IV.1 illustre l'architecture simplifiée du système *SEGS*. Le modèle se concentre sur les éléments clés influençant les transferts thermiques et les dynamiques du système :

**1• Collecteurs cylindro-paraboliques :** Assurent la concentration de l'énergie solaire sur le fluide caloporteur.

**2• Vase d'expansion :** Maintient une pression stable dans le circuit.

**3• Échangeur de chaleur :** Transfère la chaleur accumulée vers un fluide de travail (eau ou vapeur).

**4• Pompe *HTF* :** Assure la circulation du fluide caloporteur dans le système.

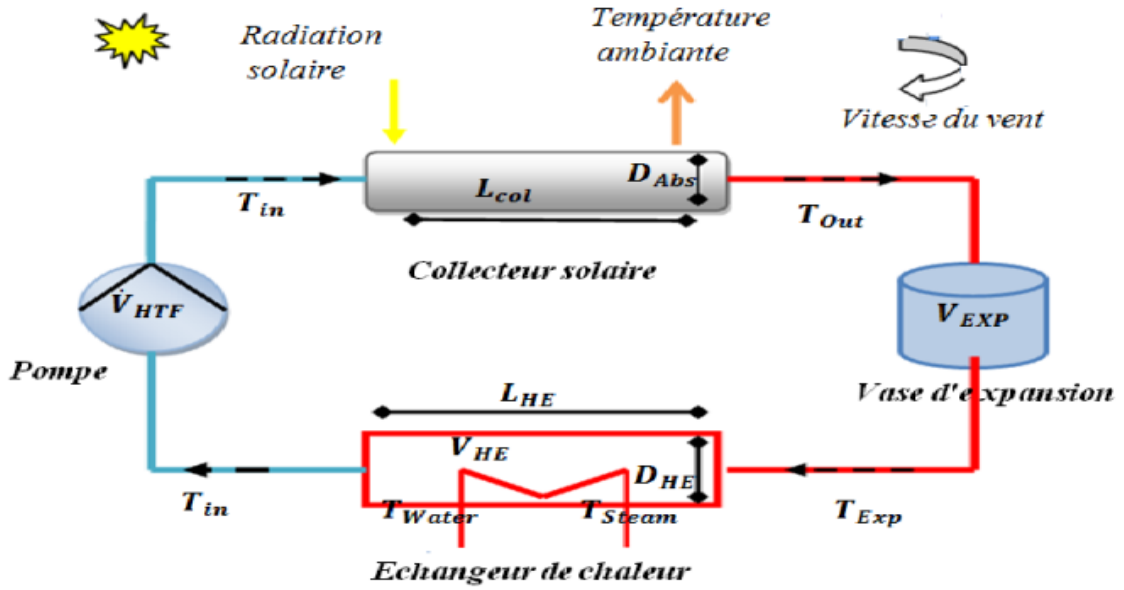


FIG. IV.1 : Architecture du modèle simplifié

### IV.2.3 Formulation Mathématique

Le modèle simplifié est basé sur des bilans énergétiques qui décrivent les variations de température dans les composants principaux du système [20][20][89]. Ce modèle est représenté par un système non linéaire de quatre équations différentielles décrivant les comportements thermiques suivants :

**1• Température du fluide en sortie du collecteur solaire :** Le bilan énergétique de la température du fluide en sortie de collecteur s'écrit comme suit :

$$\frac{dT_{Out}(t)}{dt} = -\frac{\dot{V}_{HTF}(t)}{V_{Col}} T_{Out}(t) + \frac{\dot{V}_{HTF}(t)}{V_{Col}} T_{In}(t) + \frac{L_{Col}}{\rho_{HTF} c_{HTF} V_{Col}} (q_{abs}(t) - q_{amb}(t)) \quad (IV.1)$$

Où  $V_{Col}$  : est le volume global du collecteur, donné par :

$$V_{Col} = \frac{\pi}{4} D_{ABS}^2 \times L_{Col} \quad (IV.2)$$

Et

$$L_{Col} = \text{Longueur} \times n_{Collecteurs} \quad (IV.3)$$

Le transfert de chaleur à l'environnement,  $q_{amb}$  est exprimé par la relation suivante :

$$q_{amb} = h_{amb} A_{Abs} (T_{Out}(t) - T_{amb}(t)) \quad (IV.4)$$

Considérons la condition initiale pour l'équation IV.1 est :

$$T_{Out}(0) = T_{Out,init} \quad (IV.5)$$

**2• Température dans le vase d'expansion :** La même démarche de modélisation est appliquée à la température dans la vase d'expansion. Leur bilan énergétique s'écrit comme suit :

$$\frac{dT_{\text{EXP}}(t)}{dt} = -\frac{\dot{V}_{\text{HTF}}(t)}{V_{\text{EXP}}} T_{\text{EXP}}(t) + \frac{\dot{V}_{\text{HTF}}(t)}{V_{\text{EXP}}} T_{\text{Out}}(t) \quad (\text{IV.6})$$

Avec : le volume du vase d'expansion,  $v_{\text{exp}} = 287.7 \text{ m}^3$ .

La condition initiale pour l'équation IV.6 est :

$$T_{\text{EXP}}(0) = T_{\text{EXP};\text{init}} \quad (\text{IV.7})$$

**3• Température d'entrée dans l'échangeur de chaleur :** la boucle est fermée par un bilan énergétique au niveau des trains d'échange thermique.

$$\frac{dT_{\text{in}}(t)}{dt} = -\frac{(a_A + a_B)V_{\text{HTF}}(t)}{V_{\text{HE}}} T_{\text{in}}(t) + \frac{(a_A + a_B)V_{\text{HTF}}(t)}{V_{\text{HE}}} T_{\text{EXP}}(t) - \frac{L_{\text{HE}}}{\rho_{\text{HTF}} c_{\text{HTF}} V_{\text{HE}}} q_{\text{transferred}}(t) \quad (\text{IV.8})$$

Avec  $a_A$  et  $a_B$  sont les fractions d'écoulement. Le transfert de chaleur dans l'échangeur est donné par :

$$q_{\text{transferred}}(t) = h_{\text{HE}} A_{\text{HE}} (T_h(t) - T_c(t)) \quad (\text{IV.9})$$

Où  $T_h$  est la température moyenne de la HTF dans l'échangeur de chaleur (la température du fluide chaud) :

$$T_h(t) = \frac{1}{2} (T_{\text{EXP}}(t) + T_{\text{in}}(t)) \quad (\text{IV.10})$$

Et  $T_c$  la température du fluide de travail à froid (la température moyenne) :

$$T_c(t) = \frac{1}{2} (T_{\text{Steam}}(t) + T_{\text{water}}(t)) \quad (\text{IV.11})$$

Le coefficient de transfert de chaleur,  $h_{\text{HE}}$  dépend des deux débits mesurés dans le système SEGS :

$$h_{\text{HE}}(t) = 74000 \times \left[ \frac{\dot{V}_{\text{HTF}}(t)}{\dot{V}_{\text{HTF}0}} + \frac{\dot{m}(t)}{\dot{m}_0} \right] \frac{1}{2} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1} \quad (\text{IV.12})$$

Où  $(\dot{m}(t))$  est le débit massique du fluide de travail (eau ou vapeur). Les débits de référence sont :  $(V)_{\text{HTF}0} = 0.624 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ , pour le débit volumique et  $\dot{m}_0 = 39.9 \text{ kg.s}$  pour le débit massique du fluide de travail.

La surface est déterminée à partir de :

$$A_{\text{HE}} = \pi \times D_{\text{HE}}^2 \quad (\text{IV.13})$$

Avec un diamètre supposé  $L_{\text{HE}} = 1 \text{ m}$ . Le volume de l'échangeur de chaleur,  $V_{\text{HE}}$  est calculé à partir de l'expression suivante :

$$V_{\text{HE}} = \frac{\pi}{4} D_{\text{HE}}^2 L_{\text{HE}} \quad (\text{IV.14})$$

Avec une longueur supposée de  $L_{HE} = 10m$ . La condition initiale pour l'équation IV.8 est :

$$T_{in}(0) = T_{in;init} \quad (IV.15)$$

**4• Température de la vapeur :** La température du vapeur,  $T_{steam}$  est calculée à partir d'une équation d'efficacité de l'échangeur de chaleur :

$$\varepsilon_{HE}(t) = \frac{T_{Steam}(t) - T_{Water}(t)}{T_{EXP}(t) - T_{Water}(t)}. \quad (IV.16)$$

Par analogie avec les équations IV.1, IV.6 et IV.8 la température de la vapeur est donné par l'équation différentielle suivante :

$$\frac{dT_{Steam}(t)}{dt} = 0.01 [-T_{Steam}(t) + \varepsilon_{HE}(t) (T_{EXP}(t) - T_{Water}(t)) + T_{Water}(t)] \quad (IV.17)$$

L'équation algébrique IV.16 est reformulée sous forme d'une équation différentielle IV.17 car dans ce travail, on considère uniquement les équations différentielles comme système dynamique.

Le facteur  $0,01s^{-1}$  a été introduit pour ajuster la constante du temps de cette équation différentielle de la plage des constantes de temps de l'ensemble du système, afin d'éviter un système différentiel raide. L'efficacité d'échangeur de chaleur est supposé dépendre des débits.

$$\varepsilon_{HE}(t) = -0.1 \left[ \frac{\dot{V}_{HTF}(t)}{\dot{V}_{HTF0}} + \frac{\dot{m}(t)}{\dot{m}_0} \right] / 2 + 1.025 \quad (IV.18)$$

Leur condition initiale est :

$$T_{Steam}(0) = T_{steam;init} \quad (IV.19)$$

## IV.2.4 Synthèse des Hypothèses

Pour simplifier l'analyse et réduire la complexité associée aux non-linéarités dans les équations différentielles du système *SEGS*, une reformulation sous forme de modèle quasi-*LPV* est envisagée. Cette transformation permet de représenter le comportement dynamique du système de manière plus structurée, en tenant compte de paramètres variant dans le temps. Elle offre une base adaptée pour appliquer des techniques avancées d'estimation et de diagnostic, comme celles présentées dans ce mémoire.

### Adaptation au Modèle Quasi-*LPV*

Pour vérifier si le modèle simplifié est compatible avec la structure quasi-*LPV*, les équations différentielles décrivant les phénomènes thermiques du système sont revisitées en introduisant certaines approximations et hypothèses.

**Hypothèse -1 : Collecteur solaire** La dynamique thermique du collecteur est définie par une constante de temps,  $\tau_{col}$ , qui dépend du débit volumique du fluide caloporteur  $V_{HTF}$  et du volume total du collecteur  $V_{col}$  :

$$\frac{1}{\tau_{col}(t)} = \frac{\dot{V}_{HTF}(t)}{V_{col}} \quad (IV.20)$$

La zone de coupe transversale du collecteur est  $A_{Col}$ . Un coefficient de transfert de chaleur global de la zone produit  $UA_{Col}$ , est défini comme :

$$UA_{Col} = h_{amb}A_{ABS} \quad (IV.21)$$

Avec ces définitions, l'équation différentielle de la température de sortie de capteur IV.1 peut désormais s'écrire comme suit :

$$\frac{dT_{Out}(t)}{dt} = \frac{1}{\tau_{col}(t)} (T_{in}(t) - T_{Out}(t)) + \frac{q_{abs}(t) - UA_{Col}(T_{Out}(t) - T_{amb}(t))}{A_{Col}\rho_{HTF}(T_{Out}(t))c_{HTF}(T_{Out}(t))} \quad (IV.22)$$

**Hypothèse -2 : Vase d'expansion** La dynamique thermique du vase d'expansion est caractérisée par une constante de temps,  $\tau_{EXP}$ , définie par :

$$\frac{1}{\tau_{EXP}(t)} = \frac{\dot{V}_{HTF}(t)}{V_{EXP}} \quad (IV.23)$$

Ainsi, l'équation différentielle de la température du vase d'expansion IV.6 devient :

$$\frac{dT_{EXP}(t)}{dt} = \frac{1}{\tau_{EXP}(t)} (T_{Out}(t) - T_{EXP}(t)) \quad (IV.24)$$

**Hypothèse -3 : Échangeur de chaleur** Pour l'échangeur de chaleur, la constante de temps,  $\tau_{HE}$ , est définie en fonction des fractions d'écoulement ( $a_A, a_B$ ) et du débit volumique du fluide :

$$\frac{1}{\tau_{HE}(t)} = \frac{(a_A + a_B)\dot{V}_{HTF}(t)}{V_{HE}} \quad (IV.25)$$

**Hypothèse -4 :** La surface de section transversale de l'échangeur de chaleur est  $A_{HE}$  et le coefficient de transfert  $UA_{HE}$ , est défini comme suit :

$$UA_{HE}(t) = h_{HE}(t)A_{HE} \quad (IV.26)$$

Avec ces définitions, l'équation différentielle de la température d'entrée de collecteur IV.8 s'écrit comme suit :

$$\frac{dT_{in}(t)}{dt} = \frac{1}{\tau_{HE}(t)} (T_{EXP}(t) - T_{in}(t)) - \frac{UA_{HE}(T_{EXP}(t) + T_{in}(t) - T_{Steam}(t) - T_{Water}(t))}{2A_{HE}\rho_{HTF}(T_{in}(t))c_{HTF}(T_{in}(t))} \quad (IV.27)$$

On rappelle que, l'équation différentielle de la température de sortie de la vapeur d'échangeur de chaleur IV.17 est :

$$\frac{dT_{Steam}(t)}{dt} = 0.01 [-T_{Steam}(t) + \varepsilon_{HE}(t)(T_{EXP}(t) - T_{Water}(t)) + T_{Water}(t)] \quad (IV.28)$$

Où l'efficacité de l'échangeur  $\varepsilon_{HE}$  dépend des débits de fluide.

### Représentation en espace d'état

Les analyses qui suivent sont basées sur les quatre équations différentielles principales : [IV.22](#), [IV.24](#), [IV.27](#) et [IV.28](#). Afin d'organiser ces équations dans un format plus structuré, elles sont reformulées sous une forme matricielle. Cette approche repose sur la définition de vecteurs d'état et d'entrée, permettant de représenter de manière compacte les relations dynamiques du système.

En adoptant cette représentation, il devient possible d'analyser le comportement du système *SEGS* dans un cadre formel et de le préparer à des traitements ultérieurs

le vecteur d'état suivant est introduit :

$$x(t) = \begin{bmatrix} T_{\text{out}}(t) \\ T_{\text{EXP}}(t) \\ T_{\text{in}}(t) \\ T_{\text{steam}}(t) \end{bmatrix} \quad (\text{IV.29})$$

Le vecteur d'entrée est défini comme :

$$\begin{aligned} u(t) &= \dot{V}_{\text{HTF}}(t) \\ d(t) &= [q_{\text{abs}} T_{\text{amb}} \dot{m}_{\text{HTF}} T_{\text{water}}]^T \end{aligned} \quad (\text{IV.30})$$

À partir de la définition des vecteurs d'état et d'entrée, il apparaît clairement que les équations différentielles décrivant le système, à savoir [IV.22](#), [IV.24](#), [IV.27](#) et [IV.28](#), sont intrinsèquement non linéaires. Cette non-linéarité découle notamment de la dépendance temporelle des constantes de temps, telles que  $(1/\tau_{\text{Col}})$ , qui interviennent sous forme de produits avec les températures d'entrée  $T_{\text{in}}$  et de sortie  $T_{\text{out}}$  du fluide caloporteur (*HTF*).

En conséquence, une matrice invariante dans le temps  $A$ , comme celle utilisée dans les systèmes linéaires invariants, ne peut être définie. De plus, le système ne correspond pas non plus à un modèle d'état linéaire variant dans le temps, car des termes non linéaires supplémentaires apparaissent, tels que la densité et la capacité thermique du *HTF*. Ces derniers dépendent directement de la température et interviennent dans les équations sous forme de fractions où la température se trouve simultanément au numérateur et au dénominateur, comme illustré dans les équations [IV.22](#) et [IV.24](#).

Ainsi, le modèle simplifié du système *SEGS* prend une forme générale non linéaire qui peut être exprimée par l'équation :

$$\dot{x}(t) = f[x(t), u(t), t] \quad (\text{IV.31})$$

Où  $f$  est une fonction non linéaire. Cette forme met en évidence la complexité inhérente du modèle et justifie la nécessité de reformuler le système sous un cadre plus structuré, tel que le multimodèle  $T - S$ , afin de permettre une analyse et un diagnostic efficaces.

### IV.3 Obtention d'un système $T - S$ pour le modèle *SEGS*

Le modèle *SEGS*, comme présenté précédemment, est non linéaire en raison de la variabilité des propriétés thermiques du fluide caloporteur et des conditions de fonctionnement du système. Pour faciliter son analyse et son contrôle, une approche multimodèle *Takagi - Sugeno* ( $T - S$ ) est utilisée. Cette méthode décompose le système non linéaire en plusieurs sous-modèles linéaires locaux, chaque sous-modèle représentant une région d'opération spécifique du système.

Le modèle suivant du *SEGS* est considéré :

$$\begin{bmatrix} \frac{dT_{\text{out}}(t)}{dt} \\ \frac{dT_{\text{EXP}}(t)}{dt} \\ \frac{dT_{\text{in}}(t)}{dt} \\ \frac{dT_{\text{Steam}}(t)}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\dot{V}_{\text{HTF}}(t)}{V_{\text{col}}} (T_{\text{in}}(t) - T_{\text{out}}(t)) + \frac{q_{\text{abs}} - UA_{\text{col}}(T_{\text{out}}(t) - T_{\text{amb}}(t))}{A_{\text{col}}\rho_{\text{HTF}}(T_{\text{out}}(t))c_{\text{HTF}}(T_{\text{out}}(t))} \\ \frac{\dot{V}_{\text{HTF}}(t)}{V_{\text{EXP}}} (T_{\text{out}}(t) - T_{\text{EXP}}(t)) \\ \frac{(a_A + a_B)\dot{V}_{\text{HTF}}(t)}{V_{\text{HE}}} (T_{\text{EXP}}(t) - T_{\text{in}}(t)) + \frac{UA_{\text{HE}}(T_{\text{EXP}}(t) + T_{\text{in}}(t) - T_{\text{steam}}(t) - T_{\text{water}}(t))}{A_{\text{col}}\rho_{\text{HTF}}(T_{\text{out}}(t))c_{\text{HTF}}(T_{\text{out}}(t))} \\ 0.01 (-T_{\text{steam}}(t) - \epsilon_{\text{HE}}(t)(T_{\text{EXP}}(t) - T_{\text{water}}(t)) - T_{\text{water}}(t)) \end{bmatrix} \quad (\text{IV.32})$$

L'objectif principal est de reformuler le modèle *SEGS* IV.32 en utilisant une représentation quasi-*LPV* dans le cadre du formalisme *Takagi - Sugeno*. Cette reformulation vise à simplifier les dynamiques du système, rendant ainsi son comportement plus accessible à des techniques avancées de diagnostic et de contrôle, telles que la conception d'observateurs robustes.

En suivant l'approche par secteurs non linéaires, la première étape consiste à reformuler le modèle IV.32 sous une forme quasi-*LPV*, définie par :

$$\begin{bmatrix} \dot{T}_{\text{out}}(t) \\ \dot{T}_{\text{EXP}}(t) \\ \dot{T}_{\text{in}}(t) \\ \dot{T}_{\text{Steam}}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\dot{V}(t)}{V_{\text{col}}} + \frac{U_{\text{col}}}{\rho(T)C(T)} & 0 & \frac{\dot{V}(t)}{V_{\text{col}}} & 0 \\ \frac{\dot{V}(t)}{V_{\text{EXP}}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{k_2\dot{V}(t)}{\rho(T)C(T)} & -k\dot{V}(t) + \frac{k_2}{\rho(T)C(T)} & -\frac{k_2}{\rho(T)C(T)} \\ 0 & 0.01025 & 0 & -0.01 \end{bmatrix} \quad (\text{IV.33})$$

$$\begin{bmatrix} T_{\text{out}}(t) \\ T_{\text{EXP}}(t) \\ T_{\text{in}}(t) \\ T_{\text{Steam}}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{T_{\text{EXP}}}{V_{\text{EXP}}} \\ \frac{k_3 T_{\text{EXP}}}{V_{\text{EXP}}} \\ 0.0005 k_4 T_{\text{EXP}} \end{bmatrix} \dot{V}(t)$$

Les variables de prémisses sont les paramètres qui influencent fortement les comportements dynamiques du système. Pour le modèle *SEGS*, trois variables principales sont identifiées :

$$\begin{aligned} \xi_1(U(t)) &= \dot{V}(t) \\ \xi_2(x(t)) &= \frac{1}{\rho_{\text{HTF}}(T) c_{\text{HTF}}(T)} \\ \xi_3(x(t)) &= T_{\text{EXP}}(t) \end{aligned} \quad (\text{IV.34})$$

Ces variables introduisent les non-linéarités à travers leurs dépendances dynamiques.

**Remarque :**

Les propriétés du fluide caloporteur, telles que sa densité  $\rho_{HTF}$  et sa capacité thermique spécifique  $c_{HTF}$ , dépendent de la température. Ces propriétés thermophysiques peuvent être modélisées par des lois de type exponentiel exponentielle, avec des corrélations spécifiques pour la densité et la chaleur spécifique [90], qui s'expriment comme suit comme suit :

$$C_f = 1820 - 3.478T_f \quad \rho_f = 903 - 0.672T_f \quad (IV.35)$$

Ces relations permettent de prendre en compte l'effet de la température sur le comportement du fluide caloporteur au sein du le système.

Le système IV.33 peut être écrit sous la forme :

$$\dot{x}(t) = A(x(t), U(t))x(t) + B_m(x(t), U(t))U(t) + B_d(x(t), U(t))d(t) + R(u(t), \bar{d}(t)) \quad (IV.36)$$

Où les matrices,  $A(x(t), U(t))$ ,  $B(x(t), U(t))$  et  $B_d(x(t), U(t))$ ,  $R(u(t))$  sont exprimées en fonction des les variables de prémisses définies précédemment IV.34 :

$$A(\xi(x(t), u(t))) = \begin{bmatrix} \frac{\xi_1(u(t))}{V_{col}} + \frac{U_{col}}{\xi_2(x(t))} & 0 & 0 & 0 \\ \xi_1(u(t)) & 0 & 0 & 0 \\ \frac{V_{col}}{\xi_1(u(t))} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{k_2 \xi_1(u(t))}{\xi_2(x(t))} - k \xi_1(u(t)) + \frac{k_2}{\xi_2(x(t))} & -\frac{k_2}{\xi_2(x(t))} & 0.01025 & -0.01 \end{bmatrix} \quad (IV.37)$$

$$B_m(\xi(x(t))) = \begin{bmatrix} 0 \\ -\xi_3(x(t)) \\ \frac{V_{EXP}}{k \xi_3(x(t))} \\ \frac{V_{EXP}}{0.0005 k_4 \xi_3(x(t))} \end{bmatrix} \quad (IV.38)$$

$$B_d(\xi(x(t), u(t))) = \begin{bmatrix} \frac{1}{A_{col} \xi_2(x(t))} & \frac{U_{col}}{A_{col} \xi_2(x(t))} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{k_3 \xi_1(u(t))}{2 \xi_2(x(t))} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{-k_2}{2 \xi_2(x(t))} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.0005 k_5 \xi_3(x(t)) & 0.0005 k_4 \xi_1(x(t)) + 0.1025 & 0 \end{bmatrix} \quad (IV.39)$$

$$k = \frac{a_A + b_B}{V_{HE}} \quad \text{with} \quad a_A = b_B = 0.4375$$

$$k_2 = \frac{3700}{U_{m_0}}, k_3 = \frac{3700}{U_{3_0}}, k_4 = \frac{0.05}{V_0}, k_5 = \frac{0.05}{U_{3_0}}$$

Chaque variable de prémisses  $\xi_1$  est divisée en deux régions :

- Une région associée à sa valeur minimale  $\xi_i^{min}$ .
- Une région associée à sa valeur maximale  $\xi_i^{max}$ .

Avec trois variables de prémisses et deux partitions par variable, le modèle est décomposé en  $2^3 = 8$  sous-modèles linéaires locaux.

La décomposition des trois variables de prémisses IV.34 est réalisée en utilisant la méthode des secteurs non linéaires détaillée dans le deuxième chapitre, Sous les hypothèses :

$$\begin{cases} \xi_1^{\min} \leq \xi_1(u(t)) \leq \xi_1^{\max} \\ \xi_2^{\min} \leq \xi_2(x(t)) \leq \xi_2^{\max} \\ \xi_3^{\min} \leq \xi_3(x(t)) \leq \xi_3^{\max} \end{cases} \quad (\text{IV.40})$$

Pour chaque variable de prémisses, une partition en deux zones est ensuite réalisée, ce qui permet d'exprimer ces variables sous forme pondérée, comme suit :

$$\begin{cases} \xi_1(t) = w_1^1(\xi) \xi_1^{\max} + w_1^2(\xi) \xi_1^{\min} \\ \xi_2(t) = w_2^1(\xi) \xi_2^{\max} + w_2^2(\xi) \xi_2^{\min} \\ \xi_3(t) = w_3^1(\xi) \xi_3^{\max} + w_3^2(\xi) \xi_3^{\min} \end{cases} \quad (\text{IV.41})$$

Ces expressions permettent de représenter chaque variable en fonction de poids de pondération locaux  $w_i^j(\xi)$ , qui dépendent de la position instantanée des variables de prémisses dans leur intervalle de variation.

Les fonctions de pondération locales  $w_i^j(\xi)$ , définies pour  $i : 1, 3$  et  $j : 1, 2$  permettent de moduler les contributions des différentes régions dans lesquelles les variables de prémisses  $\xi_1, \xi_2, \xi_3$  sont partitionnées. Ces fonctions sont calculées selon les relations suivantes :

$$\begin{aligned} w_1^1(\xi) &= \frac{\xi_1^{\max} - \xi_1(u(t))}{\xi_1^{\max} - \xi_1^{\min}}, & w_1^2(\xi) &= \frac{\xi_1(u(t)) - \xi_1^{\min}}{\xi_1^{\max} - \xi_1^{\min}} \\ w_2^1(\xi) &= \frac{\xi_2^{\max} - \xi_2(x(t))}{\xi_2^{\max} - \xi_2^{\min}}, & w_2^2(\xi) &= \frac{\xi_2(x(t)) - \xi_2^{\min}}{\xi_2^{\max} - \xi_2^{\min}} \\ w_3^1(\xi) &= \frac{\xi_3^{\max} - \xi_3(x(t))}{\xi_3^{\max} - \xi_3^{\min}}, & w_3^2(\xi) &= \frac{\xi_3(x(t)) - \xi_3^{\min}}{\xi_3^{\max} - \xi_3^{\min}} \end{aligned} \quad (\text{IV.42})$$

Il est important de noter que la variable de prémisses  $\xi_1$  (respectivement  $\xi_2, \xi_3$ ) n'intervient que dans la matrice d'état  $A$  (respectivement matrice de commande  $B$ ). Ce qui permet de déterminer les matrices  $A_i$  et  $B_i$ .

Le tableau IV.1 présente le partitionnement des variables de prémisses pour un modèle  $T - S$  comportant trois variables de prémisses et deux partitions pour chacune. Il est utilisé pour le calcul des fonctions d'activation.

Finalement, on obtient les matrices suivantes :

TAB. IV.1 : Tableau des modèles locaux (partitionnement des variables de prémisses).

Modèle	$\xi_1 \xi_2 \xi_3$	Matrices	Fonctions de pondération
1	$\xi_1^{\max} \xi_2^{\max} \xi_3^{\max}$	$A_1 B_1 C$	$\mu_1 = w_1^1 w_2^1 w_3^1$
2	$\xi_1^{\max} \xi_2^{\max} \xi_3^{\min}$	$A_2 B_2 C$	$\mu_2 = w_1^1 w_2^1 w_3^2$
3	$\xi_1^{\max} \xi_2^{\min} \xi_3^{\max}$	$A_3 B_3 C$	$\mu_3 = w_1^1 w_2^2 w_3^1$
4	$\xi_1^{\max} \xi_2^{\min} \xi_3^{\min}$	$A_4 B_4 C$	$\mu_4 = w_1^1 w_2^2 w_3^2$
5	$\xi_1^{\min} \xi_2^{\max} \xi_3^{\max}$	$A_5 B_5 C$	$\mu_5 = w_1^2 w_2^1 w_3^1$
6	$\xi_1^{\min} \xi_2^{\max} \xi_3^{\min}$	$A_6 B_6 C$	$\mu_6 = w_1^2 w_2^1 w_3^2$
7	$\xi_1^{\min} \xi_2^{\min} \xi_3^{\max}$	$A_7 B_7 C$	$\mu_7 = w_1^2 w_2^2 w_3^1$
8	$\xi_1^{\min} \xi_2^{\min} \xi_3^{\min}$	$A_8 B_8 C$	$\mu_8 = w_1^2 w_2^2 w_3^2$

$$\begin{aligned}
 A(\xi_1, \xi_2) = & \mu_1 A_1(\xi_1^{\max}, \xi_2^{\max}) + \mu_2 A_2(\xi_1^{\max}, \xi_2^{\max}) + \mu_3 A_3(\xi_1^{\max}, \xi_2^{\min}) + \mu_4 A_4(\xi_1^{\max}, \xi_2^{\min}) \\
 & + \mu_5 A_5(\xi_1^{\min}, \xi_2^{\max}) + \mu_6 A_6(\xi_1^{\min}, \xi_2^{\max}) + \mu_7 A_7(\xi_1^{\min}, \xi_2^{\min}) + \mu_8 A_8(\xi_1^{\min}, \xi_2^{\min})
 \end{aligned} \tag{IV.43}$$

De même, pour la matrice de commande  $B(\xi_3)$  :

$$\begin{aligned}
 B_m(\xi_3) = & \mu_1 B_{m1}(\xi_3^{\max}) + \mu_2 B_{m2}(\xi_3^{\min}) + \mu_3 B_{m3}(\xi_3^{\max}) + \mu_4 B_{m4}(\xi_3^{\min}) \\
 & + \mu_5 B_{m5}(\xi_3^{\max}) + \mu_6 B_{m6}(\xi_3^{\min}) + \mu_7 B_{m7}(\xi_3^{\min}) + \mu_8 B_{m8}(\xi_3^{\min})
 \end{aligned} \tag{IV.44}$$

Et

$$\begin{aligned}
 B_d(\xi_1, \xi_2, \xi_3) = & \mu_1 B_{d1}(\xi_1^{\max}, \xi_2^{\max}, \xi_3^{\max}) + \mu_2 B_{d2}(\xi_1^{\max}, \xi_2^{\max}, \xi_3^{\min}) + \mu_3 B_{d3}(\xi_1^{\max}, \xi_2^{\min}, \xi_3^{\max}) \\
 & + \mu_4 B_{d4}(\xi_1^{\max}, \xi_2^{\min}, \xi_3^{\min}) + \mu_5 B_{d5}(\xi_1^{\min}, \xi_2^{\max}, \xi_3^{\max}) + \mu_6 B_{d6}(\xi_1^{\min}, \xi_2^{\max}, \xi_3^{\min}) \\
 & + \mu_7 B_{d7}(\xi_1^{\min}, \xi_2^{\min}, \xi_3^{\max}) + \mu_8 B_{d8}(\xi_1^{\min}, \xi_2^{\min}, \xi_3^{\min})
 \end{aligned} \tag{IV.45}$$

Nous obtenons alors :

$$\begin{aligned}
 A(\xi_1, \xi_2) &= \sum_{i=1}^8 \mu_i(t) A_i \\
 B_m(\xi_3) &= \sum_{i=1}^8 \mu_i(t) B_{mi} \\
 B_d(\xi_2) &= \sum_{i=1}^8 \mu_i(t) B_{di}
 \end{aligned} \tag{IV.46}$$

Les matrices constantes sont données par :

$$A_{(i=1,2)} = \begin{pmatrix} \frac{\xi_1^{\max}}{V_{\text{col}}} + \frac{U_{\text{col}}}{\xi_2^{\max}} & 0 & \frac{\xi_1^{\max}}{V_{\text{col}}} & 0 \\ \frac{\xi_1^{\max}}{V_{\text{EXP}}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{k_2 \xi_1^{\max}}{\xi_2^{\max}} - k \xi_1^{\max} + \frac{k_2}{\xi_2^{\max}} & -\frac{k_2}{\xi_2^{\max}} & 0 \\ 0 & 0.01025 & 0 & -0.01 \end{pmatrix} \quad (\text{IV.47})$$

$$A_{(i=3,4)} = \begin{pmatrix} \frac{\xi_1^{\max}}{V_{\text{col}}} + \frac{U_{\text{col}}}{\xi_2^{\max}} & 0 & \frac{\xi_1^{\max}}{V_{\text{col}}} & 0 \\ \frac{\xi_1^{\max}}{V_{\text{EXP}}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{k_2 \xi_1^{\max}}{\xi_2^{\min}} - k \xi_1^{\max} + \frac{k_2}{\xi_2^{\min}} & -\frac{k_2}{\xi_2^{\min}} & 0 \\ 0 & 0.01025 & 0 & -0.01 \end{pmatrix} \quad (\text{IV.48})$$

$$A_{(i=5,6)} = \begin{pmatrix} \frac{\xi_1^{\min}}{V_{\text{col}}} + \frac{U_{\text{col}}}{\xi_2^{\max}} & 0 & \frac{\xi_1^{\min}}{V_{\text{col}}} & 0 \\ \frac{\xi_1^{\min}}{V_{\text{EXP}}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{k_2 \xi_1^{\min}}{\xi_2^{\max}} - k \xi_1^{\min} + \frac{k_2}{\xi_2^{\max}} & -\frac{k_2}{\xi_2^{\max}} & 0 \\ 0 & 0.01025 & 0 & -0.01 \end{pmatrix} \quad (\text{IV.49})$$

$$A_{(i=7,8)} = \begin{pmatrix} \frac{\xi_1^{\min}}{V_{\text{col}}} + \frac{U_{\text{col}}}{\xi_2^{\min}} & 0 & \frac{\xi_1^{\min}}{V_{\text{col}}} & 0 \\ \frac{\xi_1^{\min}}{V_{\text{EXP}}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{k_2 \xi_1^{\min}}{\xi_2^{\min}} - k \xi_1^{\min} + \frac{k_2}{\xi_2^{\min}} & -\frac{k_2}{\xi_2^{\min}} & 0 \\ 0 & 0.01025 & 0 & -0.01 \end{pmatrix} \quad (\text{IV.50})$$

$$B_m^1 = B_m^3 = B_m^5 = B_m^7 = \begin{pmatrix} 0 \\ -\frac{\xi_3^{\max}}{V_{\text{EXP}}} \\ \frac{k \xi_3^{\max}}{V_{\text{EXP}}} \\ 0.0005 k_4 \xi_3^{\max} \end{pmatrix} \quad (\text{IV.51})$$

$$B_m^2 = B_m^4 = B_m^6 = B_m^8 = \begin{pmatrix} 0 \\ -\frac{\xi_3^{\min}}{V_{\text{EXP}}} \\ \frac{k \xi_3^{\min}}{V_{\text{EXP}}} \\ 0.0005 k_4 \xi_3^{\min} \end{pmatrix} \quad (\text{IV.52})$$

Finalemnt, Le modèle non linéaire IV.32 est écrit de façon équivalente sous une forme Takagi – Sugeno :

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= \sum_{i=1}^8 \mu_i(x(t), u(t)) \left( A_i x(t) + B_{m,i} u_m(t) + B_{d,i} u_d(t) \right), \\ y &= c x(t) \end{aligned} \quad (\text{IV.53})$$

Avec :

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{IV.54})$$

## IV.4 Modélisation du système *SEGS* en présence des défauts capteurs

Les centrales solaires thermiques, comme tout système dynamique, sont sujettes à divers défauts, pannes, et dégradations au fil du temps. Ces défauts peuvent provenir de multiples sources : capteurs, actionneurs ou encore des composants structurels du système [83, 84].

À ce jour, aucune étude exhaustive n'a été publiée pour permettant de recenser et d'analyser l'ensemble des défauts susceptibles d'affecter une centrale solaire cylindro-parabolique (*SEGS*). Une telle analyse devrait inclure :

- Une classification des dysfonctionnements,
- Une estimation de leur fréquence d'occurrence,
- Une évaluation de leur gravité sur les performances du système.

Ces informations permettraient de prioriser les efforts de diagnostic et de maintenance, en ciblant les défauts les plus critiques à détecter et à diagnostiquer. Les principaux défauts susceptibles d'affecter une centrale *SEGS* [85] sont répertoriés et classés dans le Tableau IV.2 selon leur nature et leur localisation :

### IV.4.1 Application de l'approche de détection des défauts à base de *FSMO*

Dans cette section, nous mettons en uvre l'approche *FSMO* (Multi Observateur à Mode Glissant) pour la détection et la reconstruction des défauts affectant les capteurs et les actionneurs du système *SEGS*. Cette méthode est appliquée en tenant compte des entrées inconnues ainsi que des bruits qui perturbent le système.

Des défauts sont injectés, au cours du temps, exprimé en heurs  $[h]$ , sur les sorties de la centrale IV.32 de la manière suivante :

$$\begin{aligned} \dot{x}_f(t) &= \sum_{i=1}^8 \mu_i(x(t), u(t)) \left( A_i x_f(t) + B_{m,i} u_m(t) + E_i f(t) + R_i u_d(t) \right), \\ y &= c x(t) + D f(t) \end{aligned} \quad (IV.55)$$

Ou :

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (IV.56)$$

$$[f_1 f_2]^T \quad \text{et} \quad D = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (IV.57)$$

TAB. IV.2 : Modes de Défaillances d'une SEGS

Catégorie	Type de défaut	Description
Défauts des capteurs	Drift des capteurs	Mesures inexactes en raison d'une dérive progressive.
	Panne totale	Absence de signal ou défaillance complète des capteurs.
	Saturation	Fonctionnement hors plage de mesure des capteurs.
Défauts des actionneurs	Blocage mécanique	Actionneurs (pompes, vannes) ne répondent pas.
	Usure ou détérioration	Perte d'efficacité des composants mécaniques ou électromécaniques.
	Signal dégradé	Commandes incorrectes dues à des anomalies dans la réponse de l'actionneur.
Défauts dans le champ solaire	Fuites	Perte de fluide dans les circuits, diminuant la performance thermique.
	Contamination	Altération des propriétés thermophysiques du fluide.
	Surchauffe	Température excessive provoquant des problèmes de fonctionnement.
Défauts de l'échangeur de chaleur	Encrassement	Diminution de l'efficacité d'échange thermique en raison de dépôts internes.
	Fuites internes	Mélange des fluides (caloporteur et eau/vapeur).
	Dégradation structurelle	Perte de capacité thermique ou défaillance mécanique.
Défauts du système global	Défaillance de contrôle	Problèmes liés aux algorithmes ou systèmes de commande.
	Interruption de l'alimentation électrique	Perturbations dans les composants électromécaniques.
	Problèmes de synchronisation	Déséquilibre dans les processus dynamiques entraînant des inefficacités.

#### IV.4.2 Résultat et simulation

##### Synthèse et analyse de l'estimation des entrées inconnues

L'évaluation des performances de notre stratégie de diagnostic passe impérativement par la validation de l'estimation des entrées inconnues  $u$ , représentant les perturbations exogènes non mesurées du champ solaire. Comme l'illustrent les résultats de simulation (Figure.IV.2), le multi-observateur à mode glissant parvient à reconstruire avec une grande fidélité un signal de perturbation présentant de fortes dynamiques et des variations erratiques sur un cycle de 22 heures. Cette précision de suivi témoigne de l'efficacité de la loi de

commutation et du calcul du contrôle équivalent, qui "absorbe" l'effet de l'entrée inconnue pour la rendre observable.

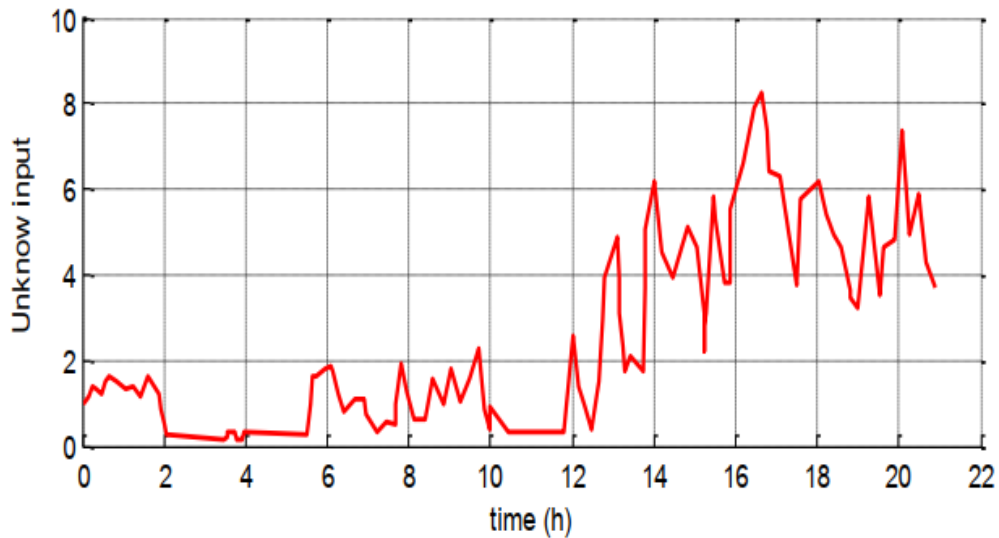


FIG. IV.2 : Estimation d'entrées inconnue  $\bar{u}(t)$

Plus remarquable encore, l'analyse de l'estimation d'état (Figure IV.3) montre que les quatre variables de température ( $T_{out}$ ,  $T_{in}$ ,  $T_{steam}$ ,  $T_{exp}$ ) sont estimées avec une erreur quasi nulle, et ce, malgré l'influence directe de ces entrées inconnues fluctuantes. Ce résultat confirme le découplage efficace obtenu grâce à la forme canonique d'Edwards et Spurgeon. En isolant les perturbations dans un sous-espace spécifique, le multi-observateur garantit une invariance totale des états estimés vis-à-vis des incertitudes. Cette double performance reconstruction fidèle de la perturbation et maintien de la précision de des états valide la robustesse de notre approche *Takagi – Sugeno* pour le monitoring fiable et le diagnostic prédictif des centrales *SEGS* dans des conditions environnementales instables.

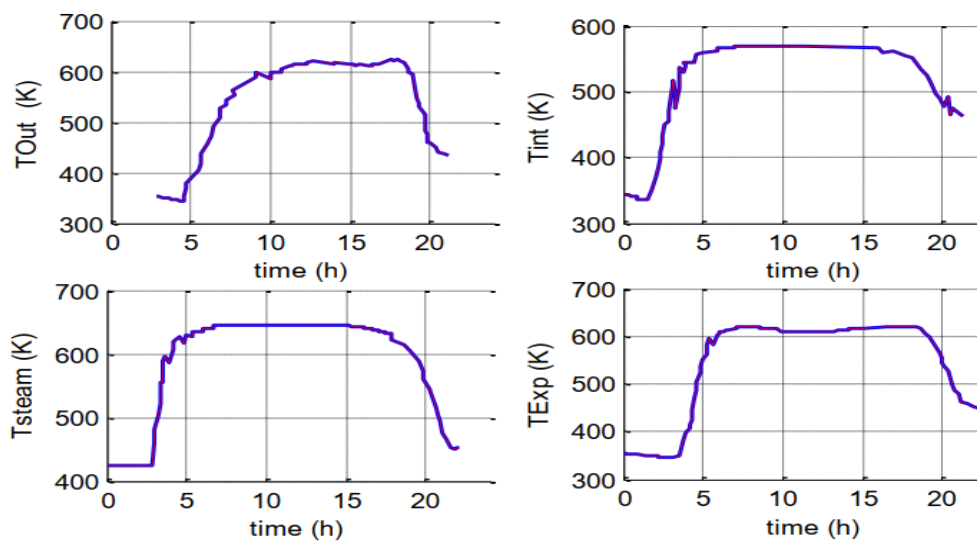


FIG. IV.3 : Les états du système(*SEGS*) et sont estimé

## Synthèse de la procédure d'estimation des défauts de capteurs

L'application du multi-observateur à mode glissant pour l'estimation des défauts de capteurs dans la centrale *SEGS* suit une démarche rigoureuse en cinq étapes :

**Étape 1 : Augmentation du modèle d'État** Afin de transformer un défaut de capteur ( $f_s$ ) en une "entrée inconnue" exploitable par la structure d'Edwards et Spurgeon, la sortie mesurée  $y$  est passée à travers un filtre passe-bas stable. On définit un nouvel état étendu  $x_f$  dont la dynamique est donnée par :

$$\dot{x}_f(t) = -A_f x_f + A_f (Cx + f_s) \quad (\text{IV.58})$$

Le système résultant combine la dynamique thermique du champ solaire et celle du filtre, de manière à faire apparaître le défaut  $f_s$  directement dans l'équation d'évolution d'état.

**Étape 2 : Transformation Canonique de Structure** Dans le but d'isoler les composantes affectées par le défaut, un changement de coordonnées est appliqué au système augmenté. Cette transformation permet de partitionner l'espace d'état en :

1. Une sous-dynamique découplée des défauts, garantissant la stabilité interne.
2. Une sous-dynamique sensible aux défauts, utilisée pour la définition de la surface de glissement.

**Étape 3 : Conception du Multi-Observateur Takagi-Sugeno** L'observateur global est construit par l'interpolation de  $M$  observateurs locaux. Pour chaque sous-modèle  $i$ , un gain linéaire  $G_i$  est calculé par résolution d'Inégalités Matricielles Linéaires (*LMI*) afin de garantir une matrice d'erreur  $(A_i - G_i C)$  stable ainsi que l'existence d'une matrice de *Lyapunov*  $P$  commune à tous les modèles, assurant la stabilité lors des variations du point de fonctionnement (débit, irradiation).

**Étape 4 : Injection de la Loi de Commutation (Mode Glissant)** Un terme correctif non-linéaire  $v_i$  est injecté pour forcer l'erreur d'estimation à converger vers la surface de glissement en temps fini. Afin d'atténuer le phénomène de chattering (oscillations hautes fréquences) préjudiciable à l'analyse, une couche limite est introduite via une fonction de saturation ou une approximation sigmoïde :

$$v_i = \frac{e_y}{|e_y| + \delta} \quad (\text{IV.59})$$

**Étape 5 : Reconstruction et Filtrage du Défaut** Une fois le régime de glissement établi ( $e_y \simeq 0$ ), l'effet du défaut de capteur est compensé par le signal de commutation. L'estimation finale  $\hat{f}_s(t)$  est obtenue en extrayant la composante basse fréquence du signal de commande équivalent :

$$\hat{f}_s(t) = \sum_{i=1}^N \mu_i(\xi(t)) \text{LPF}(v_i(t)) \quad (\text{IV.60})$$

### a-Structure des observateurs

Chaque observateur est conçu pour surveiller une seule sortie du système :

**Observateur-1** : Surveille  $y_1 = T_{out}$  (température de sortie du collecteur).

**Observateur-2** : Surveille  $y_2 = T_{Exp}$  (température du vase d'expansion).

**Observateur-3** : Surveille  $y_3 = T_{steam}$  (température de vapeur de l'échangeur).

### b-Génération des résidus

Chaque observateur génère un résidu  $r_i$ , où :

- $r_1 = \hat{f}_1$  correspond au défaut affectant la sortie  $T_{out}$ .
- $r_2 = \hat{f}_2$  correspond au défaut affectant  $T_{Exp}$ .
- $r_3 = \hat{f}_3$  correspond au défaut affectant  $T_{steam}$ .

Dans la table des signatures, un 1 indique que le défaut  $f_i$  affecte le résidu  $r_{ij}$ , tandis qu'un "0" signifie que le résidu est insensible à ce défaut. Cette structure permet d'identifier précisément relations entre les défauts et les résidus, et donc de déterminer quels défauts influencent quelles sorties du système.

Les résidus sont conçus de manière à être sensibles uniquement aux défauts associés à leur sortie respective et insensibles aux autres, ce qui permet une isolation précise des défauts.

TAB. IV.3 : Table de signatures théoriques pour les défauts capteurs

Défauts	$f_1$	$f_2$	$f_3$	Remarques
$r_1$	1	0	0	$f_1 : T_{OUT}$
$r_2$	0	1	0	$f_2 : T_{EXP}$
$r_3$	0	0	1	$f_3 : T_{steam}$

### c-Reconstruction des sorties et estimation des défauts

L'**Observateur-1** reconstruit la sortie du multi-modèle en utilisant exclusivement la sortie  $y_1 : T_{OUT}$ . Si cette sortie est affectée par un défaut, celui-ci sera directement estimé et identifié comme le défaut  $f_1$ . Ainsi, lorsque le résidu  $r_1$  s'écarte de zéro, on peut conclure avec certitude qu'un défaut est survenu sur la première sortie.

De son côté, l'**Observateur-2** exploite la sortie  $y_2 : T_{EXP}$ , supposée non affectée par le défaut  $f_1$ . En l'absence de défaut sur la deuxième sortie, le résidu  $r_2$  reste nul.

Quant à l'**Observateur-3**, il est dédié à l'estimation des défauts  $f_3$  affectant la troisième sortie. Dans des conditions nominales, le résidu  $r_3$  reste à également nul.

Ainsi, en cas d'apparition simultanée de défauts sur les trois sorties, chaque observateur

dédié détecte et estime son défaut spécifique. Cela permet non seulement de détecter mais également de localiser les défauts capteurs, même en cas d'occurrence simultanée.

### Scénarios de Simulation

La stratégie proposée repose sur l'utilisation du modèle flou *Takagi – Sugeno (TS)* et de l'approche des observateurs flous. Les performances de cette méthode ont été évaluées à travers trois scénarios de simulation :

#### Simulation sans défaut

Une simulation du système en l'absence de défauts a été réalisée pour valider le comportement nominal du modèle. La figure IV.4.(a) illustre les sorties réelles et estimées, tandis que la figure IV.4.(b) montre les résidus correspondants. Les résultats indiquent que les résidus n'ont pas été activés, comme attendu, ce qui confirme que le système est exempt de défauts.

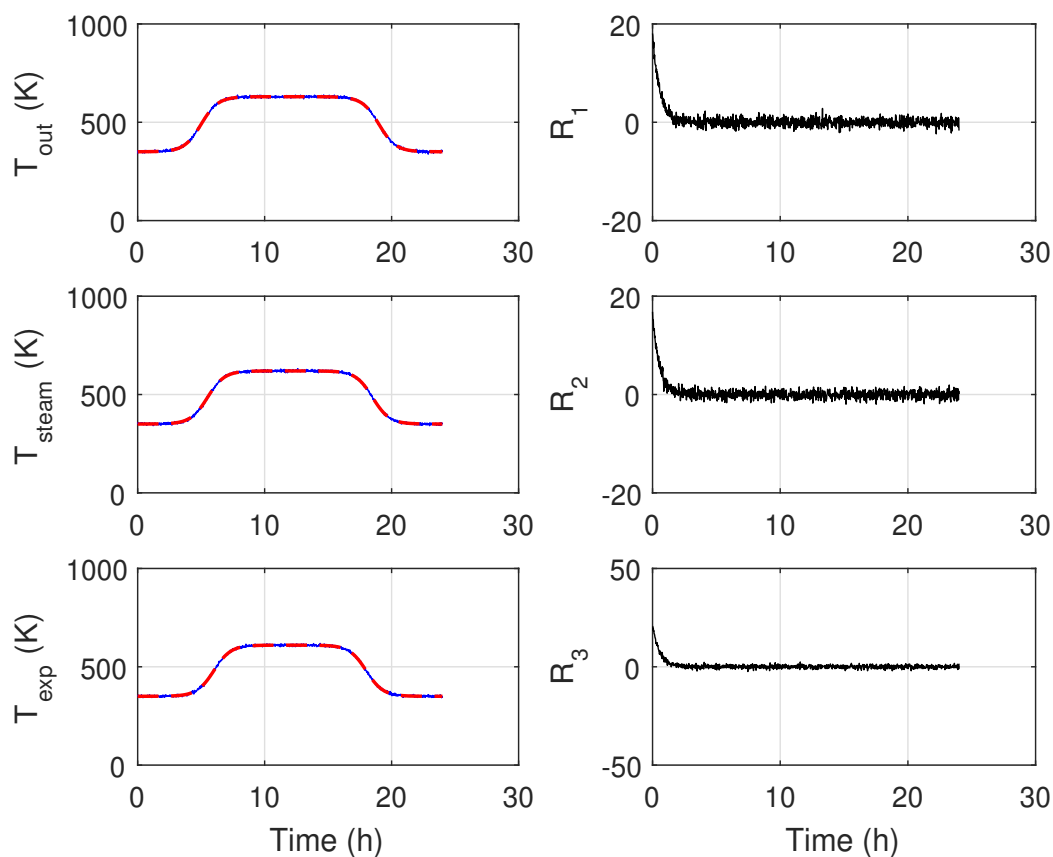


FIG. IV.4 : a) les sorties du système et sont estimé en en absence des défauts, b) Les résidus en absence des défauts

#### Simulation avec défaut

##### *a-Scénario 1 : Défaut sur la sonde de température de sortie du collecteur*

Dans ce scénario, un défaut a été simulé sur le capteur mesurant la température de sortie du collecteur. Une diminution soudaine de 5% a été introduite dans le facteur de gain

multiplicatif, entre. La figure IV.5 présente la comparaison entre les températures réelles et estimées des troissorties du système ainsi que les résidus correspondants.

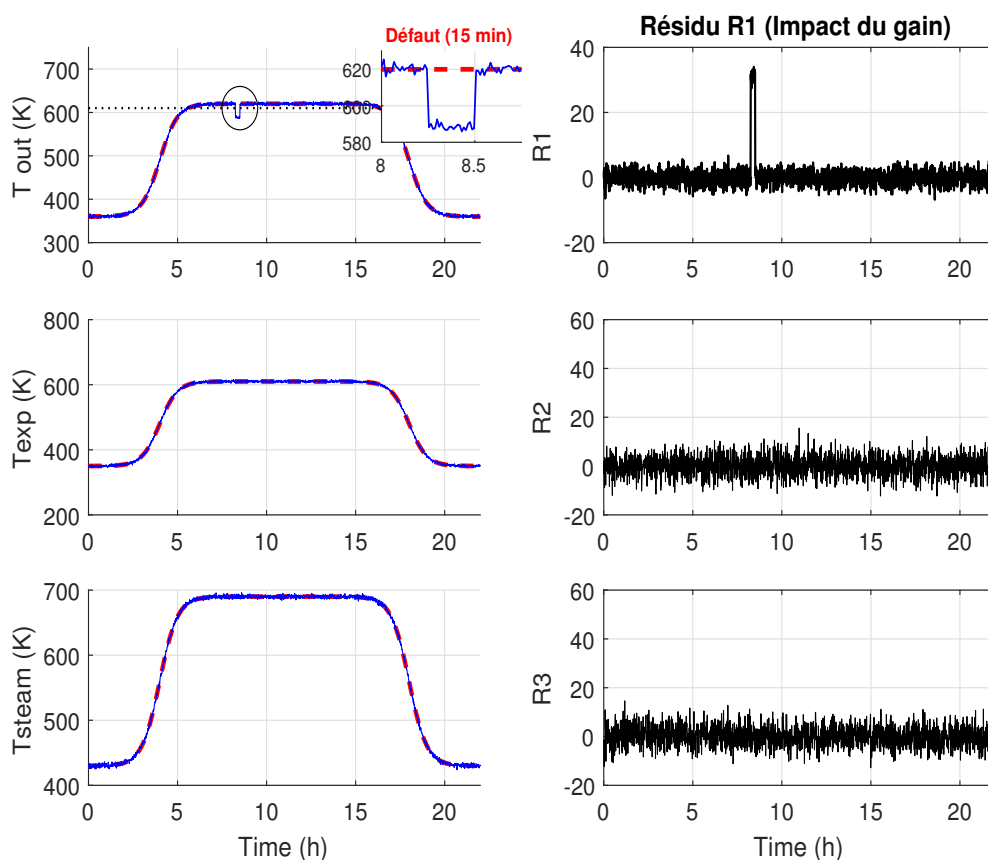


FIG. IV.5 : Comparaison entre les températures réelle et sont estimées en présence d'un défaut dans la mesure de la température de sortie de collecteur (Résidu correspondant à un défaut dans le capteur 1)

On observe que les sorties estimées suivent fidèlement les valeurs réelles en régime nominal, ce qui confirme la bonne performance de l'estimation malgré la présence du bruit de mesure. Toutefois, lors de l'apparition du défaut sur le capteur une divergence apparaît localement entre la mesure et la valeur réelle, traduisant l'effet de la dégradation du capteur.

Concernant les résidus, présente une variation significative au moment de l'occurrence du défaut, sous forme d'un pic clairement identifiable, tandis que restent proches de zéro avec de faibles fluctuations. Ce comportement confirme non seulement la capacité de détection, mais également l'efficacité de l'isolation du défaut, puisque seule la signature associée au capteur défaillant est activée.

Par ailleurs, en dehors de la période de défaillance, les résidus ne sont pas strictement nuls en raison du bruit de mesure inhérent aux capteurs et des incertitudes de modélisation. Cependant, ces variations restent contenues dans les seuils de détection fixés, ce qui confirme le bon comportement du système en régime nominal.

Ainsi, ces résultats mettent en évidence la robustesse de l'approche proposée, ainsi que sa capacité à détecter rapidement la défaillance tout en assurant une isolation fiable et une

estimation cohérente des états du système.

**b-Scénario 2 : Défauts multiples**

On considère la présence de défauts affectant deux capteurs du système, définis comme suit : • -Un défaut sur le capteur 1, mesurant la température de sortie du collecteur solaire, modélisé par :

$$f_1(t) = \begin{cases} 25 & \text{si } 6h < t < 6h45 \text{ min,} \\ 0 & \text{ailleurs.} \end{cases}$$

• Un défaut sur le capteur 3, mesurant la température de l'échangeur de chaleur, modélisé par :

$$f_2(t) = \begin{cases} 25 & \text{si } 15h \text{ et } 30\text{min} < t < 16h \text{ et } 15\text{min,} \\ 0 & \text{ailleurs.} \end{cases}$$

La simulation du système, présentée dans la section précédente, permet d'obtenir les résidus illustrés dans la Figure IV.6. Les seuils de détection ont été établis en régime de fonctionnement nominal du système.

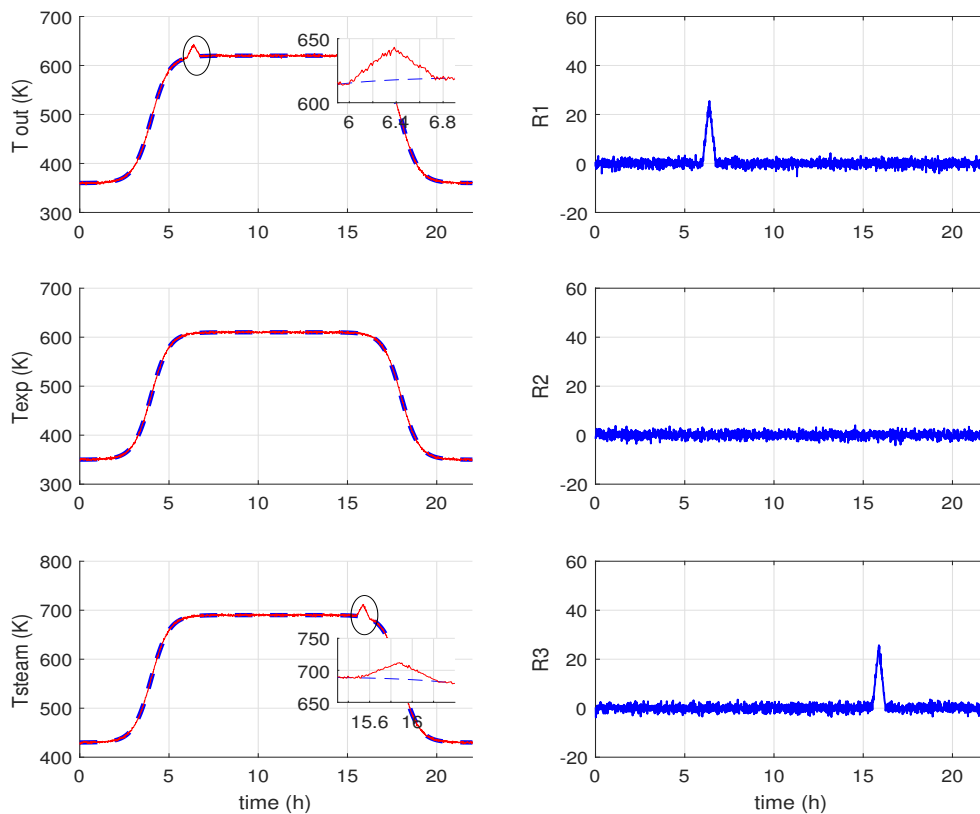


FIG. IV.6 : . Diagnostic des défauts de capteur 1 et 3

La Figure IV.6 illustre la réponse du système en présence de défauts multiples ainsi que l'évolution des résidus associés aux trois observateurs.

Sur la première ligne, on observe la température de sortie du collecteur ainsi que son estimation. Un écart significatif apparaît au début de la période de défaut, correspondant à un biais affectant le capteur 1 entre 6h et 6h45. Cette anomalie est clairement reflétée par le résidu, qui présente une forte déviation au moment de l'apparition du défaut, puis revient rapidement vers zéro en régime nominal.

La deuxième ligne montre la température de la vase d'expansion et son estimation. Le résidu reste globalement proche de zéro durant toute la période de simulation, ce qui confirme l'absence de défaut sur cette voie et atteste de la robustesse de l'observateur associé.

Enfin, la troisième ligne relative à la température de la vapeur met en évidence l'apparition d'un second défaut à partir de 15h30 et persistant jusqu'à 16h15. Ce défaut est correctement détecté par une variation significative du résidu, qui présente une impulsion marquée au moment de l'occurrence du défaut avant de se stabiliser.

Ainsi, l'analyse conjointe des trois résidus permet non seulement la détection, mais également l'isolation efficace des défauts affectant les différents capteurs du système.

## IV.5 Discussion et interprétation des résultats

Les résultats obtenus dans ces scénarios mettent en évidence l'efficacité de la procédure de diagnostic proposée, notamment dans un contexte où plusieurs défauts peuvent apparaître simultanément. L'isolement des défauts est assuré grâce à la capacité des observateurs à distinguer les résidus générés par des défaillances réelles de ceux induits par les perturbations externes ou le bruit de mesure.

Une des principales forces de cette approche réside dans sa capacité d'adaptation à différentes conditions de fonctionnement du système. En effet, dans des situations de faible irradiance ou lors de variations rapides des températures, l'utilisation d'observateurs dédiés permet de détecter des anomalies de manière fiable, là où d'autres méthodes pourraient générer de fausses alarmes.

De plus, la séparation claire des rôles entre les observateurs, associée à une gestion appropriée des seuils de détection, garantit que seules les défaillances réelles sont prises en compte, ce qui contribue à préserver la continuité de service et les performances globales du système. Enfin, cette méthodologie présente un avantage important dans les environnements industriels réels où des défauts multiples peuvent survenir simultanément. Elle permet une détection et une isolation rapides et précises des pannes, ce qui est particulièrement crucial dans les centrales solaires thermiques, où des défaillances non détectées peuvent affecter plusieurs capteurs et engendrer des dysfonctionnements à grande échelle.

Par ailleurs, la spécialisation de chaque observateur sur un capteur donné, tout en assurant son indépendance vis-à-vis des autres sorties, améliore significativement la robustesse

et la fiabilité du diagnostic.

## **IV.6 Conclusion**

Ce chapitre a permis de mettre en uvre les différentes méthodes de modélisation, d'estimation d'état et de diagnostic des défauts présentées dans les chapitres 2 et 3, en les appliquant à un modèle de centrale solaire thermique, tel que discuté dans le chapitre 1.

Tout d'abord, un modèle simplifié de la centrale solaire thermique a été formulé sous la forme d'équations différentielles non linéaires.

Ensuite, la méthode d'extraction d'un modèle non linéaire sous forme de multimodèle de type *Takagi – Sugeno*, proposée dans le chapitre 2, a été appliquée avec succès.

Enfin, nous avons identifié les défauts les plus significatifs pouvant affecter la centrale solaire (*SEGS*) et avons étudié leur détection et localisation. L'objectif était de mettre en place une technique de diagnostic des défauts en utilisant des observateurs à mode glissant. Les résultats de simulation ont mis en évidence l'efficacité des multi-observateurs dans la détection et la localisation des défauts.

---

## Conclusion générale

Les concentrateurs solaires cylindro-paraboliques (*CSP*) se distinguent aujourd'hui comme l'une des technologies les plus avancées pour la conversion de l'énergie solaire. Leur efficacité et leur capacité à produire une énergie thermique contrôlée en font des outils de choix dans le domaine des énergies renouvelables. Ces dernières années, les *CSP* ont ainsi attiré une attention croissante, devenant un sujet central dans la recherche scientifique et les applications industrielles liées aux centrales solaires thermiques.

Cependant, comme pour tout système industriel complexe, les centrales solaires à concentration, telles que les *SEGS* (Solar Electric Generating Systems), ne sont pas exemptes de défauts, de pannes ou de dégradations. Leur fonctionnement repose en grande partie sur des systèmes automatisés et des sources d'énergie auxiliaires qui assurent une continuité de service en cas de faible ensoleillement. Cette automatisation, bien que bénéfique, peut toutefois masquer la présence de défaillances sur de longues périodes. Ces dernières, bien qu'invisibles à court terme, entraînent une perte significative de performance globale. L'incapacité à détecter et diagnostiquer ces défauts en temps opportun a un impact direct sur la rentabilité des installations, qui dépend de leur capacité à exploiter de manière optimale une ressource gratuite mais fluctuante : l'énergie solaire.

Ainsi, le développement de mécanismes avancés pour la détection automatique et le diagnostic des défauts (*FDI*) constitue un enjeu majeur. L'objectif est de garantir une exploitation efficace et durable des installations, tout en minimisant les interruptions de service et en améliorant la résilience des systèmes de commande. C'est dans ce cadre que s'inscrit cette thèse, dont l'objectif principal est de concevoir des solutions innovantes pour la détection et la localisation des défauts dans une centrale solaire cylindro-parabolique *SEGS VI* de 30 MWe.

## Étapes et contributions

La première étape de ce travail a consisté en une étude approfondie des centrales solaires thermiques. Ce chapitre introductif a présenté les différents types de concentrateurs solaires, leur fonctionnement, ainsi que les principales stratégies de contrôle utilisées pour optimiser leur performance. Une modélisation mathématique des comportements dynamiques a été développée à partir des lois de conservation de l'énergie. Ce cadre théorique a permis de poser les bases pour une compréhension approfondie des défis spécifiques liés à la détection et au diagnostic des défauts dans les *CSP*.

Dans une deuxième phase, les concepts théoriques liés aux modèles *Takagi – Sugeno* ( $T - S$ ) ont été explorés. Ces modèles, connus pour leur capacité à approcher les systèmes non linéaires complexes, offrent un cadre prometteur pour la modélisation et l'analyse des systèmes dynamiques. Après avoir présenté les différentes structures multimodèles utilisées dans la littérature, leur efficacité dans des applications telles que la commande, l'identification et l'estimation a été mise en évidence. Cette étape a permis de justifier l'utilisation des modèles  $T - S$  comme base pour le développement des solutions *FDI* proposées.

Une analyse critique des approches existantes a ensuite été réalisée. Cette étude bibliographique a permis de mettre en évidence plusieurs lacunes dans les travaux antérieurs, notamment :

- 1 • L'absence d'un cadre normé pour l'analyse des performances des *SEGS*.
- 2 • Le manque d'études exhaustives sur les différents types de défauts pouvant survenir dans ces systèmes.
- 3 • Une compréhension limitée des effets des défauts sur le comportement global des centrales.
- 4 • L'absence de méthodes robustes pour l'isolation et la localisation des défauts dans les champs solaires.
- 5 • La rareté de modèles validés expérimentalement, à l'exception du déséquilibre hydraulique.

Ces limitations montrent que les approches existantes ne permettent pas une détection et un diagnostic complets des défauts dans les *CSP*, en particulier pour les systèmes complexes comme les *SEGS*. Ces observations ont orienté notre travail vers des approches basées sur des observateurs non linéaires, capables de répondre à ces défis.

## **Approches développées**

Le cur de ce travail repose sur le développement d'une méthode de modélisation multi-modèle pour les systèmes *SEGS* à paramètres quasi-variants (*Quasi-LPV*). Cette méthode utilise une transformation polytopique convexe pour générer des modèles locaux, qui permettent d'approximer avec précision le comportement global du système. Une technique de linéarisation par secteurs a été employée pour convertir le système non linéaire initial en une structure multi-modèles équivalente. Cette approche constitue une base robuste pour la conception d'outils de diagnostic avancés.

Parmi les différentes méthodes de détection et de diagnostic des défauts, nous avons retenu les approches basées sur des observateurs non linéaires. Ces observateurs, souvent utilisés pour la commande, peuvent également jouer un rôle clé dans le diagnostic en générant des résidus qui reflètent les écarts entre le comportement observé du système et celui prévu par le modèle. Les étapes clés de cette méthode sont :

1 • La génération des résidus, qui convergent vers zéro en mode normal et divergent en cas de défaut.

2 • La prise de décision, basée sur une analyse des résidus pour détecter et localiser les défauts.

Une attention particulière a été accordée aux Multi Observateur à Mode Glissant (*FSMO*). Ces derniers permettent une estimation robuste des erreurs, qu'elles soient liées aux actionneurs ou aux capteurs. Leur conception repose sur l'utilisation de la méthode de Lyapunov pour analyser la convergence des erreurs d'estimation. Les conditions de convergence sont exprimées sous forme d'inégalités matricielles linéaires (*LMIs*), résolues à l'aide d'outils numériques avancés.

Les résultats de simulation obtenus ont montré que les multi-observateurs à mode glissant développés dans cette thèse permettent une détection et une localisation fiables des défauts dans les *SEGS*. Ces résultats confirment l'efficacité des approches proposées et ouvrent la voie à des applications pratiques pour améliorer la fiabilité et la résilience des centrales solaires thermiques.

## Perspectives

Les contributions de cette thèse ouvrent plusieurs perspectives pour le développement futur des systèmes de détection et de diagnostic des défauts dans les centrales solaires :

- **Commande tolérante aux défauts** : Les résultats obtenus peuvent être étendus pour intégrer des stratégies de commande robustes, capables de maintenir les performances des systèmes en présence de défauts.

- **Observateurs  $T - S$  à entrées inconnues** : La conception d'observateurs capables de gérer des incertitudes ou des perturbations non modélisées constitue une piste prometteuse pour renforcer la robustesse des lois de commande.

- **Applications expérimentales** : L'intégration des méthodes développées dans des centrales opérationnelles permettrait de valider leur efficacité dans des conditions réelles.

En conclusion, ce travail propose une contribution significative au domaine de la détection et du diagnostic des défauts dans les centrales solaires thermiques. Les approches développées, basées sur des observateurs non linéaires et des techniques de modélisation avancées, offrent des solutions innovantes et robustes pour répondre aux défis posés par les systèmes *SEGS*. Ces résultats constituent une étape importante vers la conception de centrales solaires plus performantes, fiables et durables.

---

## Références

- [1] Abu-Hamdeh, N. H., et al., "Numerical investigation of molten salt/SiO<sub>2</sub> nano-fluid in the solar power plant cycle and examining different arrangements of shell and tube heat exchangers and plate heat exchangers in these cycles," *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, vol. 124, pp. 1-8, 2021.
- [2] Akkache, A., and M. C. Zerrouki, *Étude d'une centrale solaire cylindro-parabolique de 100 MWelec*, Ph.D. dissertation, Université Akli Mohand Oulhadje-Bouira, 2020.
- [3] Alihonou, A. C., et al., "Climatisation solaire à absorption, mode de fonctionnement et description des différents éléments d'une unité de climatisation solaire dans le monde : Revue de littérature," *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, vol. 13, no. 3, pp. 1890-1902, 2019.
- [4] Al-Maliki, W. A. K., et al., "Dynamic modelling and advanced process control of power block for a parabolic trough solar power plant," *Energies*, vol. 15, no. 1, p. 129, 2021
- [5] Boudjedir, C., and Z. Fenchouche, *Commande et estimation robustes d'une station solaire thermique*, Ph.D. thesis, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, 2015.
- [6] Boukhelkhal, O., M. Chouakri, and R. Rabhi, "Etude de faisabilité et de dimensionnement d'une installation solaire thermique," 2022.
- [7] Burulday, M. E., M. S. Mert, and N. Javani, "Thermodynamic analysis of a parabolic trough solar power plant integrated with a biomass-based hydrogen production system," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 47, no. 45, pp. 19481-19501, 2022.
- [8] Chettibi, O., I. Zine, and A. E. Ghellab, *Analyse énergétique d'un système solaire destiné pour le froid et le chauffage des bâtiments*, Ph.D. dissertation, Université de Jijel, 2022.
- [9] Dowling, A. W., T. Zheng, and V. M. Zavala, "Economic assessment of concentrated solar power technologies : a review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 72, pp. 10191032, 2017.
- [10] Farges, O., *Conception optimale de centrales solaires à concentration : application aux centrales à tour et aux installations "beam down"*, Génie des procédés, Ecole des Mines d'Albi-Carmaux, 2014. Available from : tel-01135529.
- [11] Gallego, A., F. Fele, E. Camacho, and L. Yebra, "Observer-based model predictive control of a parabolic-trough field," *Solar Energy*, 2023.

- [12] Le Roux, D., et al., "Modélisation dun système solaire combiné comprenant une batterie thermique à base de matériaux à changement de phase," Congrès de la société Française de Thermique, 2023.
- [13] Ma, Y., et al., "Superstructure design and optimization on supercritical carbon dioxide cycle for application in concentrated solar power plant," *Energy Conversion and Management*, vol. 206, p. 112290, 2020.
- [14] Muñoz, J., J. M. Martinez-Val, and A. Ramos, "Thermal regimes in solar-thermal linear collectors," *Solar Energy*, vol. 85, no. 5, pp. 857-870, 2011.
- [15] Mustafa, M., S. Abdelhady, and A. Elweteedy, "Analytical Study of an Innovated Solar Power Tower (PS10) in Aswan," *International Journal of Energy Engineering*, vol. 2, no. 6, pp. 273278, 2012.
- [16] Ong, S., et al., Land-use requirements for solar power plants in the United States, NREL/TP-6A20-56290, National Renewable Energy Lab. (NREL), Golden, CO (United States).
- [17] Pitz-Paal, R., and Deutsches Zentrum für Luftund, "Ecostar : European Concentrated Solar Thermal Road-Mapping," roadmap document, 2005. Available from : <http://edok01.tib.uni-hannover.de/edoks/e01fn12/687951828.pdf>.
- [18] Quoilin, S., Les centrales solaires à concentration, Ph.D. thesis, Université de Liège, 2002.
- [19] Rekioua, D., et al., "Etude technique et économique dun système solaire photovoltaïque/solaire thermique : Application à Bejaia (Algérie)," *Int. J. Control.*, vol. 12, pp. 12-39, 2013.
- [20] Taif, Z., M. M. Laffi, and B. Boulebtateche, "Diagnosis of a solar power plant using TS fuzzy-based multimodel approach," 16th International Power Electronics and Motion Control Conference and Exposition, Antalya, Turkey, IEEE, 2014, doi : 10.1109/EPE-PEMC.2014.6980513.
- [21] Tsikalakis, A., et al., "Review of best practices of solar electricity resources applications in selected Middle East and North Africa (MENA) countries," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, no. 6, pp. 2838-2849, 2011.
- [22] Trieb, F., and T. Institut für Technische, "Concentrating Solar Power for the Mediterranean Region : MED-CSP; final report," 2005. Available from : <http://edok01.tib.uni-hannover.de/edoks/e01fb06/510873545.pdf>.
- [23] Winter, C-J., Rudolf L. Sizmann, and Lorin L. Vant-Hull, eds., *Solar Power Plants : Fundamentals, Technology, Systems, Economics*, Springer Science Business Media, 2012.
- [24] Zarza, E., et al., "INDITEP : The first pre-commercial DSG solar power plant," *Solar Energy*, vol. 80, no. 10, pp. 1270-1276, 2006.
- [25] Zarza, E., and M. Romero-Alvarez, "Concentrating Solar Thermal Power," *Energy Conversion*, CRC Press, pp. 19-1-19-98, 2007.

- [26] Zibouche, S., and H. Mekaoui, Etude, conception et réalisation dun récepteur trapézoïdal pour un système solaire à concentration linéaire de Fresnel, Ph.D. dissertation, Université Mouloud Mammeri Tizi Ouzou, 2021.
- [27] A. E. Abbas and M. Darwich, "A Takagi-Sugeno Fuzzy Model-Based Approach for the Control of Nonlinear Systems," *Journal of Control and Decision*, vol. 9, no. 2, pp. 124-136, 2022.
- [28] L. Ben Hamouda, "La synthèse de commandes prédictives tolérantes aux défauts à base de modèles T-S flous," Thèse de Doctorat, École Nationale d'Ingénieurs de Tunis et l'Université de Rouen, 2015.
- [29] H. Chen, Z. Wang, and J. Liu, "Takagi-Sugeno Fuzzy Modeling and Control for Nonlinear Systems with Time Delay," *Soft Computing*, vol. 24, pp. 6783-6796, 2020.
- [30] Y. Chen and C. Kwan, "Nonlinear System Identification with Takagi-Sugeno Fuzzy Models," *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, vol. 4, no. 3, pp. 367-377, 1996.
- [31] D. Driankov, H. Hellendoorn, and M. Reinfrank, *An Introduction to Fuzzy Control*. New York : Springer, 1993.
- [32] H. Geppert and H. Berenji, "Fuzzy Model-Based Control of Nonlinear Systems," *Fuzzy Sets and Systems*, vol. 74, no. 1, pp. 49-59, 1995.
- [33] S. Gupta and P. Shukla, "Design of Takagi-Sugeno Fuzzy Controller for Nonlinear Systems Using Particle Swarm Optimization," *Journal of Intelligent Fuzzy Systems*, vol. 41, no. 4, pp. 5631-5641, 2021.
- [34] J. S. R. Jang, "ANFIS : Adaptive-Network-Based Fuzzy Inference System," *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, vol. 23, no. 3, pp. 665-685, 1993.
- [35] W. Jia and W. Yu, "Stability and Control of Takagi-Sugeno Fuzzy Systems with External Disturbances," *Applied Sciences*, vol. 12, no. 5, p. 2386, 2022.
- [36] H. P. Kao and C. Kwan, "Fuzzy Control of Nonlinear Systems Using Takagi-Sugeno Model," *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, vol. 9, no. 3, pp. 388-397, 2001.
- [37] L. Li, Z. Zhou, and J. Chen, "Adaptive Fault-Tolerant Control for Takagi-Sugeno Fuzzy Systems with Actuator Faults," *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, vol. 29, no. 4, pp. 1020-1031, 2021.
- [38] E. H. Mamdani and S. Assilian, "An Experiment in Linguistic Synthesis with a Fuzzy Logic Controller," *International Journal of Man-Machine Studies*, vol. 7, no. 1, pp. 1-13, 1975.
- [39] A. Nagy, G. Mourot, G. Schutz, and J. Ragot, "Modélisation dun réacteur biologique à laide dune structure multi-modèle," *Journal Européen des Systèmes Automatisés*, vol. 44, no. 6, pp. 423-443, 2010.
- [40] M. A. Shafique and U. A. Bhatti, "Takagi-Sugeno Fuzzy-Based Approach for Predicting Air Quality in Smart Cities," *Sensors*, vol. 21, no. 3, p. 948, 2021.

- [41] Y. Shen, Z. Xu, and X. Zhang, "Robust Adaptive Control for Takagi-Sugeno Fuzzy Systems with Uncertain Time-Delay," *IEEE Transactions on Cybernetics*, vol. 53, no. 2, pp. 456-467, 2023.
- [42] M. Sugeno, "An Overview of Fuzzy Control," *Proceedings of the IEEE*, vol. 73, no. 11, pp. 1558-1568, 1985.
- [43] T. Takagi and M. Sugeno, "Fuzzy Identification of Systems and its Applications to Modeling and Control," *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, vol. 15, no. 1, pp. 116-132, 1985.
- [44] Y. Yuan, Y. Zhao, and H. Zhang, "Model Predictive Control for Takagi-Sugeno Fuzzy Systems with Input Constraints," *Fuzzy Sets and Systems*, vol. 394, pp. 71-87, 2020.
- [45] Akhenak, A. (2004). Conception d'observateurs non linéaires par approche multi-modèles : application au diagnostic. Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Lorraine.
- [46] Amato, F., Mattei, M. (2002). Design of full unknown input observers with H performance. In *IEEE International Conference on Control Applications* (Vol. 1, pp. 74-75).
- [47] Aoki, M., Huddle, J. R. (1967). Estimation of the state vector of a linear stochastic system with a constrained estimator. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 12(4), 432-433.
- [48] Assawinchaichote, W., Nguang, K. (2002). Fuzzy observer-based controller design for singularly perturbed nonlinear systems : An LMI approach. In *IEEE Conference on Decision and Control* (Vol. 2, pp. 2165-2170).
- [49] Ballé, P. (1999). Fuzzy-model-based parity equations for fault isolation. *Control Engineering Practice*, 7(2), 261-270.
- [50] Bara, G. I., Rafaralahy, H., Zasadzinski, M. (1999). For a class of bilinear descriptor systems subjected to unmeasurable disturbances. In *IEEE Conference on Decision and Control* (Vol. 1, pp. 85-87).
- [51] Beard, R. V. (1971). Failure accommodation in linear systems through self-reorganisation. *Man Vehicle Laboratory Report MTV-71-1*, Technology and Metallurgy Series, 199, 1-20.
- [52] Benkhedda, H., Patton, R. J. (1996). B-spline network integrated qualitative fault detection. In *IFAC World Congress* (pp. 163-168), USA.
- [53] Bennett, S. M., Patton, R. J., Daley, S. (1999). Sensor fault-tolerant control of a rail traction drive. *Control Engineering Practice*, 7(2), 217-225.
- [54] Buchholz, R., Glembin, J., Eggert, D. (2010). Investigation of the reduced performance of a collector array with direct flow vacuum tubes.
- [55] Bun, L. (2011). Détection et localisation de défauts pour un système PV. Thèse de Doctorat, Université de Grenoble.

- [56] Duff, W. S., Millard, R. A. (1980). Procedures for on-line detection of sensor and operating faults in solar energy systems. In Proceedings of the Annual Meeting of the American Section of the International Solar Energy Society, U.S., 3(1).
- [57] Edwards, B. W., Spurgeon, S. K., Patton, R. J. (2000). Sliding mode observers for fault detection and isolation. *Automatica*, 36, 541-553.
- [58] Edwards, C., Spurgeon, S. K. (1994). On the development of discontinuous observers. *International Journal of Control*, 25, 1211-1229.
- [59] Faure, G. (2018). Étude de défauts critiques des installations solaires thermiques de grande dimension : définition, modélisation et diagnostic. Thèse de Doctorat, Université Grenoble Alpes.
- [60] Frank, P. M. (1987). Fault diagnosis in dynamic systems via state estimation : A survey. In *Systems fault diagnostics, reliability, and related knowledge-based approaches* (pp. 35-98).
- [61] Hellstrom, B, Adsten, M, Nostell, P, Karlsson, B., Wackelgard, E. (2003). The impact of optical and thermal properties on the performance of flat plate solar collectors. *Renewable Energy*, 28(3), 331-344.
- [62] Floquet, T. (2000). Contributions à la commande par modes glissants d'ordre supérieur. Thèse de doctorat, Université des Sciences et Technologies de Lille, France.
- [63] Guerra, T. M., Estrada-Manzo, V., Lendek, Zs. (2015). Observer design for Takagi-Sugeno descriptor models : An LMI approach. *Automatica*, 52(2), 154-159.
- [64] Hammoudi, M. Y. (2015). Diagnostic, Contribution à la commande et à l'observation dans l'association convertisseurs machine. Thèse de Doctorat, Université Mohamed Khider.
- [65] Isermann, R. (2006). *Fault Diagnosis Systems : An Introduction from Fault Detection to Fault Tolerance*. Springer.
- [66] Kicsiny, R., Varga, Z. (2013). Real-time nonlinear global state observer design for solar heating systems. *Nonlinear Analysis : Real World Applications*, 14(2), 1247-1264.
- [67] Luenberger, D. G. (1971). An introduction to observers. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 16(6), 596-602.
- [68] Methnani, S. (2012). Diagnostic, reconstruction et identification des défauts capteurs et actionneurs : application aux stations dépuration des eaux usées. Thèse de Doctorat, Université de Toulon.
- [69] Noura, H., Sauter, D., Hamelin, F., Theilliol, D. (2000). Fault-tolerant control in dynamic systems : Application to a winding machine. *IEEE Control Systems Magazine*, 20(1), 33-49.
- [70] Patton, R. J. (1997). Robustness in model-based fault diagnosis : The 1995 situation. *Annual Reviews in Control*, 21, 103-123.

- [71] Rehman, H. ur, Hirvonen, J., Sirén, K. (2018). Influence of technical failures on the performance of an optimized community-size solar heating system in Nordic conditions. *Journal of Cleaner Production*, 175, 624-640.
- [72] Rotondo, D., Puig, V., Nejjari, F., Witczak, M. (2015). Automated generation and comparison of Takagi-Sugeno and polytopic quasi-LPV models. *Fuzzy Sets and Systems*, 277, 44-64.
- [73] Shtessel, Y., Edwards, C., Fridman, L., Levant, A. (2014). *Sliding Mode Control and Observation*. Springer.
- [74] Taniguchi, T., Tanaka, K., Yamafuji, K., Wang, H. O. (1999). Fuzzy descriptor systems : Stability analysis and design via LMIs. In *Proceedings of the American Control Conference*.
- [75] Takagi, T., Sugeno, M. (1985). Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 15, 116-132.
- [76] Utkin, V. I. (1992). *Sliding Modes in Control and Optimization*. Springer-Verlag.
- [77] Utkin, V. I. (1977). Variable structure systems with sliding modes. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 22(2), 212-222.
- [78] Venkatasubramanian, V., Rengaswamy, R., Kavuri, S. N. (2003). A review of process fault detection and diagnosis : Part II : Qualitative models and search strategies. *Computers Chemical Engineering*, 27(3), 313-326. [https://doi.org/10.1016/S0098-1354\(02\)00160-9](https://doi.org/10.1016/S0098-1354(02)00160-9)
- [79] Walcott, B. L., Corless, M. J., Zak, S. H. (1986). Observation of dynamical systems in the presence of bounded nonlinearities/uncertainties. *IEEE Conference on Decision and Control*, 961-966.
- [80] Walcott, B. L., Zak, S. H. (1988). Combined observer-controller synthesis for uncertain dynamical systems with applications. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 18, 88-104.
- [81] Zahra, T., Mourad, L. M., Ahmed, A. H. (2020). Robust fuzzy sliding mode observer for faults detection in solar power plant applications. *Instrumentation, Mesures, Métrologies*, 19(4).
- [82] Taif, Z., Lafifi, M. M., Boulebtateche, B. (2014, September). Diagnosis of a solar power plant using TS fuzzy-based multimodel approach. In *2014 16th International Power Electronics and Motion Control Conference and Exposition* (pp. 325-330). IEEE.
- [83] Camacho, E. F., Ruiz-Moreno, S. (2024). "Control of solar energy systems". *Annual Review of Control*.
- [84] Ruiz-Moreno, S., Gallego, A. J., Sanchez, A. J. (2023). " A cascade neural network methodology for fault detection and diagnosis in solar thermal plants". *Renewable Energy*.
- [85] Ruiz-Moreno, S., Gallego, A. J., Sanchez, A. J. (2022). "Deep learning-based fault detection and isolation in solar plants for highly dynamic days". In *2022 International Conference (IEEE)*.

- [86] Ruiz-Moreno, S., Gallego, A. J., Sanchez, A. J. (2022). "Fault detection and isolation based on deep learning for a Fresnel collector field". IFAC-PapersOnLine.
- [87] Ruiz-Moreno, S., Sanchez, A. J., Gallego, A. J. (2022). "A deep learning-based strategy for fault detection and isolation in parabolic-trough collectors". Renewable Energy.
- [88] T. Stuetzle, "Automatic control of a 30 MWe SEGS VI parabolic trough plant," Solar Energy, vol. 76, pp. 187193, 2004.
- [89] Zhang, D. (2024). "Some issues of parameter estimation for linear systems". Figshare, Swinburne University.
- [90] Zheng, W., Xiao-Gang, L. (2023). "Decoupling fault detection vectors for fault detection in the TS fuzzy system". Automatika, Taylor Francis.

---

## Appendix A

### Collector Dimensions

$Length = 753.6m$	collector mirror length
$ABSiD, = 0.066m$	inside diameter of the absorber tube
$ABSoD, = 0.07m$	outside diameter of the absorber tube
$ENViD, = 0.112m$	inside diameter of the glass envelope
$ENVoD, = 0.115m$	outside diameter of the glass envelope
$ABSiA, = 0.003421m^2$	crosssectional area inside the absorber tube
$ABSA = 0.0004273m^2$	crosssectional area of the absorber material
$ENVA = 0.0005349m^2$	crosssectional area of the glass envelope
$SpacingL = 13m$	distance between two collector rows
$W = 4.823m$	collector mirror width
$Collectorsn = 50$	total number of collectors in the field