

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**  
**MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE**  
**ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE**



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
Ecole Nationale Polytechnique

*Département d'Automatique*

*Mémoire De Master en Automatique*

**THÈME**

**DETECTION DE DEFAUTS D'UN  
REACTEUR CHIMIQUE CSTR**

**Présenté par :** Djemai Hakim

**Dirigé par :** Dr R. ILLOUL

**Juin 2015**

Ecole Nationale Polytechnique : 10, Avenue Hassen Badi BP182 El-Harrach

## Résumé :

Le but de ce travail est l'application d'observateur non linéaires pour la détection, l'isolation et l'estimation des défauts dans le réacteur continue parfaitement agité CSTR, après présentation d'un état de l'art sur le diagnostic et l'observateur non linéaires.

On a créé trois types de défauts : défaut capteur, variation paramétrique (défaut système) et variation de la température d'alimentation.

**Mot clefs :** Réacteurs chimiques CSTR, Observateur non linéaire, défaut.

## Abstract:

The objective of this work is the application of nonlinear observer-based fault detection, isolation and estimation in continuous stirred tank reactors CSTR. After introducing in state-of-the-art of diagnostic and nonlinear observers generally.

We have create three types of faults : captor fault, parametric variation (system fault) , and variation of temperature of alimentation.

Keywords: chemical reactor CSTR, nonlinear observer, fault.

1

ملخص :

يهدف هذا العمل إلى تطبيق الملاحظات غير الخطية من أجل كشف الخلل الذي قد يصيب المفاعلات الكيماوية من نوع مستمر, بعد تقديم لحالة فنية عن تشخيص الخلل , و الملاحظات اللاخطية بصفة عامة.

قمنا بخلق ثلاثة أنواع من الخلل: خلل الملتقط, خلل في التغير(خطا في النظام), و خطا في تغير درجة الحرارة للحقن.

الكلمات الرئيسية :

مفاعلات كيماوية ، الملاحظات غير الخطية. خلل

## **Remerciements**

*Je remercie avant tout Dieu, le tout puissant, pour m'avoir donné le courage, la patience, la volonté et la force nécessaire, pour affronter toutes les difficultés et les obstacles qui se sont hissés au travers de mon chemin, tout au long de ce travail.*

*Je remercie particulièrement mon promoteur Mr R. ILLOUL pour m'avoir encadré, mais également formé et motivé et qui m'a assuré les précieux conseils tout au long de ce projet. Il trouvera ici ma gratitude et ma reconnaissance profondes.*

*Mes remerciements vont aussi à Messieurs les membres du jury pour avoir accepté d'évaluer mon travail.*

*Je tiens à remercier l'ensemble de mes enseignants à l'ENP*

*Je remercie enfin surtout ma famille, pour avoir supporté et accepté mes choix.*

## *Dédicace*

*Je dédie ce modeste travail :*

*A mes chers parents, ma petite et grande famille*

*A mon frère*

*A mes sœurs*

*A tous ceux qui m'aiment et que j'aime*

*A tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réussite de ce travail.*

*A vous.*



# Introduction Générale

La complexité et la productivité croissantes des processus technologiques nécessitent une plus grande sûreté, fiabilité et disponibilité. Le besoin en processus sûrs et fiables est encore plus cruciale lorsqu'il s'agit de systèmes pour lesquels un changement plus ou moins critique et imprévu dans le comportement du procédé, c'est-à-dire un défaut, peut coûter très cher, notamment en vies humaines. Citons par exemple les usines de produits chimiques, en avionique ainsi que pour les processus nucléaires. Il est alors impératif d'introduire des modules de détection et de localisation de défauts, afin de rendre compte de l'apparition des défauts le plus rapidement possible, avant qu'il n'entraînent des dommages importants et le plus précisément possible en donnant les informations qui faciliteront les réparations et ceci indépendamment des perturbations et des bruits.

Avant l'apparition des techniques utilisant un modèle du processus, la détection de défauts se faisait et se fait encore en utilisant la redondance matérielle. Les composants critiques du système sont doublés, triplés voir quadruplés. Cette redondance matérielle est sûre et rapide mais elle s'avère coûteuse et encombrante. Elle rend le système complexe et de plus certains composants ne peuvent être doublés. Une autre technique utilisée est la surveillance. Les variables du système dynamique sont mesurées puis comparées à leurs valeurs limites prédéfinies (tolérances) pour un comportement normal c'est-à-dire en l'absence de défauts. Des alarmes sont générées en cas de dépassement. Cette technique présente comme inconvénient le fait que si les limites sont fixées trop basses de fausses alarmes peuvent être déclenchées à cause des fluctuations normales des variables. Par contre si elles sont fixées trop hautes alors certains défauts peuvent ne pas être détectés. De plus, si le défaut se propage sur plusieurs sorties la localisation devient alors difficile.

## Introduction générale

---

Comme il a été démontré que les changements de mode de fonctionnement des systèmes peuvent être détecté rapidement par introduction de la redondance analytique s'appuyant sur la vérification de la cohérence entre les mesures du processus et un modèle mathématique associé, différentes approches de détection et de localisation de défauts ont été dès lors développées basées sur les méthodes analytiques de l'automatique, du traitement du signal et de la statistique, nous pouvons citer : les méthodes basées sur les équations de parité, l'estimation paramétrique ou les observateurs. Le problème de surveillance se résout alors en deux étapes : génération et évaluation des signaux indicateurs de défauts, les résidus.

# Chapitre I

## ETAT DE L'ART SUR DIAGNOSTIC ET SUR LA COMMANDE TOLERANTE AUX DEFAUTS

## I.1. INTRODUCTION

Pour répondre aux exigences du marché en termes de fonctionnalités, de coût ou de flexibilité, les systèmes automatiques sont depuis longtemps poussés vers une modularité toujours accrue, qui passe notamment par la réutilisation de nombreux composants développés indépendamment. Ce haut degré de réutilisation se traduit par des architectures toujours plus complexes, intégrant des éléments hétérogènes dans des systèmes multiformes, ce qui augmente le risque d'apparition d'un défaut [Tai04], [Lal04].

En présence d'un défaut, un conventionnel gain de retour d'état peut s'avérer très limité et amener le système vers des comportements non désirés, voire à l'instabilité. Pour pallier de telles inconvenients, de nouvelles techniques de commande tolérante aux défauts (FTC) ont été développées ces dernières années dans le but précis est relativement de maintenir les performances du système ainsi que sa stabilité [Wu01], [Rod05].

En dépit du fait que la commande tolérante aux défauts soit récente dans le domaine de la commande des systèmes, Historiquement, les travaux précurseurs dans ce domaine étaient motivés par les applications aéronautiques, aux Etats Unis, au début des années 80, sous l'impulsion de projets financés par la NASA [Moe89], où la prise de décision concernant la reconfiguration du système ou de ces objectifs a une importance capitale. Les méthodes proposées étaient en général issues de techniques classiques de commande (commandes linéaires quadratiques, adaptatives, ou robustes) et étaient intimement liées au type d'applications considérées [Jam03], [Pat97], [Cie07].

## I.2. POSITIONNEMENT DU PROBLEME

L'idée de base d'un système de commande tolérant aux défauts est de concevoir un dispositif de commande particulier permettant de maintenir la stabilité et les performances du système à commander, sujet à des défauts qui peuvent le faire dévier de son point de fonctionnement nominal. Le dispositif peut permettre aussi de mener le système de commande vers un autre point de fonctionnement, proche du point de fonctionnement nominal. On parle alors de reconfiguration avec changement d'objectifs. Dans ce dernier cas le système fonctionne en mode dégradé. Afin de satisfaire l'un de ces objectifs, les commandes robustes et adaptatives ne suffisent plus et il est nécessaire de faire appel à des techniques qui prennent en considération l'interaction entre le système de détection des défauts et la loi de commande. C'est ce dernier point qui constitue, aujourd'hui la préoccupation majeure des chercheurs dans le domaine.

Le principe de reconfiguration est illustré sur la figure (I.1). La procédure est très simple. Si un défaut apparaît, le système dévie de son point de fonctionnement nominal, défini par les variables entrées/sorties  $(u_0, y_0)$ , vers un autre point  $(u_f, y_f)$ . Le but de la commande tolérante dans ce cas précis est de déterminer une nouvelle loi de commande qui prend en compte les variations dues à l'apparition du défaut et permet d'amener le système, soit vers l'état de

fonctionnement nominal et par conséquent les performances seront maintenues, soit vers un autre point de fonctionnement, défini par  $(u_c, y_c)$ , pour lequel les performances ne sont pas les mêmes qu'initialement mais en sont très proches (acceptables) [Nou00].

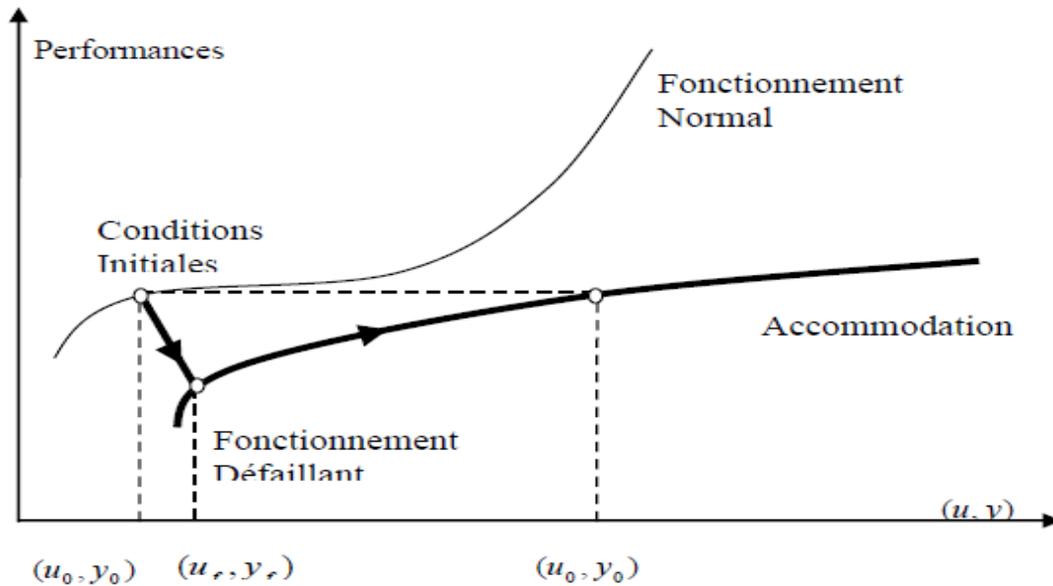


Figure I.1 : Problème de la commande tolérante aux défauts.

### I.3. DEFINITIONS ET CONCEPTS

#### I.3.1. Commande tolérante aux défauts

La commande tolérante aux défauts a pour but de s'accommoder automatiquement de l'effet des défauts tout en étant capable de maintenir la stabilité et au mieux les performances nominales du système. Elle a pour but aussi d'éviter l'arrêt immédiat du système et de permettre son fonctionnement en mode dégradé [Bac01], [Jam03].

#### I.3.2. Défaillance (Failure)

- La cessation de la capacité d'un système physique ou d'un dispositif à accomplir ses fonctions.
- Interruption permanente de la capacité d'un système à assurer une fonction requise dans des conditions opérationnelles spécifiées.

Par exemple, une machine électrique peut produire un bruit anormal tout en entraînant correctement une charge, en supposant que telle soit sa fonction. Le bruit anormal est un défaut qui peut permettre de présager d'une défaillance à venir.

### ***1.3.3. Défaut (Fault)***

- N'importe quel état indésirable d'un composant ou d'un système. Un défaut n'implique pas nécessairement une défaillance.
- Déviation non permise d'au moins une propriété ou un paramètre caractéristique du système des conditions acceptables ou (et) standards [Ise97].

La notion de défaut est donc voisine de celle de défaillance mais comme le souligne le dictionnaire IEEE (première définition), un défaut n'implique pas nécessairement une défaillance. Défaut, lié au comportement, est plus général que défaillance liée aux fonctions, puisqu'elles sont une abstraction du comportement tel qu'il est conçu téléologiquement.

La description comportementale est plus détaillée que la description fonctionnelle et l'inclut donc. De la même manière, la notion de défaut inclut celle de défaillance ; un défaut n'altère pas nécessairement le fonctionnement d'un système physique mais peut présager d'une défaillance à venir.

## **I.4. LES DIFFERENTS TYPES DE DEFAUTS**

### ***1.4.1 Selon leurs types***

Les défauts sont des événements qui apparaissent à différents endroits du système. Dans la littérature, les défauts sont classés en fonction de leur localisation (emplacement), définissant alors des types de défauts [Ise05], [Rod05], [Bac01].

#### ***Les défauts actionneurs :***

Les défauts actionneurs agissent au niveau de la partie opérative et détériorent le signal d'entrée du système. Ils représentent une perte totale (défaillance) ou partielle d'un actionneur agissant sur le système. Un exemple de perte totale d'un actionneur est un actionneur qui est resté "collé" sur une position entraînant une incapacité à commander le système par le biais de cet actionneur. Les défauts actionneurs partiels sont des actionneurs réagissant de manière similaire au régime nominal mais en partie seulement, c'est-à-dire avec une certaine dégradation dans leur action sur le système, (perte de puissance d'un moteur, fuite dans un vérin, . . .).

#### ***Les défauts capteurs :***

Ce type de défaut est la cause d'une mauvaise image de l'état physique du système. Un défaut capteur partiel produit un signal avec plus ou moins d'adéquation avec la valeur vraie de la variable à mesurer. Ceci peut se traduire par une réduction de la valeur affichée par rapport à la valeur vraie, ou de la présence d'un biais ou de bruit accru empêchant une bonne lecture. Un défaut capteur total produit une valeur qui n'est pas en rapport avec la grandeur à mesurer. )

### *Les défauts composants ou systèmes :*

Ce type de défaut provient du système lui-même ; bien souvent les défauts n'appartenant pas à un défaut capteur ou actionneur sont classés de manière arbitraire dans cette catégorie. Néanmoins, un défaut composant résulte de la casse ou de l'altération d'un composant du système réduisant les capacités de celui-ci à effectuer une tâche. En pratique, ceci revient à considérer une modification des caractéristiques du système proprement dit (la CTN résistance à Coefficient de Température Négatif, d'une chaufferie est cassée, un roulement est altéré, . . .).

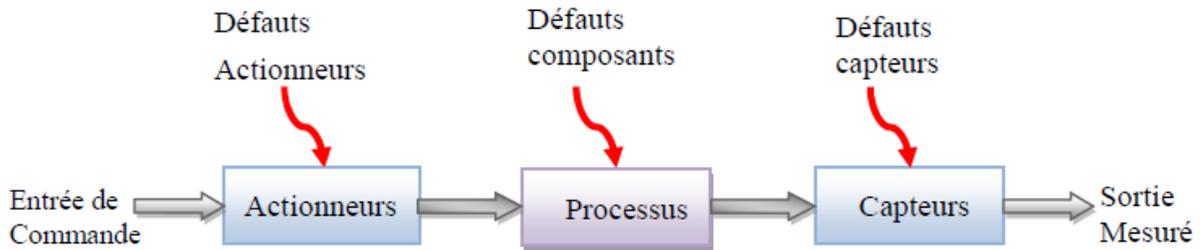


Figure I.2 Types de défauts.

Basée sur leurs influence sur les systèmes, les défauts cités ci-avant peuvent être qualifiés d'additif et multiplicatif, selon la figure (I.3) des défauts additifs s'ils affectent le comportement du procédé indépendamment des entrées connues (tels que les défauts actionneurs et défauts capteurs). S'ils affectent le procédé d'une façon dépendante des entrées connues, ils sont considérés comme étant multiplicatifs (défauts système) [Cha06], [Liu06].

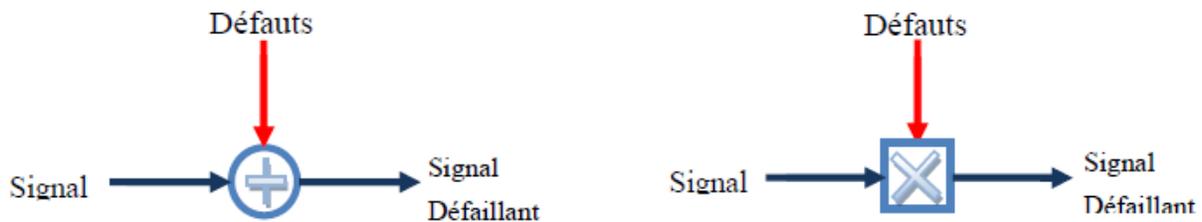


Figure I.3 Défauts additif et multiplicatif.

### *1.4.2 Selon leurs Caractéristiques temporelles*

Par ailleurs, une classification des défauts à partir de leurs évolutions temporelles les définit comme :

- Abrupts (biais): la caractéristique principale de ce type de défauts est la discontinuité dans l'évolution temporelle de la variable. Cette évolution, si elle ne correspond pas aux évolutions dynamiques normales attendues par la variable, est caractéristique d'une panne brutale de l'élément en question (arrêt total ou partiel ou déconnexion).

- Intermittentes (valeurs aberrantes): il s'agit d'un type de défauts caractéristiques de faux contacts (câblage partiellement endommagé). C'est un cas particulier de défauts abrupts avec la propriété d'un signal qui revient de façon aléatoire aux valeurs normales.
- Graduels (dérives): ce type de défaut est essentiellement caractéristique d'un encrassement ou d'une usure de pièce. Il s'agit de défauts très difficiles à détecter, car leurs évolutions temporelles sont les mêmes que celles d'une modification paramétrique lente représentant une non-stationnarité du procédé.

## I.5. MODELISATION DES DEFAUTS

Comme mentionné dans la section précédente, les défauts peuvent être représentés soit additivement soit multiplicativement. Dans cette section nous intéressons à la représentation mathématique des défauts [Lal04].

Supposons que l'on dispose d'un modèle linéaire d'un procédé sous la forme d'une représentation d'état, telle que :

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + B.u \\ y = C.x + D.u \end{cases} \quad (I.1)$$

Où  $x$ ,  $u$  et  $y$  représentant les vecteurs d'état, de commande et de sortie du système respectivement, tel que:  $x \in IR^n$ ,  $u \in IR^m$  et  $y \in IR^p$

A,B,C et D Sont des matrices de dimensions respectives  $n \times n$ ,  $n \times m$ ,  $p \times n$  et  $p \times m$ .

### I.5.1. Défauts multiplicatifs

Le modèle multiplicatif est souvent utilisé pour représenter un dysfonctionnement dans les actionneurs ou les capteurs du système [Cha06].

#### Les défauts actionneurs :

Ils sont modélisés comme des signaux additifs aux signaux d'entrée. Un dysfonctionnement dans l'actionneur est un changement brusque dans la commande nominale qui prend la forme suivante

$$u_f = u + (I - \Sigma_A) \cdot (\bar{u} - u) \quad (I.2)$$

Avec :  $\bar{u} \in IR^m$  est un vecteur qu'on ne peut pas manipuler.

$\Sigma_A = \text{diag}(\sigma_1^a, \sigma_2^a, \dots, \sigma_m^a)$  ou  $\sigma_i^a \in IR$  et  $\sigma_i^a = (1 \text{ ou } 0)$

$\sigma_i^a = 0$  représente un défaut total du  $i$ ème actionneur du système de manière à ce que le signal de commande provenant de cet actionneur devient égal au  $i$ ème élément du vecteur incontrôlable  $\bar{u}$ , c'est-à-dire  $u_f(i) = \bar{u}(i)$

$\sigma_i^a = 1$  implique que l' $i$ ème actionneur fonctionne normalement, c'est-à-dire  $u_f(i) = u(i)$

Le remplacement de la commande nominale par sa forme en cas de défaut  $u_f$  nous donne le modèle d'état (à défauts multiplicatifs) suivant :

$$\begin{cases} \dot{x} = A \cdot x + B \cdot \sum_A \cdot u + B \cdot (I - \sum_A) \cdot \bar{u} \\ y = C \cdot x + D \cdot \sum_A \cdot u + D \cdot (I - \sum_A) \cdot \bar{u} \end{cases} \quad (I.3)$$

Bien que les défauts multiplicatifs n'affectent pas directement la dynamique du système commandé lui-même; ils peuvent affecter d'une manière très significative la dynamique du système en boucle fermée et peuvent affecter même la commandabilité du système.

### Les défauts capteurs :

Ils sont modélisés par des signaux additifs aux signaux de sortie. D'une manière similaire, les défauts de capteurs représentent des mesures différentes des valeurs réelles des variables de sortie. Ils peuvent être représentés comme suit :

$$y_f = u + \left( I - \sum_s \right) \cdot (\bar{y} - y)$$

$$\sum_s = \text{diag}(\sigma_1^s, \sigma_2^s, \dots, \sigma_m^s) \text{ ou } \sigma_j^s \in \mathbb{R} \text{ et } \sigma_j^s = (1 \text{ ou } 0)$$

Si  $\sigma_j^s=0$ , il s'agit d'un défaut total du jème capteur et si  $\sigma_j^s=1$ , le jème capteur fonctionne correctement.

En cas de défauts de capteurs, le système (I.1) devient :

$$\begin{cases} \dot{x} = A \cdot x + B \cdot u \\ y = \sum_s \cdot C \cdot x + \sum_s \cdot D \cdot u + (I - \sum_s) \cdot \bar{y} \end{cases} \quad (I.5)$$

La combinaison des deux types de défauts multiplicatifs (actionneur et capteur) change le modèle (I.1) en :

$$\begin{cases} \dot{x} = A \cdot x + B \cdot \sum_A \cdot u + B(I - \sum_A) \cdot \bar{u} \\ y = \sum_s \cdot C \cdot x + \sum_s \cdot D \cdot \sum_A \cdot u + \sum_s \cdot D \cdot (I - \sum_A) \cdot \bar{u} + (I - \sum_s) \cdot \bar{y} \end{cases} \quad (I.6)$$

Le modèle multiplicatif est utilisé pour représenter la majorité des défauts de capteurs et d'actionneurs mais ce n'est pas autant pour les défauts des composants du système.

### 1.5.2. Défauts additifs

La représentation additive des défauts est plus utilisée que la représentation multiplicative, dans ce cas le système d'état prend la forme :

$$\begin{cases} \dot{x} = A \cdot x + B \cdot u + F \cdot f_f \\ y = C \cdot x + D \cdot u + E \cdot f_f \end{cases} \quad (I.7)$$

Où  $f_f \in \mathbb{R}^{n_f}$  est un signal décrivant les défauts. Cette représentation peut en principe être utilisée pour représenter une large classe de défauts y compris les capteurs, actionneurs et composants

système. Cependant, l'utilisation du modèle (I.7) induit un signal  $f_f$  dépendant de  $x$  et  $y$  et  $u$ . Par exemple, si on veut représenter additivement un défaut total dans tous les actionneurs, (mettre  $\Sigma_A = 0$  et  $\bar{u} = 0$  dans (I.2)) alors, pour avoir (I.7) équivalent à (I.3) le signal  $f_f$  doit vérifier :

$$\begin{bmatrix} F \\ E \end{bmatrix} \cdot f_f = \begin{bmatrix} B \\ D \end{bmatrix} \cdot \Sigma_A \cdot u \quad (I.8)$$

Ce qui rend  $f_f$  dépendant de  $u$  et complique par conséquent la conception du régulateur.

Les défauts capteurs et actionneurs :

En effet, supposons que le modèle :

$$\begin{cases} \dot{x} = A \cdot x + B \cdot u + f_f^a \\ y = C \cdot x + D \cdot u + f_f^s \end{cases} \quad (I.9)$$

Soit utilisé pour représenter les défauts dans les capteurs et les actionneurs. La fonction de transfert correspondante s'écrit :

$$Y = (C \cdot (C \cdot (sI - A)^{-1} \cdot B + D) \cdot u + C \cdot (sI - A)^{-1} \cdot f_f^a + f_f^s$$

A partir de cette fonction on remarque que l'effet d'un défaut d'actionneur sur la sortie peut être

Représenté par  $f_f^a$  mais aussi par  $f_f^s$ .

Un avantage des modèles additifs est que les défauts sont représentés par des signaux et non pas par des changements dans les matrices d'état du système, comme c'est le cas pour la représentation multiplicative. C'est pour cela que la majorité des méthodes FDD se basent sur la représentation additive [Kon96].

Les défauts composants :

Les défauts des composants du système sont les plus rencontrés car ils incluent pratiquement tout changement dans quelque élément que ce soit du système. Ils ont été définis dans la section I.4 comme la classe de tous les défauts qu'on ne peut pas qualifier par défauts de capteurs ou d'actionneurs. Ces défauts provoquent des changements dans toutes les matrices de la représentation d'état du système car celles-ci dépendent pratiquement des mêmes paramètres physiques subissant un changement. Les défauts de composants système sont en général modélisés sous la forme d'un système à paramètres variables.

$$\begin{cases} \dot{x} = A(f) \cdot x + B(f) \cdot u \\ y = C(f) \cdot x + D(f) \cdot u \end{cases} \quad (I.10)$$

Où  $f \in \mathbb{R}^{n_f}$  est un vecteur décrivant les défauts.

## I.6. MODELISATION DES PERTURBATIONS

En plus des défauts, le système peut être soumis à d'autres signaux dits entrées inconnues (perturbations et bruits), ainsi qu'à des incertitudes de modélisations. Si l'influence de ces signaux sur le système est connue, alors il est possible de réécrire les équations précédentes sous la forme suivante :

$$\begin{cases} \dot{x} = A(f).x + B(f).u + f_f^a + F.d_a(t) \\ y = C(f).x + D(f).u + f_f^s + E.d_s(t) \end{cases} \quad (I.11)$$

Où  $d_a(t) \in IR^{d \times 1}$  et  $d_s(t) \in IR^{p \times 1}$  représentent respectivement les perturbations et bruits agissant sur le système. La matrice F est dite matrice de distribution de  $d_a(t)$ .

L'origine des perturbations est souvent due à une modélisation imparfaite du système, engendrant une action non connue sur ce dernier. Les perturbations font l'objet de caractéristiques particulières. Lorsque ces dernières sont d'ordre statistique, le système est dit bruyant. Cet axe de recherche (stochastique) est particulier et a fait l'objet de peu d'études [Jam03]. L'étude en cours prend en compte le cas des perturbations déterministes.

Pour des raisons de simplicité, il est possible de mettre le système (I.11) sous la forme :

$$\begin{cases} \dot{x} = A.x + B.u + F_d.d_d + F.f_f \\ y = C.x + D.u + E_d.d_d + E.f_f \end{cases} \quad (I.12)$$

$$F_f = [B \ H \ O_{n \times p}], F_d = [F \ O_{n \times p}], E_f = [O_{p \times m} \ O_{p \times c} \ I_{p \times p}], E_d = [O_{p \times d} \ I_{p \times p}], d_d = [d_a \ d_s]^T \in IR^q$$

$$\text{Et } f_f = [f_a \ f_s \ f_p]^T \in IR^5.$$

Les matrices  $I_{p \times p}$  et  $O_{n \times p}$  sont respectivement la matrice identité de dimension  $p \times p$  et la matrice nulle de dimension  $n \times p$ .

Généralement, dans les problèmes de détection et de localisation des défauts, c'est cette dernière modélisation qui est prise en compte. Cependant, il faut signaler que selon le contexte, les objectifs du diagnostic, les techniques utilisées et bien d'autres critères, ce modèle peut différer de façon à adapter aux exigences. Par exemple, pour résoudre le problème de détection et de localisation des défauts, il est possible de décomposer le vecteur défaut en des défauts que l'on désire détecter et qui constitueront alors le vecteur  $f_f$  et les défauts que l'on ne veut pas détecter et que l'on regroupera dans le vecteur  $d_d$ .

Pour être exploitable, au vu des objectifs de commande, le modèle doit traduire au mieux le comportement du système. Cependant, la précision d'un modèle est généralement obtenue au détriment de sa simplicité. Le choix entre ces deux modèles est difficile à effectuer.

Les modèles linéaires pour lesquels de nombreuses méthodes de traitement sont connues mais possédant une plage de fonctionnement limitée.

Les modèles non linéaires d'utilisation complexe mais possédant un domaine de validité étendu [Lal04].

Ensuite, nous allons faire un état de l'art des principales commandes tolérantes aux défauts (FTC). Il est question de rappeler les différents concepts et définitions relatifs à ce domaine, de présenter les approches existantes ainsi, quelques méthodes de commandes tolérantes aux défauts.

## **I.7.ÉTAT DE L'ART DES SYSTEMES FTC**

Un système de commande tolérant aux défauts est un système capable de maintenir la stabilité et un certain degré de performance en présence de défauts [Pat97]. On distingue deux approches : passive et active. Dans l'approche passive on utilise les techniques du contrôle robuste [Cie07], [Nie05] de manière à ce que le système en boucle fermée reste insensible à un ensemble connu des défauts [Ete85], [Che01]. Cette approche ne nécessite aucun schéma de détection de défauts ni aucune reconfiguration de loi de commande n'est donc du point de vue calcul plus attractive. Mais son applicabilité est très limitée à cause de ses désavantages:

1. Les défauts sont alors pris en compte dans la conception du système de commande. Le contrôleur est donc robuste aux défauts prescrits (sa capacité de tolérance reste restreinte à quelques défauts).
2. Assurer la robustesse vis à vis des défauts, ne peut se faire sans réduire les performances nominales du système. Comme les défauts sont des phénomènes qui arrivent rarement, il n'est pas raisonnable de dégrader les performances nominales du système pour un ensemble très réduit de défauts.
3. Dans des conditions pratiques, l'utilisation seule de la commande robuste peut être risquée. Comme un régulateur inintelligent, sans utilisation de module de diagnostic et sans connaissance sur l'occurrence de défaut (sa sévérité, sa localisation, . . .), le système passif a alors une faible capacité de tolérance aux défauts.

A l'opposé de la voie passive, l'approche active réagit „ activement “ sur les défauts en reconfigurant la loi de commande de manière à maintenir la stabilité et les performances du système [Dia02]. Cette approche permet alors de traiter des défauts imprévus mais nécessite une technique de détection et d'isolation de défauts (FDD) et une méthode de reconfiguration de la loi de commande comme le montre La figure (I.4) qui présente un schéma typique de systèmes de commande tolérante aux défauts [Cie07], [Pat97] avec 4 principaux composants : un bloc de diagnostic de défauts (en anglais Fault Detection and Diagnosis, FDD) donnant des informations en temps réel, un mécanisme de reconfiguration, un régulateur reconfigurable et une référence appliquée au système. Dans le schéma de FDD, les paramètres en défaut ainsi que les variables d'état du système doivent être estimés en ligne. Ce schéma de FDD doit permettre de prendre en compte les différents types de défauts intervenant sur le système et d'assurer la fiabilité de ses informations pour activer le mécanisme de reconfiguration en un temps minimal. A partir de cette information en ligne produite par le module de FDD, le régulateur reconfigurable doit être synthétisé automatiquement pour maintenir la stabilité et la dynamique du système ainsi que ses

performances initiales. De plus, afin d'assurer que le système en boucle fermée soit capable de suivre la commande de référence/trajectoire spécifiée même en présence de défauts, un régulateur "feedforward" reconfigurable doit pouvoir être synthétisé pour réaliser un asservissement. Dans le cas de dégradation de performances du système, la commande de référence doit permettre d'ajuster l'entrée de commande ou la trajectoire de référence automatiquement ou informer les opérateurs humains de la présence de défauts [Rod05].

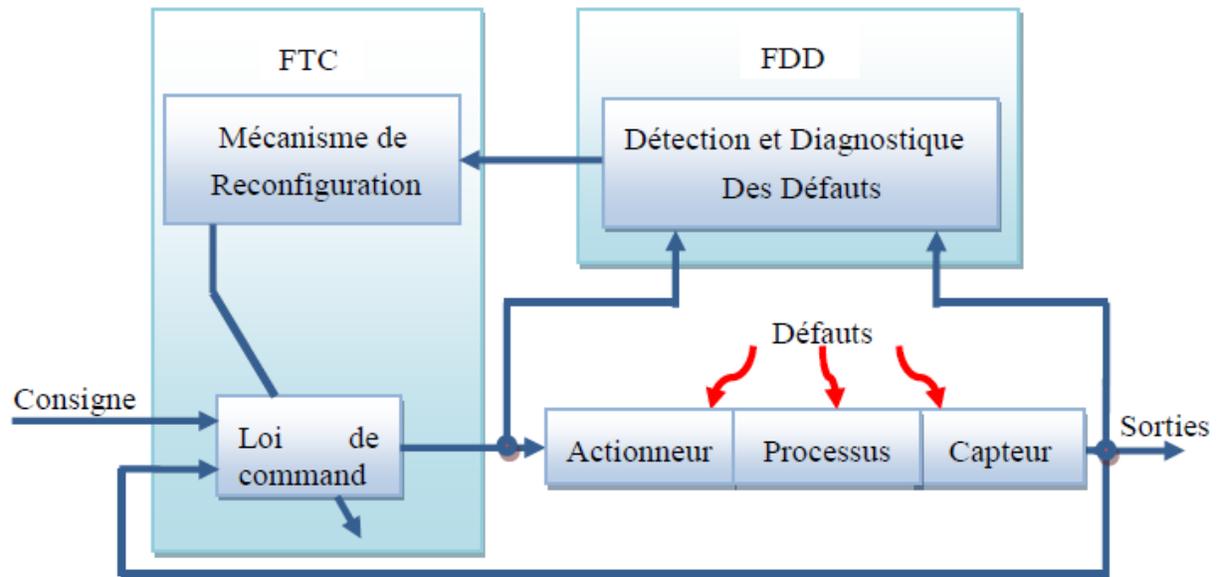


Figure I.4 Schéma de principe d'une loi de commande FTC active.

Comme nous avons dit, les approches FTC sont divisées en deux classes : les approches passives et les approches actives [Yen03], [Kan04]. Voir la figure (I.5) Les méthodes actives sont généralement classifiées en deux sous classes : l'accommodation de défauts, et la reconfiguration du système [Nie05].

Lorsque l'on parle de reconfiguration du système, la structure du système à contrôler est modifiée de façon à compenser l'effet du défaut (utilisation de redondance matérielle, logicielle...). En d'autres termes, les entrées/sorties entre la loi de commande et le système à contrôler sont modifiées à travers un changement des paramètres et de la structure de la loi de commande.

Lorsque l'on parle d'accommodation de défauts, les entrées/sorties entre la loi de commande et le système à commander restent inchangées. Dans le cadre de l'accommodation de défauts, on distingue les méthodes à base de projection, des méthodes de reconception en ligne. Dans les méthodes à base de projection, il s'agit de sélectionner la loi de commande adéquate à partir d'un ensemble de correcteurs précalculés hors ligne. Les méthodes de reconception en ligne impliquent un calcul en ligne des paramètres du correcteur (commande reconfigurable) ou une nouvelle synthèse de la loi de commande modifiant ainsi la structure et les paramètres de cette dernière (commande restructurable). La classification précédente est résumée sur cette figure.

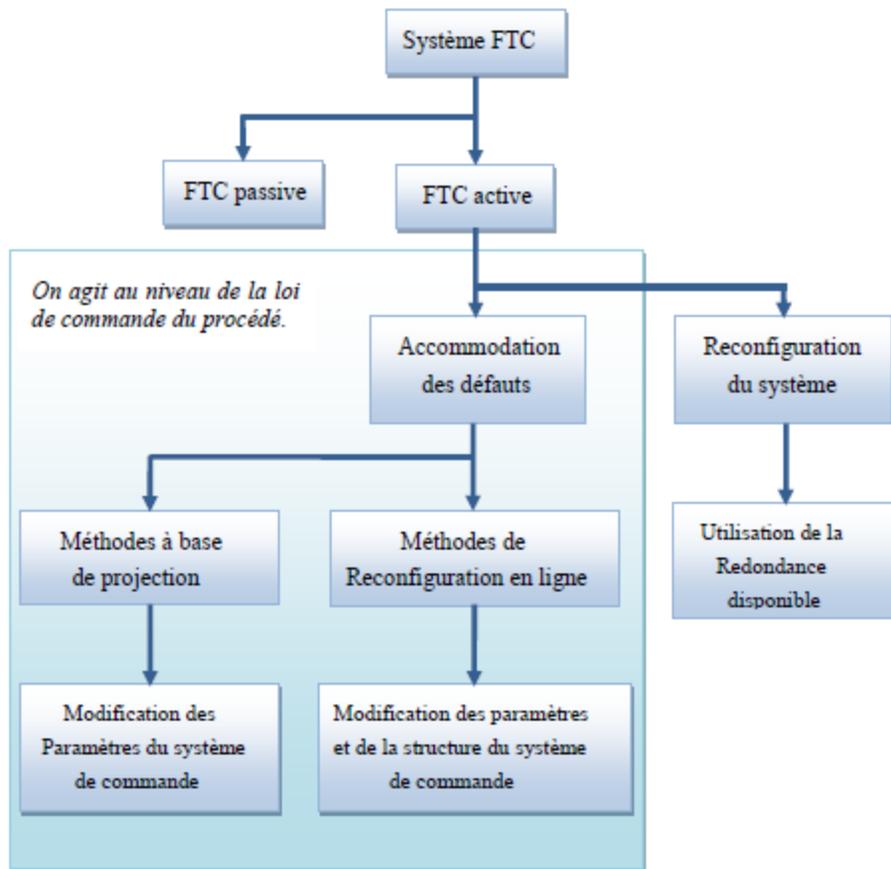


Figure I.5 Classification des approches FTC.

On rencontre plusieurs problèmes lors de la conception d'un système FTC actif :

1. Le problème majeur dans cette approche consiste en la limitation du temps disponible pour recalculer la loi de commande à chaque instant de détection d'un défaut.
2. Ainsi le problème le plus important, est probablement l'intégration des blocs FTC et FDD du système. La majorité des approches dans la littérature se concentrent sur l'une de ces deux parties en considérant que l'autre est absente ou qu'elle est parfaite. Pour être plus spécifique, d'une part, plusieurs algorithmes FDD ne considèrent pas le système en boucle fermée et d'autre part, plusieurs méthodes FTC supposent que l'estimation des défauts par le bloc FDD est parfaite. Il est très important de réaliser l'une des deux parties en considérant la présence et l'imperfection de l'autre. Si le bloc FDD fournit des informations que le bloque FTC ne comprend pas, elles seront mal-interprétées et on risque de perdre la stabilité du système.
3. Dans le cas stochastique, ce type d'approche engendre aussi un autre problème très peu étudié dans le contexte déterministe. Lors qu'un défaut apparaît, au départ, il n'y a pas assez d'informations en terme d'entrées sorties système alimentant le bloc FDD, et ce dernier n'est pas capable de diagnostiquer le défaut. Pour cette raison Le bloc FTC doit supporter les incertitudes dans les estimations du bloc FDD et assurer au moins la stabilité durant la période transitoire nécessaire pour le diagnostic du défaut.
4. Très souvent, pour représenter les dynamiques des systèmes physiques réels, les modèles

linéaires manquent de précision et on doit utiliser les modèles non linéaires. Ceci nécessite le développement de techniques FTC capables de traiter explicitement les non-linéarités dans les représentations mathématiques des systèmes.

5. Un autre problème très important est qu'un système commandé en temps réel, possède une saturation dans le signal de commande, c'est-à-dire que le signal d'entrée ne doit pas dépasser une certaine valeur. On doit donc concevoir une commande qui n'est pas active au-delà des limites de la saturation dans des conditions normales. Cependant, les défauts peuvent ramener le signal de commande au-delà des limites de saturation.

## **I.8.CONCLUSION**

Dans ce premier chapitre, nous avons donné un état de l'art des principales commandes tolérantes aux défauts pour amener et justifier les choix et l'orientation de ce mémoire. Il est question donc de rappeler les différentes notions théoriques, définitions et concepts relatifs à ce domaine. Aussi, nous avons données une revue sur un certain nombre de travaux de recherche effectués dans ce domaine. Chaque méthode de commande FTC a fait l'objet d'une discussion avec ses avantages et ses inconvénients.

# Chapitre II

## DETECTION DES DEFAUTS D'UN CSTR

## 2.1 Introduction:

Le réacteur continue parfaitement agité (CSTR) est un cas limite fréquemment utilisé lorsque l'on peut considérer approximativement que les variables intensives d'un réacteur chimique, température, concentration d'un constituant donné, pression..., sont identique en tout point du réacteur et conservant leurs valeurs dans le courant de sortie.

Un système de mélangeur effectue le mélange entre composants de base et produits et une homogénéité satisfaisante des propriétés physico-chimiques de la mixture. Le système est dit à paramètres localisés.

Comme le dépassement d'une température ou d'une concentration critique peut faire s'accélérer la réaction entraînant le dégagement d'un flux de chaleur supérieur aux capacités de refroidissement de la réaction et provoquant l'inflammation du milieu réactionnel, l'utilisation d'un système de diagnostic de défauts devient une nécessité.

Dans cette partie, nous considérons exclusivement les défauts capteur qui peuvent affecter un CSTR.

## 2.2 : Description du CSTR :

Le réacteur étudié est siège d'une réaction d'ordre 1 :  $A \rightarrow B$ , fournissant une chaleur de réaction  $\Delta H$ . le réacteur est entouré d'une double enveloppe (indice 'c') de volume constant  $V_c$  traversé par un fluide a débit constant  $q_c$  avec une température d'entrée  $T_{c,in}$  constante.

Le modèle dynamique de ce réacteur est sous forme d'un système non linéaire mono-entrée multi-sorties, affine en la commande, donnée par :

$$\begin{cases} \frac{dc_a}{dt} = \frac{F}{V} (C_{ain} - C_a) - K_0 C_a \exp\left(\frac{-E}{RT}\right) \\ \frac{dT}{dt} = \frac{F}{V} [T_0 - T] - \frac{K_0 C_a}{\rho C_p} (\Delta H) \exp\left(\frac{-E}{RT}\right) + \frac{q_c}{V} \left\{ 1 - \exp\left(\frac{-hA}{q_c \rho C_p}\right) \right\} (T_c - T) \end{cases}$$

(2.1)

$$Y = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}$$

- $x_1 = C_A$  : concentration de A dans le CSTR.
- $x_2 = T$  : température du réacteur.

Les natures et les données numériques de tous les paramètres, ainsi que les dimensions du réacteur sont donnés dans l'annexe.

### 2.3 Modélisation des défauts :

Grace à une manipulation mathématique conduisant à une augmentation d'état, les défauts capteurs qui peuvent affecter le CSTR sont intégrés au niveau des équations d'état du système.

Les défauts capteur ( $f_{c1}, f_{c2}$ ) sont modélisés comme signaux additif aux signaux de sortie.

Le modèle complet du système est donné par :

$$\begin{cases} \frac{dc_a}{dt} = \frac{F}{V} (C_{ain} - C_a) - K_0 C_a \exp\left(\frac{-E}{RT}\right) \\ \frac{dT}{dt} = \frac{F}{V} [T_0 - T] - \frac{K_0 C_a}{\rho C_p} (\Delta H) \exp\left(\frac{-E}{RT}\right) + \frac{qc}{V} \left\{ 1 - \exp\left(\frac{-hA}{qcPC_p}\right) \right\} (T_c - T) \end{cases} \quad (2.2)$$

$$Y = \begin{bmatrix} x_1 + f_{c1} \\ x_2 + f_{c2} \end{bmatrix}$$

### 2.4 Synthèse d'observateurs :

Les défauts capteurs sont détectables car ils influencent directement les sorties.

Après avoir mis le système (2.2) sous la forme :

$$\dot{x} = Ax + f(x, u)$$

$$Y = Cx + \begin{bmatrix} f_{c1} \\ f_{c2} \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

➤ (A, C) une paire observable et L le gain de l'observateur.

Les observateurs mis en œuvre sont sous la forme :

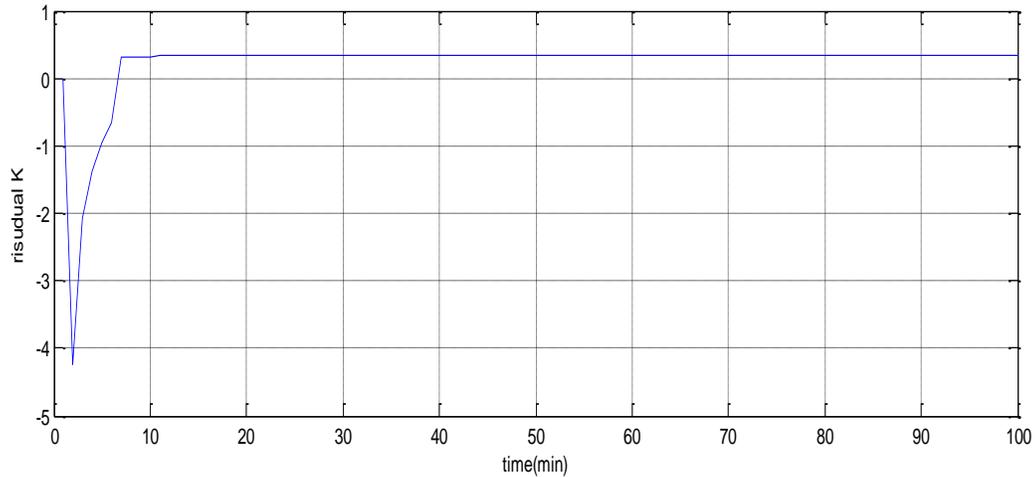
$$\dot{\hat{x}} = A\hat{x} + f(\hat{x}, u) + L(y - C\hat{x}) \quad (2.4)$$

## 2.5 SIMULATION :

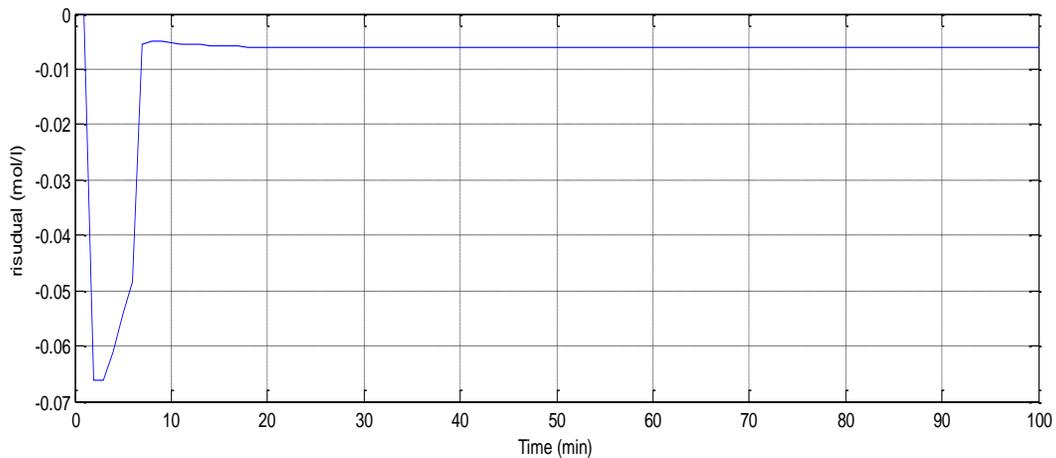
Le défaut capteur apparaît à l'instant  $t=0$ .

Les variations paramétriques considérées sont des variations de 10 % de  $K_0$ .

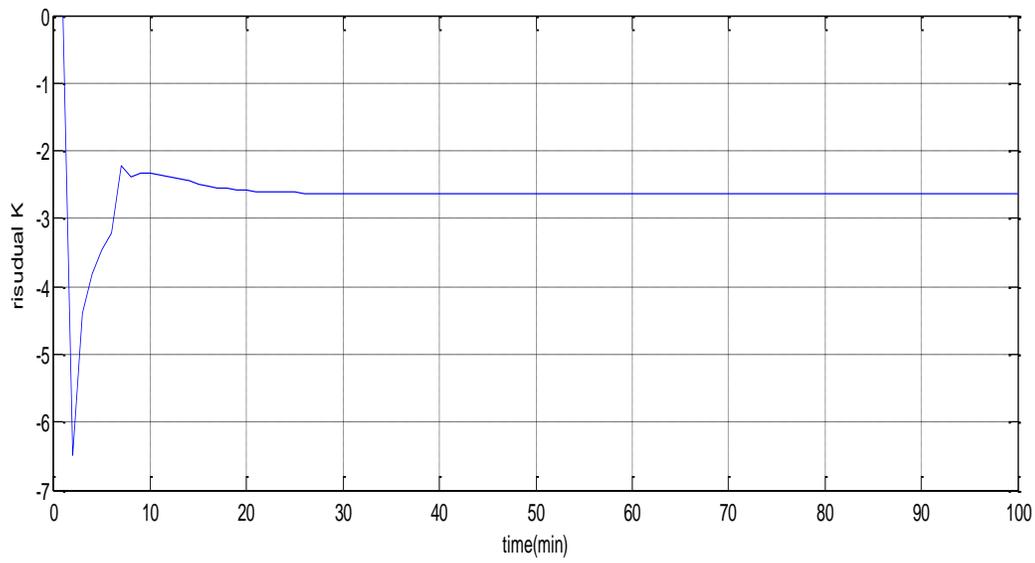
La variation sur la température initiale est égale à 0.6 % de  $T_0$ .



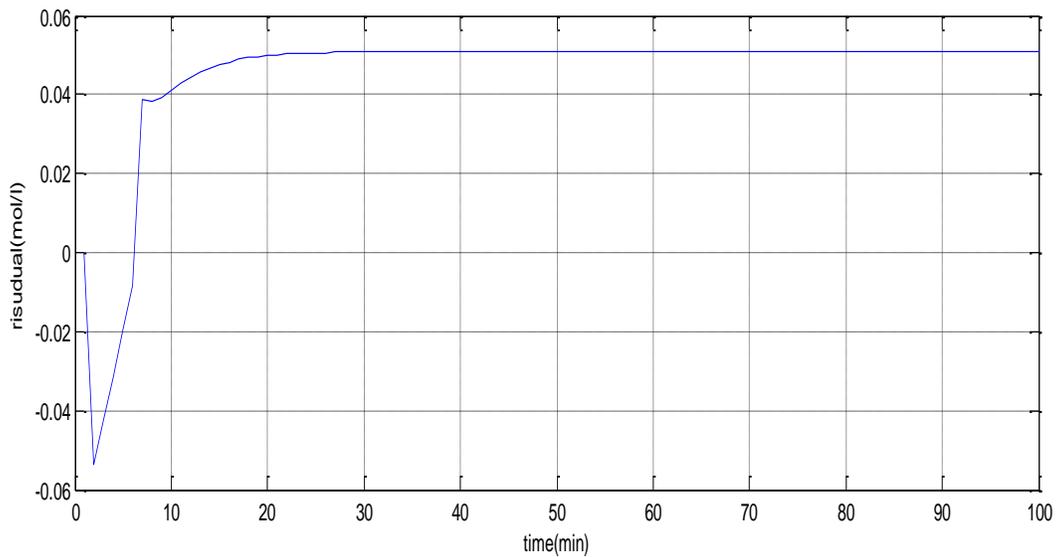
**Figure (2.1) résidu en absence de variation paramétrique et avec variation sur la température initiale et avec défaut capteur de température.**



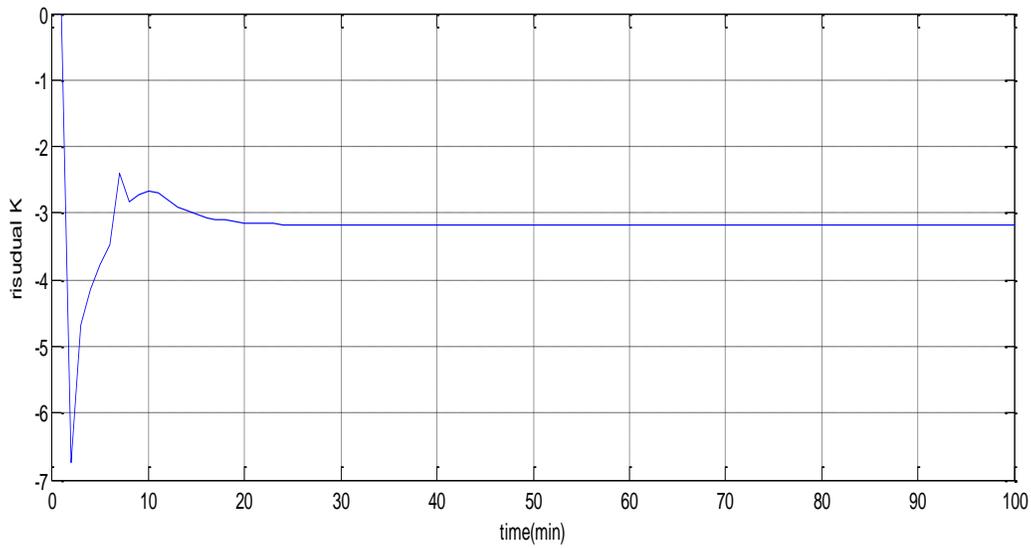
**Figure (2.2) résidu en absence de variation paramétrique et avec variation sur la température initiale et avec défaut capteur de concentration.**



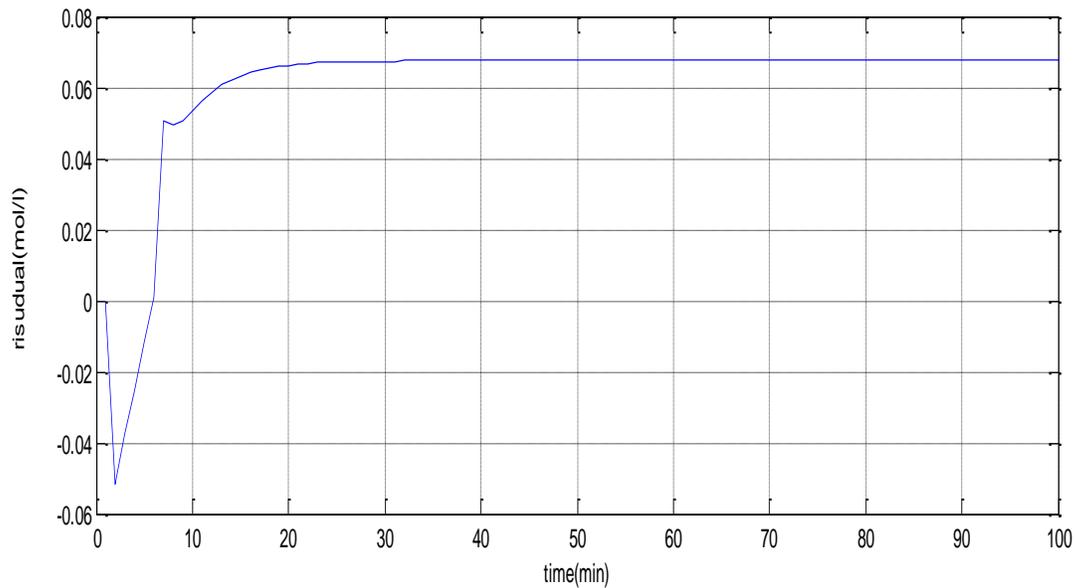
**Figure (2.3) : résidu en présence de variation paramétrique et défaut capteur de température et en présence de variation sur la température initiale.**



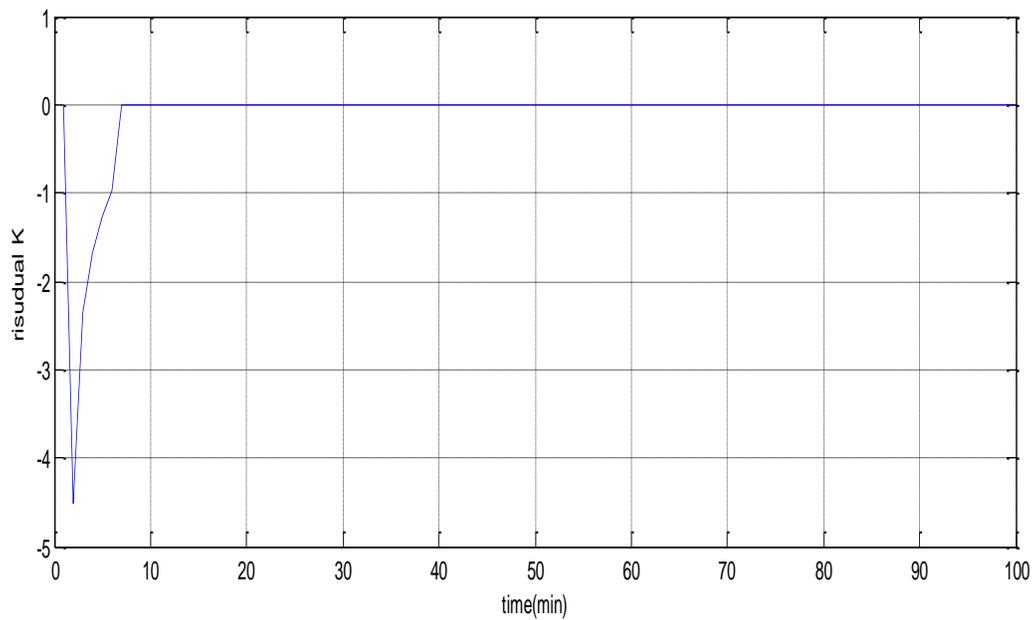
**Figure (2.4) : résidu en présence de variation paramétrique et défaut capteur de concentration et en présence de variation sur la température initiale.**



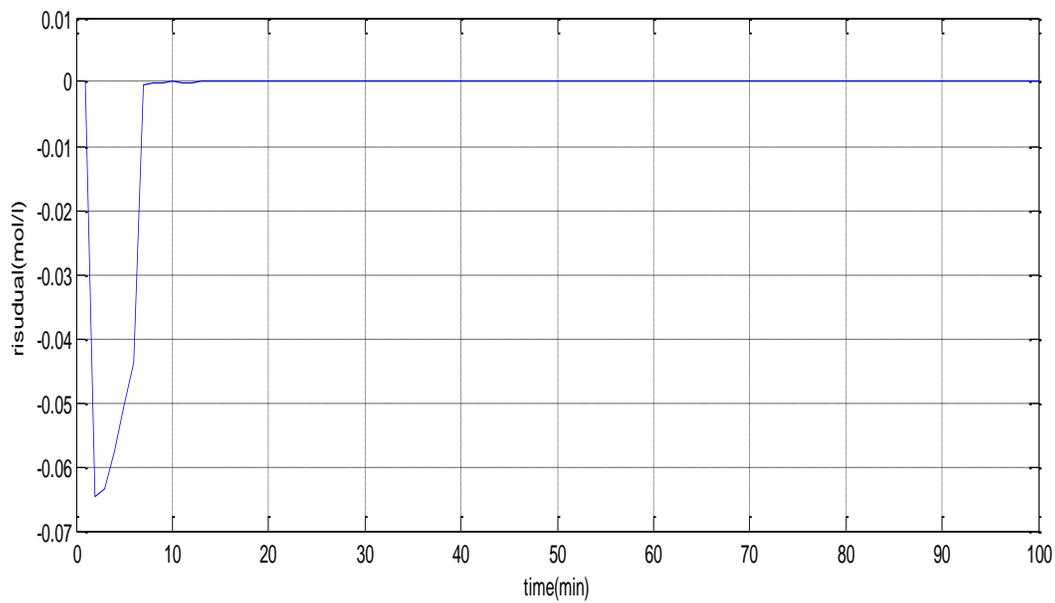
**Figure (2.5) résidu en présence de variation paramétrique et défaut capteur de température et en absence de variation sur la température initiale.**



**Figure (2.6) résidu en présence de variation paramétrique et défaut capteur de concentration et en absence de variation sur la température initiale.**



**Figure (2.7) résidu en présence de défaut capteur de température .**



**Figure (2.8) résidu en présence de défaut capteur de concentration.**

**Commentaire :**

On constate les propriétés suivantes :

- Les différents types de défauts : capteur, variation paramétrique, variation sur la température initiale sont tous détectables.
- Les différents résidus issus de différentes combinaisons des défauts se stabilisent.
- La variation paramétrique influe beaucoup sur la rapidité de convergence des résidus.

**2.6 Conclusion :**

Dans ce chapitre nous avons étudié les différents résidus issu de différentes combinaisons des défauts capteurs, variation paramétrique et variations de  $T_0$ .

Nous avons utilisé l'observateur non linéaire, qui utilise les mesures de la concentration et de la température pour générer le vecteur d'état.

### **CONCLUSION GENERALE**

Ce Mémoire a pour objectif l'application de méthodes de détection de défauts à base d'observateurs non linéaire au réacteur chimique CSTR.

Le premier chapitre présente les concepts fondamentaux du diagnostic de défauts.

Le dernier chapitre est consacré au diagnostic du réacteur continu parfaitement agité CSTR par des observateurs non linéaires.

L'observateur de défaut permet de résoudre certains problèmes inhérents aux réacteurs chimiques tels que la détection des défauts.

Enfin, si un observateur non linéaire peut être mis en œuvre à la base du modèle physico-chimique d'un réacteur, et qui permet de satisfaire les contraintes de diagnostic, son prix sera dérisoire par rapport au cout d'un capteur de surveillance, ou par rapport au prix d'une catastrophe dans une usine de produits chimiques.

### Annexe

#### CSTR :

Débit d'entrée  $F = 100 \text{ L/Min}$  ; Concentration d'entrée  $C_{ain} = 1 \text{ Mol/L}$  ;

Température d'entrée  $T_0 = 350 \text{ K}$  ; Température de la chemise  $T_{c0} = 350 \text{ K}$  ;

Volume du réacteur  $V = 100 \text{ L}$  ; Terme de transfert de chaleur  $h_a = 7 \times 10^5 \text{ Cal/ (min K)}$  ;

Constante de réaction  $k_0 = 7.2 \times 10^{10} \text{ Min}^{-1}$  ; activation  $E/R = 10^4 \text{ K}$  ;

Taux de génération  $\Delta H = -2 \times 10^5 \text{ Cal/Mol}$  ; Masse volumique  $\rho = 10^3 \text{ g/L}$  ;

Capacité calorifique  $C_p = 1 \text{ Cal/ (g K)}$  ; Débit dans la chemise  $q_c = 100 \text{ L/Min}$  ;

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

[Aim03]

M. Aimé, « Évaluation et optimisation de la bande passante des convertisseurs statiques: Application aux nouvelles structures multicellulaires » Thèse de Doctorat, INPT, Toulouse, 2003.

[All06]

A. Amina, « Diagnostic des défauts par observateurs non linéaire : Application aux processus chimiques » Thèse de magister, ENP, Alger, 2006

[Bal02]

A. Balluchi, L. Benvenuti, S.M. Di Benedetto, A. Sangiovanni-Vincentelli “Design of observers for hybrid systems” In Hybrid Systems: Computation and Control, volume 2289 of LNCS, 2002.

[Ban81]

S. P. Banks, « A note on nonlinear observers », International Journal of Control, IJC, Vol. 34, 1981.

[Bar07]

J.P. Barbot, H. Saadaoui M. Djemai, N. Manamanni, « Nonlinear observer for autonomous switching systems with jumps », Nonlinear Analysis Hybrid Systems Applications, V. 1, N° 4, pp. 537-547. 2007.

[Bar06]

J.P. Barbot, H. Saadaoui M. Djemai, N. Manamanni « Nonlinear observer for autonomous switching systems with jumps », The International conference of hybrid system and applications, University of Louisiana Lafayette, LA, USA, 2006.

[Bel07]

Belkheiri. M, Boudjema. F. “Backstepping control of an Induction machine augmented by a Neural network,” proceeding of SSD’07, Volume I: Conference on Systems Analysis & Automatic Control, Hammamet, Tunisia, Mar 2007.

[Ben10d]

B. Beltran, M. Benbouzid, T.Ahmed-Ali , **O.Benzineb**, „ Commande par mode glissant d’ordre supérieur et observateur grand gain de la génératrice asynchrone double alimentation d’une éolienne”, Conférence Internationale Francophone d’Automatique, 2-4 Juin, Nancy CIFA’2010.

[Ben07]

K. Benmansour, A. Benalia, M. Djemai, J. de Leon, « Hybrid Control of a Multicellular Converter », in Nonlinear Analysis : Hybrid systems1, pp. 16–29, 2007.

[Ben08]

K. Benmansour, M. Djemai, M. Tadjine and M. S. Boucherit, «On Observability and Hybrid Observers Design for Three Cells Converter: Experimental results », In proc. of the 10th , IFAC International Workshop on Variable Structure Systems, VSS-08 , Antalya, Tukey , 2008.

[Ben01]

R.Bensaid, «Observateurs des tensions aux bornes des capacités flottantes pour les convertisseurs multicellulaires série » Thèse de Doctorat, INPT, Toulouse, 2001.

[Ben10a]

**O. Benzineb**, H. Salhi, M. Tadjine, M.S Boucherit and M.E.H. Benbouzid, „A PI/Backstepping Approach for Induction Motor Drives Robust Control”, International Review of Electrical Engineering, vol 5,N°2,Part A, April 2010 .

[Ben10c]

**O. Benzineb**, H. Salhi, M. Tadjine, M.S Boucherit and M.E.H. Benbouzid, „Induction Motor Robust Control by Means of a PI/Backstepping Approach and a High-gain Observer”, ICIEM 10, May9-10, Batna, 2010 .

[Ben10d]

**O. Benzineb**, H.Mekki, D.Boukhetala, M. Tadjine, M.S Boucherit, M. Benbouzid, and D.Diallo

## BIBLIOGRAPHIE

---

- „Commande Robuste Tolérante aux défauts d’un moteur Asynchrone“, ICIEM 10,May9-10, Batna,2010 .
- [Ben10j]**  
**O. Benzineb**, K Benmansour, M. Tadjine, M.S Boucherit and M.E.H. Benbouzid,  
„Sliding Mode Sensorless Induction Motor Drives for Electrical Vehicle Drive“, EFEEA’10 2-4 Nov, Ghardaia,2010(Accepté) .
- [Ben10f]**  
**O. Benzineb**, H. Mekki, D. Boukhetala, M. Tadjine, M.S Boucherit,  
„Implicit fault Tolerante Control Technique Based Backstepping :Application to Induction Motor“, ICEE 10,Oct 11-13, Batna,2010 .(Accepté)
- [Ben10b]**  
**O. Benzineb**, M. Tadjine, M.S Boucherit and M.E.H. Benbouzid,  
„Proportionnal-Integral/Backstepping control High-gain Observer for Induction Motor Drives“, Electromotion, vol 17,N°2,April 2010
- [Ben08b]**  
**O. Benzineb**, K. Benmansour, M.S. Boucherit, M.Tadjine, „A New Hybrid Modeling and Observer Synthesis: Application to converters “, 5th International Conference on Electrical Engineering CEE’08, Batna 27-29 Oct 2008.
- [Ben08a]**  
**O. Benzineb**, K. Benmansour, M.S. Boucherit, M. Tadjine and M. Djemai, „Real Time Evaluation of Adaptive / Hybrid Observer For Tree Cells Converter“, The mediterranean journal of measurement and control, Vol. 4, No.2, April 2008.
- [Ben08c]**  
**O. Benzineb**, K. Benmansour, M. Djemai, M.S. Boucherit, M.Tadjine, „Observateur a Mode Glissant d’ordre Supérieur des Convertisseurs Multicellulaires“, ICEEE’08,2nd International Conference on Electrical and Electronics Engineering 21-23 April 2008, Laghouat.
- [Ben05]**  
D. Kouchih, **O. Benzineb**, M.S. Boucherit, M. Tadjine, „Diagnostic des Défauts d’une Machine Asynchrone par Observateur“, SISEM’05, Annaba, Nov. 2005.
- [Ben06]**  
D. Kouchih, **O. Benzineb**, M.S. Boucherit, M. Tadjine, „Simulation des défauts de courts-circuits d’une Machine Asynchrone triphase“, IMES 06, Djelfa, Octobre. 2006.
- [Bes02]**  
G. Besançon « Observateurs non linéaires et applications (Identification, Commande, Diagnostic) », Habilitation à Diriger des Recherches, janvier 2002.
- [Bet05]**  
O. Bethoux, «Commande et détection de défaillance d’un convertisseur multicellulaire série ». Thèse de doctorat, Ecole Doctorale , Université de Cergy-Pontoise. 2005.
- [Bir06]**  
A. Birouche, «Contribution sur la synthèse d'observateurs pour les systèmes dynamiques hybrides ». Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Lorraine, 2006.
- [Bla06]**  
M. Blanke, M. Kinnaert, J. Lunze, M. Staroswiecki, « Diagnosis and Fault-Tolerant Control», Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg, 2006.
- [Boi07]**  
I. Boiko, L. Fridman, A. Pisano, and E Usai. “Analysis of chattering in systems with second order Sliding Modes”, IEEE Transactions on Automatic Control,v 52, no. 11, 2007.
- [Bos06]**  
B. K. Bose, « Modern Power Electronics and AC Drives », Prentice-Hall, 2002.
- [Cha07]**  
Chaouch. S, Herizi. A, Serrai. H, Naït-Saïd. M.S. “Lyapunov and Backstepping Control Design of Induction Motor System,” proceeding of SSD’07, Volume II: Conference on Power Electrical Systems, Hammamet, Tunisia, Mars 2007.

## BIBLIOGRAPHIE

---

**[Des05]**

E. De Santis, M. D. Di Benedetto, S. Di Gennaro, and G. Pola, « Design of luenberger-like observers for detectable switching systems », Proceeding of the 2005 international symposium on intelligent control, Limassol, Cyprus, 2005.

**[Dje05]**

M. Djemai, N. Manamanni and J.P. Barbot « Sliding Mode Observer For Triangular Input Hybrid System » Proc. of IFAC World Congres, Praha. 2005

**[Dje07]**

M. Djemai, N. Manamanni, H. Saadaoui « Observer design for a class of hybrid discrete-continuous systems with jumps », Conference on Systems and Control ,CSC, Marrakech, Morocco. 2007

**[Don00]**

A. Donzel. « Commande des convertisseurs multiniveaux : Application `a un moteur asynchrone » Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble, 2000.

**[Ell02]**

G. Ellis, « Observers in Control Systems », Elsevier Science, 2002.

**[Feu78]**

A. Feurer, A.S. Morse, “Adaptive control of single-input, single-ouput linear systems,” IEEE Trans on Automatic Control, Vol. 23(4), 1978.

**[Flo00a]**

T. Floquet, W. Perruquetti, and J.P. Barbot, « Second order sliding mode control for induction motor », 39th Proceedings of Conference on Decision and Control, 2000.

**[Flo00b]**

T. Floquet, «Contribution à la commande par modes glissants d’order superieur ». Thèse de doctorat, Universite des sciences et technologies de Lille, 2000.

**[Flo07]**

T. Floquet, and J.P. Barbot, « Super twisting algorithm based step-by-step sliding mode observers for nonlinear systems with unknown inputs », International Journal of Control, IJC, 2007.

**[Fri08]**

L. Fridman, Y. Shtessel, C. Edwards and Xing-Gang Yan, ”Higher-order sliding-mode observer for state estimation and input reconstruction in nonlinear systems”, International Journal of Robust and Nonlinear Control 18(4-5):399-413, 2008.

**[Gat01]**

G. Gateau, Th. Meynard, L. Delmas, H. Foch, « Stacked Multi-cell converter : topology and control » EPE Journal, V.12, N°2, 2001, pp 14-18, 2001

**[Gat02]**

G. Gateau et all. «Multicell Converters: Active Control and Observationof Flying-Capacitor Voltages». IEEE transaction on industrial electronics, V.49, N°5, pp 998\_1008, 2002.

**[Gau01]**

J.P. Gauthier, I. Kupka, « Deterministic observation theory and applications», Cambridge University Press, 2001.

**[Gha09]**

M. Ghanes, J-P. Barbot, ,,,„On sliding mode and adaptive observers design for multicell converter““, accepted at IEEE American Control Conference 2009.

**[Goe09]**

R.Goebel, R. Sanfelice, A. Teel, “Hybrid dynamical systems”. Control Systems Magazine, IEEE Volume 29, Issue 2, pp:28 – 93, April 2009 :

**[Goe04]**

R.Goebel, J. Hespanha, A.R. Teel, C. Cai, R. Sanfelice “Hybrid systems: generalized solutions and robust stability”. Proceedings of IFAC, Nolcos, 2004.

## BIBLIOGRAPHIE

---

**[Ham04]**

A. Hamzaoui, N. Essounbouli, K. Benmahammed et J. Zaytoon, « State observer based robust adaptive fuzzy controller for nonlinear uncertain and perturbed systems » IEEE transactions on systems, man and cybernetics, part B, 34(2):942-950, 2004.

**[Kan91]**

I. Kanellakopoulos, P.V. Kokotovic, A.S. Morse, “Systematic design of adaptive controllers for feedback linearizable systems, ” IEEE Trans on Automatic Control, Vol. 36(11), 1991.

**[Kok89]**

P.V. Kokotovic, H.J. Sussmann, “A positive real condition for global stabilization of nonlinear systems” Systems & Control Letters Vol. 13, 1989.

**[Lie06]**

A.M. Lienhardt, « Etude de la Commande et de l’Observation d’une Nouvelle Structure de Conversion d’Energie de type SMC ». Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, 2006.

**[Man05]**

N. Manamanni, « Contribution a la commande et l’observation des système non linéaires et hybride » Habilitation a diriger des recherche, université de Reims 2005.

**[Mey02]**

Th. Meynard, H. Foch, F. Forest, Ch. Turpin, F. Richardeau, L. Delmas, G.Gateau, E.Lefeuvre « Multicell converters: Derived topologies » IEEE transactions on Industrial Electronics, V.49, N°.5, pp.978-987, Special Issue on Multilevel converters, Octobre 2002.

**[Mey06]**

Th. Meynard, « Flying capacitor Multicell converters with reduced storedenergy », IEEE, Montreal, Quebec, Canada, pp. 914-918, ISIE 2006.

**[Mey91]**

Th. Meynard, H. Foch, « Dispositif de conversion d’énergie électrique à semi-conducteur » brevet français N°.91,09582, Europe, Japon, USA, Canada, 92,00652.

**[Mor06]**

F. Morel, J.M. Retif, X. Lin-Shi et C. Valentin « Commande Hybride d’un ensemble Onduleur-Machine synchrone » Conférence Internationale Francophone d’Automatique, CIFA, Bordeaux, France, 2006

**[Mor08]**

F. Morel, J.M. Retif, X. Lin-Shi et C. Valentin « Permanent Magnet Synchronous Machine Hybrid Torque Control » Journal: IEEE Transactions on Industrial Electronics, V.55, Issue 2, pp.501-512, 2008

**[Pin00]**

D. Pinon, « Commandes des convertisseurs multicellulaires par mode de glissement » Thèse de Doctorat, INPT, 2000.

**[Pri07]**

C. Prieur, R. Goebel, A.R. Teel, “Hybrid feedback control and robust stabilization of nonlinear systems”, IEEE Transactions on Automatic Control, vol.52, 11, pp. 2103-2117, 2007.

**[Rot05]**

M. Rodrigues, « Diagnostic et commande active tolérante aux défauts appliqués aux systèmes décrits par des multi-modèles ». Thèse de Doctorat, Spécialité Automatique, Université Henri Poincaré, Nancy1, Décembre 2005.

## BIBLIOGRAPHIE

---

**[Rue02]**

R. Ruelland, «Apport de la co-simulation dans la conception de l'architecture des dispositifs de commande numérique pour les systèmes électriques ». Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, 2002.

**[Saa07]**

H. Saadaoui, « Contribution à la synthèse d'observateurs non linéaires pour des classes de systèmes dynamiques hybrides ». Thèse de doctorat, Ecole Doctorale Sciences et Ingénierie, Université de Cergy-Pontoise, 2007.

**[Vac06]**

G. Vachtsevanos, F. Lewis, M. Roemer, A. Hess, B. Wu, « Intelligent Fault Diagnosis and Pronosis for Engineering Systems », John Wiley & Sons, 2006.