

M/621.84E

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
Université 8Mai 1945 – Guelma  
Faculté des Sciences et de la Technologie  
Département de Génie Electrotechnique et Automatique



**Domaine : Sciences et Technologie**  
**Filière : Automatique et Informatique Industrielle**  
**Spécialité : Commande et Diagnostic  
Des Systèmes Industriels**



**Mémoire de fin d'études  
pour l'obtention du diplôme de Master Académique**

---

**COMMANDE TOLERANTE AUX DEFAUTS  
APPLICATION AU MOTEUR D'UN TURBOREACTEUR**

---

Présenté par : **REGGAM LEYLA**

Sous la direction de : **M<sup>r</sup> Moussaoui A/Krim**

Mai 2014

## **Remerciements**

*Nous remercions Dieu de nous avoir donné la force et le courage pour réaliser ce modeste travail.*

*Je tiens à exprimer ici toute mes reconnaissances à mon professeur le Docteur Mr MOUSSAOUIA/KRIM pour l'honneur qu'il m'a fait en assurant la direction et le suivi scientifique et technique du présent mémoire.*

*Je le remercie non seulement pour sa grande contribution à l'aboutissement de ce travail et pour sa disponibilité malgré ses nombreuses activités, Mais aussi pour sa grande générosité. Et tous les conseils qu'ils nous ont prodigués pendant toute la durée de ce travail.*

*Je remercie vivement le président et les membres de jury pour l'honneur qu'ils m'ont fait en acceptant de juger ce modeste travail.*

*Enfin, mes remerciements vont aussi à mes parents pour leur patience, leurs encouragements continus et leur soutien inconditionnel. Qu'il trouve ici toute ma gratitude et mon amour.*

*Merci à mon fiancé SAMIR*



*Merci à mes très chers frères Nour eddine, Chemse Eddine  
Merci à mes très chères sœurs le Docteur Aziza et wahida  
Merci à ma très chère sœur le Docteur Saida et son mari Fayçal  
à Ma belle sœur Hassiba  
Les Anges de la famille*

*ADEM*

*ISLEM*

*AYA*

*Merci à tous !!*

**LEYLA**

## TABLE DES MATIERES

Table des matières	A
Table des figures	E
Glossaire	G
Introduction général	2

### **Chapitre I : " Commande tolérante aux défauts : L'état de l'art & généralités "**

I.	Introduction	7
II.	Position du problème de la commande tolérante aux défauts	9
III.	Conceptions et principes des systèmes tolérants aux défauts	10
IV.	L'Analyse et l'évaluation des performances des systèmes	12
V.	Analyse de performances dans un AFTCS	13
a)	Modes de fonctionnement des systèmes dynamiques	13
b)	Niveaux de performances de FTCS	13

### **Chapitre II " Diagnostic et commande tolérante aux défauts"**

I.	Introduction	17
II.	Définition	17
III.	Classification des défauts	17
a.	Défauts actionneurs	18
b.	Défauts capteurs	18
c.	Défauts système ou composants	19
IV.	Formulation d'un problème de diagnostic	20
1.	La maintenance, la surveillance et le diagnostic	20
2.	Les différentes tâches de la surveillance	21
a.	Moniteur	21
b.	Protection automatique	21
c.	Diagnostic	21
V.	Les différentes étapes du diagnostic d'un système	22
a.	Acquisition de données	22
b.	Etape d'élaboration d'indicateurs de défauts	22
c.	Etape de détection	23
d.	Etape de localisation	23
e.	Etape de prise de décision	23

<b>VI.</b>	Méthodes de diagnostic	23
	1. Méthodes de diagnostic sans modèle mathématique	24
	2. Méthodes de diagnostic avec modèle mathématique	24
	a) Redondance physique ( Diagnostic qualitatif )	27
	b) Redondance analytique ( Diagnostic quantitatif )	27
<b>VII.</b>	Méthodes des résidus	28
	i. Génération des résidus	28
	ii. Evaluation des résidus	29
	iii. Prise de décision	30
<b>VIII.</b>	Performance d'une procédure de diagnostic	30
	1. La détectabilité	30
	2. L'isolabilité	31
	3. La sensibilité	31
	4. La robustesse	31
<b>IX.</b>	Conclusion	32

**Chapitre III " Commande tolérante aux défauts "**

<b>I.</b>	Introduction	34
<b>II.</b>	Système tolérant aux défauts	35
<b>III.</b>	Commande tolérante aux défauts	35
<b>IV.</b>	Classification des méthodes de commande tolérante aux défauts	36
	1. Approche passive de la commande FTC	37
	2. Approche active de la commande FTC	40
	a. L'accommodation des défauts	40
	b. La reconfiguration du système	40
	c. La restructuration	40
	i. Lois de commande pré-calculée	43
	ii. Lois de commande synthétisée en ligne	43
	iii. Méthodes FTC actives	44
	1) Technique du pseudo inverse	44
	2) Approche par modèle de référence	45
	3) Placement de structure propre	46
	4) La loi de commande par séquençement de gain	47
	5) Approche Multi-Modèles (MMC)	48

6) Les méthodes adaptatives	50
7) La commande prédictive (Model Predictive Control-MPC)	52
iv. L'architecture d'une commande FTC active	53
a) Le bloc FDI	54
b) Le bloc FTC	54
V. Conclusion	54

**Chapitre IV " La Commande Prédictive MPC "**

I. Introduction	56
II. Bref historique	57
III. Principe de base de la commande prédictive	57
IV. Eléments de la Commande Prédictive	60
1. Modèle de prédiction	61
2. Méthode d'optimisation	61
3. Principe de l'horizon glissant	61
V. Fonction objectif	62
VI. Modélisation	64
A. Modèle de connaissance	64
B. Modèle de comportement global entrée-sortie	65
C. Modèle de prédiction du processus	65
VII. Types des contraintes	66
1. Restrictions sur l'amplitude du signal de commande	66
2. Restrictions sur la vitesse de variation du signal de commande	66
3. Restrictions sur l'amplitude de la sortie	66
4. Restrictions sur la vitesse de variation du signal de sortie	67
VIII. Commande prédictive à base de modèle	67
IX. Commande prédictive linéaire	67
1. Modèle du système	67
2. Prédiction	69
a. Loi de commande	71
b. Critère de performance	72
3. Problème sans contraintes	72
4. Commande à modèle interne	74
a. Synthèse de la loi de commande par inversion du système	74
b. Commande à modèle interne linéaire	75

c. Commande à modèle interne non linéaire (C.M.I.NL)	76
X. Stabilité de la commande prédictive	77
XI. Algorithme	77
XII. Choix des horizons	78
a. Choix de l'horizon de prédiction $N_p$	78
b. Choix de l'horizon de commande $N_u$	79
a. Choix du facteur de pondération de la commande $\lambda$	79
XIII. Conclusion	79
<b>Chapitre V " Applications au moteur d'un turboréacteur"</b>	
I. Introduction	81
II. Simulations linéaires	81
1. Linéarisation	81
2. Réalisation du MPC	82
1. Contrôle de la Vitesse du ventilateur	85
2. Simulation de la tolérance aux défauts	87
3. Contrôle de la poussée	89
III. Conclusion	94
Conclusion générale	96
Bibliographie	99
Annexe A	105
Annexe B	107

**LISTE DES FIGURES**

Numéro de La Figure	Nom de La Figure	Page
<b>CHAPITRE I</b>		
<b>I.1</b>	Défauts affectant un système commandé	10
<b>I.2</b>	Principe d'un système de commande tolérante aux défauts	11
<b>I.3</b>	Différentes régions de performance d'un système dynamique	14
<b>CHAPITRE II</b>		
<b>II.1</b>	Différents types de défauts	18
<b>II.2</b>	Classification des défauts: multiplicatifs et additifs	19
<b>II.3</b>	Représentation des défauts selon le comportement temporel	20
<b>II.4</b>	La surveillance	21
<b>II.5</b>	Les différentes étapes d'un système de diagnostic	22
<b>II.6</b>	Méthodes de diagnostic	24
<b>II.7</b>	Diagnostic à base de modèle	25
<b>II.8</b>	Schéma du principe de FDI	25
<b>II.9</b>	Procédure de détection et d'isolation des défauts	26
<b>II.10</b>	Architecture de redondance physique et analytique	26
<b>II.11</b>	Schéma général de détection des fautes	28
<b>II.12</b>	Schéma générale des générateurs de résidus	29
<b>CHAPITRE III</b>		
<b>III.1</b>	Architecture d'un système "FTC"	35
<b>III.2</b>	Classification des commandes tolérantes aux défauts	36
<b>III.3</b>	Classification des méthodes tolérantes aux défauts	37
<b>III.4</b>	Schéma de principe d'une loi de commande FTC passive	38
<b>III.5</b>	Décomposition hiérarchique d'un système PFTC	38
<b>III.6</b>	Schéma de principe d'une loi de commande FTC active	41
<b>III.7</b>	Schéma général d'un système de commande tolérante aux défauts	42
<b>III.8</b>	Le principe de la commande AFTC pré-calculée	43
<b>III.9</b>	A simplified Block diagram of a model reference adaptative System	46
<b>III.10</b>	A simplified block diagram of a gain scheduling controller	48
<b>III.11</b>	Principe de la méthode de la commande prédictive	53
<b>III.12</b>	Schéma de principe d'une loi de commande FTC active	53

<b>CHAPITRE IV</b>		
<b>IV.1</b>	Principe de la commande prédictive	58
<b>IV.2</b>	Stratégie de la commande prédictive	60
<b>IV.3</b>	Le principe de l'horizon glissant	61
<b>IV.4</b>	Structure de base d'une commande prédictive	62
<b>IV.5</b>	Structure de base pour la commande prédictive à base de modèle	67
<b>IV.6</b>	Stratégie de commande prédictive	68
<b>IV.7</b>	Inversion en boucle ouverte	75
<b>IV.8</b>	Structure de commande à modèle interne linéaire	76
<b>CHAPITRE V</b>		
<b>V.1</b>	Effet de différents horizons de prédiction avec $N_u = 1$	83
<b>V.2</b>	Schéma bloc de simulation du MPC dans MATLAB/Simulink pour le contrôle de la variable $N_f$ ( Fan speed).	84
<b>V.3</b>	Comparaison entre MPC et PID (Baseline) pour des conditions nominales	86
<b>V.4</b>	Tolérance aux défauts du MPC	87
<b>V.5</b>	MPC et PID pour une dégradation de 80% de ( $FE = -0,2$ )	88
<b>V.6</b>	Schéma-Bloc de Simulation du MPC dans MATLAB / Simulink pour le contrôle de la poussée	89
<b>V.7</b>	Variation de la poussée due à des défauts dans C-MAPSS40k en utilisant le contrôle de la vitesse du ventilateur	90
<b>V.8</b>	Comparaison de poussée entre MPC et PID pour des conditions nominales. Bleu = MPC, rouge = PID	90
<b>V.9</b>	Multi-modèle de contrôle de poussée pour le cas nominal et pour celui de dégradation de 80% de FE	90-91
<b>V.10</b>	Contrôle de la poussée à l'aide d'un modèle de référence nominale ( $N_c$ ) avec une dégradation de 78%, 80% et 82% de FE.	92-93
<b>ANNEXE B</b>		
<b>B.1</b>	Schéma en coupe d'un turboréacteur illustrant son principe de fonctionnement	107
<b>B.2</b>	Représentation simplifiée d'un turboréacteur civil double corps et double flux.	108
<b>B.3</b>	Domaine de vol (vitesse en mach) et rendement (Impulsion spécifique) des différents types de moteurs à réaction.	114



---

## Glossaire

**Accommodation** : La poursuite de l'objectif fixé sans remettre en cause ses corrections et l'annulation de défauts (compensation, ajustement...).

**Défaillance**: L'interruption permanente de la capacité du système à remplir une fonction requise dans les conditions d'opérations spécifiées. Lorsque les performances du système sont en dessous d'un seuil d'arrêt, on parle de défaillance.

**Défaut**: Le terme faute ou défaut est généralement défini comme un écart entre la caractéristique observée sur le dispositif et la caractéristique de référence lorsque celui-ci est en dehors des spécifications.

**Détection**: La détermination de la présence de défauts et de l'instant de leurs occurrences.

**Diagnostic**: La détermination du type, de la taille, de la localisation et de l'instant d'occurrence d'un défaut, il suit la détection de défauts et inclut l'isolation et l'identification du type et de la cause probable de la défaillance à l'aide d'un raisonnement logique fondé sur un ensemble d'informations provenant d'une inspection, d'un contrôle ou d'un test.

**Disponibilité** : L'aptitude d'un système à fonctionner lorsqu'on le sollicite.

**Fiabilité** : L'aptitude d'un système à accomplir sa mission pendant une période donnée et dans des conditions données d'utilisation.

**Identification**: La détermination de la taille et du comportement temporel d'un défaut.

**Isolation**: La détermination du type, de la localisation et de l'instant d'occurrence d'un défaut.

**Reconfiguration** : La poursuite de la mission d'un système de commande en reconfigurant la loi de commande ou l'objectif. La reconfiguration consiste à modifier en ligne l'action de commande issue d'un contrôleur approprié dans le but de compenser l'effet d'un défaut paru sur le système. Elle est également équivalente au terme **accommodation et restructuration**.

**Résidu**: le signal ponctuellement indicateur de défaut. Il reflète la cohérence des données vis-à-vis du modèle comportemental du système.

**Supervision** : La surveillance d'un système physique et prise de décision appropriée en vue de maintenir son fonctionnement lors de l'apparition de défaut.

**Sûreté** : c'est l'aptitude d'un système à respecter l'utilisateur et son environnement.

**Surveillance** : La tâche continue réalisée en temps réel, de détermination de l'état d'un système physique qui consiste en l'enregistrement de l'information ainsi qu'en la reconnaissance et l'indication des anomalies du comportement c'est l'altération ou la cessation de l'aptitude d'un dispositif à accomplir ses fonctions avec les performances définies dans les spécifications techniques. Le système est indisponible suite à la défaillance.

**Une dégradation** : correspond à une perte de performances d'une des fonctions assurées par l'ensemble ou un sous-ensemble. Lorsque ces performances sont en dessous d'un seuil d'arrêt, on parle de défaillance.

**Un défaut mineur** : nuit au bon fonctionnement du système en causant des dommages négligeables au système lui-même ou à l'environnement. Ce type de défauts ne réduit pas l'aptitude du dispositif à accomplir sa fonction requise.

**Un défaut sévère** : risque de réduire l'aptitude du dispositif à accomplir sa fonction requise. Un défaut sévère peut être également appelé *défaut majeur*. Un défaut sévère est un défaut qui apparaît sur un élément "clé" de l'installation : quelle que soit la stratégie employée, il devient alors matériellement impossible de conserver les objectifs désirés.

**Un défaut critique** : entraîne la perte d'une fonction essentielle du dispositif avec un impact sur l'environnement, le système ou les personnes. Il apparaît brutalement et se caractérise par une variation discontinue de la dynamique du système. Sa structure peut même être modifiée dans certains cas tel un blocage ou une perte d'un capteur ou d'un actionneur.

**Un défaut catastrophique** : entraîne la perte d'une fonction essentielle d'un dispositif en causant des dommages importants au système, à l'environnement et aux personnes.

**L'aéronef** : c'est un moyen de transport capable d'évoluer au sein de l'atmosphère terrestre. On distingue deux catégories d'aéronefs : **l'aérostat** et **l'aérodyné**. L'utilisation de ces appareils est l'aéronautique, ses adeptes sont les aviateurs et les aviatrices.

# INTRODUCTION GENERALE

## INTRODUCTION GENERALE

Les systèmes industriels modernes s'appuient de plus en plus sur des techniques de commande avancées afin d'atteindre des niveaux de performances élevés et de répondre aux exigences de sécurité. Néanmoins, si un dysfonctionnement dans les actionneurs, les capteurs ou autres composants d'un tel système apparaît, une action de commande conventionnelle peut engendrer un niveau de performance insatisfaisant. Cette situation est particulièrement délicate dans le cas des systèmes à sécurité critique, tels que les avions, les engins spatiaux, les centrales nucléaires, les usines chimiques et de traitement des matières dangereuses. Dans ce cas, les conséquences d'un défaut mineur dans un composant du système peuvent être catastrophiques. Pour remédier à ces faiblesses, de nouvelles approches pour la conception de systèmes de commande ont été développées afin de tolérer les dysfonctionnements des éléments tout en maintenant un niveau de performances acceptable. Ces types de systèmes de commande sont qualifiés de "*commandes tolérantes aux défauts*" et sont regroupés dans la littérature sous l'acronyme anglo-saxon (FTCS pour Fault Tolerant Control Systems). Plus précisément, les FTCS sont les systèmes de commande permettant de maintenir la stabilité globale du système et une performance acceptable en cas d'apparition de défauts.

Dans le cadre des systèmes à risques, la capacité à effectuer les tâches pour lesquelles le système a été conçu peut être entravée par l'apparition de phénomènes anormaux. Il peut alors s'en suivre des fonctionnements non désirés, catastrophiques notamment dans le domaine de l'aéronautique, du nucléaire ... etc. Pour pallier aux problèmes liés à l'apparition des défauts, les communautés scientifiques et industrielles, se sont tournées vers le développement de systèmes de commande tolérants aux défauts. En effet, un système tolérant aux défauts se caractérise par son aptitude à maintenir ou à retrouver des performances en fonctionnement dégradé, proches de celles qu'il possède en régime nominal.

La notion de performance est un critère important dans la conception de n'importe quel système technique. Afin de maintenir un certain niveau de performance en cas de défaillance des composants du système, celui-ci doit posséder un certain degré de redondances. Cependant, les performances d'un système de commande sont fortement liées à l'énergie (puissance) et à la manœuvrabilité des actionneurs de commande existants. Nous avons étendu et appliqué le

problème de l'évaluation de performances au contexte des systèmes de commande tolérants aux défauts en nous intéressant particulièrement aux cas de la dégradation de la performance.

Les performances des équipements industriels ont été considérablement augmentées. Le gain en performances s'est accompagné d'un accroissement de la complexité des installations provoquant une demande plus forte de disponibilité et de sécurité. Cependant, la capacité à effectuer les tâches pour lesquelles le système a été conçu peut être entravée par l'apparition de phénomènes anormaux que sont les défauts.

Le développement de l'automatisme des systèmes industriels a pour objectif d'améliorer sans cesse leurs performances. Cette course à la performance conduit à la mise en place de système de plus en plus complexe multipliant ainsi les risques de dysfonctionnements pouvant mettre en péril le système lui-même et son environnement.

Il est donc nécessaire d'implanter sur ces systèmes une commande capable de fonctionner malgré des défaillances d'actionneurs, de capteurs ou de processus.

Sous l'hypothèse d'un bloc de diagnostic fournissant les informations liées à la détection et à la localisation du défaut, il est possible soit de compenser l'effet du défaut (accommodation) soit de modifier les lois de commande de manière à amener le système dans un état le plus proche possible de celui dans lequel il se trouvait en fonctionnement normal (appelée communément reconfiguration ou restructuration). Ces procédures à mettre en œuvre lors de l'occurrence du défaut ont été développées sous forme de plusieurs stratégies définies sous l'expression des systèmes tolérants aux défauts (en anglais, Fault Tolerant Control Systems FTCS).

Le processus avec ces capteurs, actionneurs et contrôleurs, le module de surveillance et le module de reconfiguration forment un ensemble appelé système de commande tolérante aux défauts (AFTCS : Active Fault Tolerant Control System).

Les objets physiques que nous utilisons quotidiennement (automobiles, appareils électroménagers, ascenseurs, climatisations,...etc.) sont de plus en plus équipés de systèmes automatisés de commande indispensables pour offrir le confort attendu par l'utilisateur ou garantir sa sécurité. Face à leur complexité, il devient de plus en plus nécessaire de mettre

en place des stratégies garantissant la tolérance aux défauts, plus précisément, en présence d'un ou plusieurs défauts, il faut reconfigurer les lois de commande afin de rendre le système tolérant à la présence de ces défauts et de satisfaire les performances initialement spécifiées. Ce qui va être développé dans le présent mémoire.

L'objectif de ce mémoire étant d'élaborer une stratégie de commande tolérante aux défauts capable de maintenir le bon comportement d'un système en présence de défauts.

En automatique, pour décrire le comportement d'un système, une hypothèse communément faite est la linéarité du système, cependant, l'hypothèse de linéarité n'est vérifiée que dans une plage de fonctionnement restreinte autour d'un point d'équilibre du système. Alors, les performances du modèle se dégradent dès qu'on s'en éloigne et la recherche d'un modèle plus adapté et notamment non linéaire devient nécessaire. [31]

Nous allons synthétiser une commandes « **Model Predictive Control** « **MPC** » qui peut être conçu de sorte qu'il ait une capacité intrinsèque de manipuler les défauts paramétriques sans la nécessité de modéliser explicitement le défaut.

### **Structure du mémoire :**

Dans ce mémoire, il est considéré l'étude de la commande tolérante aux défauts. Le mémoire est organisé en cinq (05) chapitres.

#### *Chapitre 01 : Commande tolérante aux défauts : L'état de l'art & généralités*

Nous présentons dans le premier chapitre, un bref historique sur les systèmes tolérants aux défauts ou nous aborderons la problématique de la tolérance aux défauts, on présentant l'importance, les choix et les orientations de ce mémoire.

#### *Chapitre 02 : Diagnostic et commande tolérante aux défauts*

Ce chapitre a pour objectif de donner un aperçu sur les méthodes et les approches utilisées dans le domaine de la surveillance des systèmes. A ce titre, nous aborderons les différentes méthodes et approches de la détection et de la localisation des défauts dans un

processus dynamique. Ces méthodes sont connues sous l'appellation « **FDD** » (*Fault Detection and Diagnosis*).

Nous allons faire un tour d'horizon sur les méthodes et les approches utilisées dans le domaine du diagnostic et de la commande tolérante aux défauts.

### *Chapitre 03: Commande tolérante aux défauts*

Le chapitre « **03** » brosse un panorama des principales méthodes de commandes tolérantes aux défauts dans des systèmes dynamiques complexes. Les commandes tolérantes sont réparties suivant deux grandes catégories : les approches passives (*Passive Fault Tolerant Control Systems*, **PFTCS**) et les approches actives (*Active Fault Tolerant Control Systems*, **AFTCS**).

Chaque méthode de commande « **FTC** » fait l'objet d'une discussion avec ses avantages et ses inconvénients. Dans ce chapitre, l'**accent** est mis sur les méthodes actives.

### *Chapitre 04: La Commande prédictive MPC*

Dans ce chapitre, on décrit la méthodologie de la commande prédictive. On fait une brève présentation des caractéristiques les plus importantes que présentent les principales méthodes de commande prédictive. On décrit les principaux éléments qui apparaissent dans ces méthodologies, c'est-à-dire, le modèle de prédiction et la fonction objective.

### *Chapitre 05: Application au moteur d'un turboréacteur*

Nous présentons dans cette partie une MPC appliqué à un **turboréacteur à double flux** non linéaire en présence de défauts de composants, d'enquêter sur le contrôle des deux, **la vitesse du ventilateur et la poussée**. Les simulations sont vérifiées avec C-MAPSS40k démontrant le remplacement réussi du contrôleur de base avec une MPC tolérant en ligne à discuter.

**Enfin**, Nous clôturons cette thèse par une conclusion générale qui réunit les différents résultats à travers laquelle on analysera l'apport de la méthode proposée et on exposera les principaux résultats obtenus.

# Chapitre I

Commande Tolérante Aux Défauts : L'état de l'art & Généralités



## I. Introduction :

Dans le domaine de la commande des systèmes, la complexité des systèmes est accompagnée d'une demande toujours plus forte de disponibilité et de sécurité. Afin de réussir ces objectifs, il existe des tâches et fonctions consacrées à garantir un correct fonctionnement de tels systèmes.

Ces tâches peuvent être la détection, le traitement et le diagnostic d'anomalies, ainsi que la prise de décision concernant la gestion de défauts. Afin d'éviter des catastrophes inhérentes à l'apparition d'anomalies, le diagnostic et la tolérance aux défauts sont devenus une préoccupation majeure dans la conception, le développement, la validation, la certification et l'exploitation de systèmes. La tolérance aux défauts permet de réduire, voire d'annuler, l'effet de défauts ayant un impact inacceptable sur la mission, la sécurité (de l'être humain et du matériel), l'environnement et la rentabilité.

Au cours de ces dernières décennies, la complexité des installations industrielles a augmenté avec le développement technologique. La sûreté de fonctionnement des systèmes technologiques critiques constitue un enjeu important tant sur le plan économique que scientifique. Dans le cadre des systèmes à risques, la capacité à effectuer les tâches pour lesquelles le système a été conçu peut être entravée par l'apparition de phénomènes anormaux. Il peut alors s'en suivre des fonctionnements non désirés, catastrophiques notamment dans le domaine de l'aéronautique, du nucléaire, etc. [1] [2].

En plus, les systèmes asservis sont de plus en plus complexes, grands en dimension et interconnectés par nature. Ils deviennent aussi de plus en plus vulnérables aux défauts qui les rendent incapables de réaliser correctement leurs objectifs. Cette évolution a conduit au développement des systèmes de surveillance, dont l'objectif est de fournir à tout moment des informations à l'opérateur sur le fonctionnement du système. La surveillance devient alors une fonction importante parmi les différentes tâches de la supervision des systèmes industriels. [2][11].

Les activités de l'opérateur en charge de la supervision sont les suivantes :

- ◆ Surveiller l'état de l'installation;
- ◆ Ajuster les paramètres de la commande, dans le cas par exemple où les conditions de fonctionnement ont changé ;
- ◆ Exécuter les opérations planifiées et le cas échéant, le diagnostic, la maintenance, la compensation et la correction de situations anormales.

D'une manière générale, lorsque la connaissance sur le comportement du procédé est incomplète ou l'environnement dans lequel il doit évoluer est changeant, le système de commande doit présenter un certain degré d'autonomie (*ou d'intelligence*) de manière à assurer une continuité de la fonction pour laquelle il a été conçu.[4].

La commande des systèmes est traditionnellement réalisée à partir d'un calculateur central qui collecte l'ensemble des informations relevées sur le procédé, puis les traite pour élaborer un ensemble de commande qui est appliqué au procédé. Avec le développement des systèmes commandés en réseaux, en anglais *Networked Control System*, et des calculateurs embarqués, la stratégie des tâches de diagnostic et de commande s'oriente vers une distribution des algorithmes. [4] [5] [6].

De toute évidence, la stratégie à employer dépend fortement de facteurs tels que la gravité du ou des défauts, ou le degré de redondance matériel de l'installation. Si une « *échelle des stratégies* » pouvait être établie elle irait de : ne rien faire car le défaut n'est pas grave à : arrêter l'installation. Pour pallier aux problèmes liés à l'apparition des défauts, les communautés scientifiques et industrielles, se sont tournées vers le développement de systèmes de commande tolérants aux défauts. [8] [9].

## II. Position du problème de la commande tolérante aux défauts

Afin de permettre aux aéronefs de continuer leur mission en cas de défauts, il est indispensable d'identifier les changements imprévus (défauts) du système avant qu'ils ne conduisent à une incapacité totale (défaillance). [15][27][51]

Les stratégies de commande tolérante aux défauts ont pour but de conserver la maîtrise du comportement dynamique du système commandé en dépit de la présence d'un dysfonctionnement. Différentes causes peuvent être à l'origine de ces dysfonctionnements.

Les défaillances internes résultent de différents facteurs plus ou moins maîtrisés : vieillissement, fatigue, maintenance mal adaptée. Elles produisent des dysfonctionnements des matériels, **comme par exemple** une défaillance de la structure physique (composants internes), du système de perception (capteurs matériels ou informationnels), ou défaillance du système d'action (actionneurs, régulateurs, réseaux de transmission, organes de traitement).

Les défaillances externes résultent de l'action de l'environnement dans lequel le système évolue (perturbations, erreurs des opérateurs humains). [6] [7]

Les défauts correspondent alors à des événements qui peuvent survenir dans différentes composantes d'un système comme le présente la figure (I.1). Ils peuvent être classifiés selon une échelle de sévérité allant du **dysfonctionnement partiel** (fuite hydraulique ou pneumatique, ...) à la **détérioration complète** d'un composant (valve d'un propulseur restant complètement fermée, ...). Les défauts peuvent ainsi être modélisés en utilisant soit une forme **additive**, soit une forme **multiplicative**. Généralement, les défauts additifs correspondent aux changements constatés indépendamment des entrées connues. Les défauts multiplicatifs, quant à eux, correspondent à des changements de paramètres (abrupts ou gradués) qui causent l'évolution des sorties et dont l'amplitude dépend des entrées connues. [6]

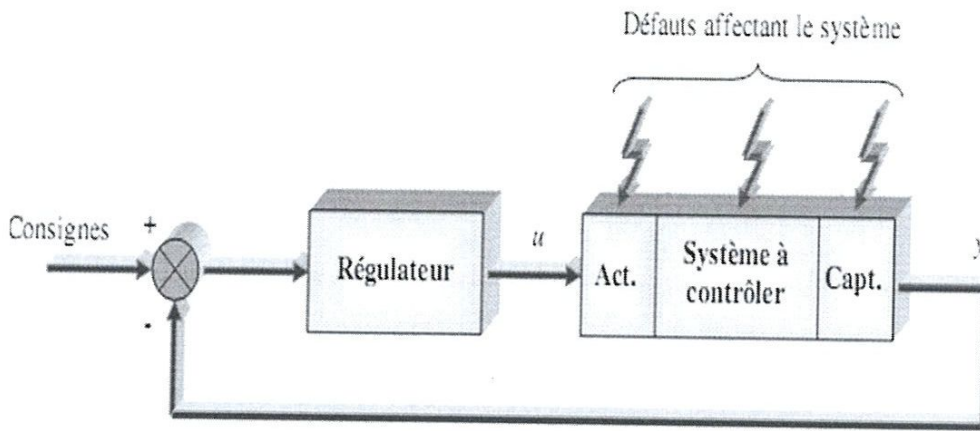


Figure I.1 : défauts affectant un système commandé. [5] [6][50]

Une fois qu'un défaut a été détecté, il apparaît naturel de chercher à le compenser par une modification adéquate de la loi de commande de l'aéronef considéré. C'est ce que cherche à réaliser la commande tolérante aux défauts, également nommée **reconfiguration**.

### III. Conceptions et principes des systèmes tolérants aux défauts

Un système tolérant aux défauts possède la capacité de maintenir les objectifs nominaux en dépit de l'occurrence d'un défaut et à s'en accommoder de manière automatique. Il permet notamment de garantir la stabilité du système et/ou des performances dégradées acceptables en présence de défauts. 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, en présence d'un défaut. [ 8] [ 9 [34]

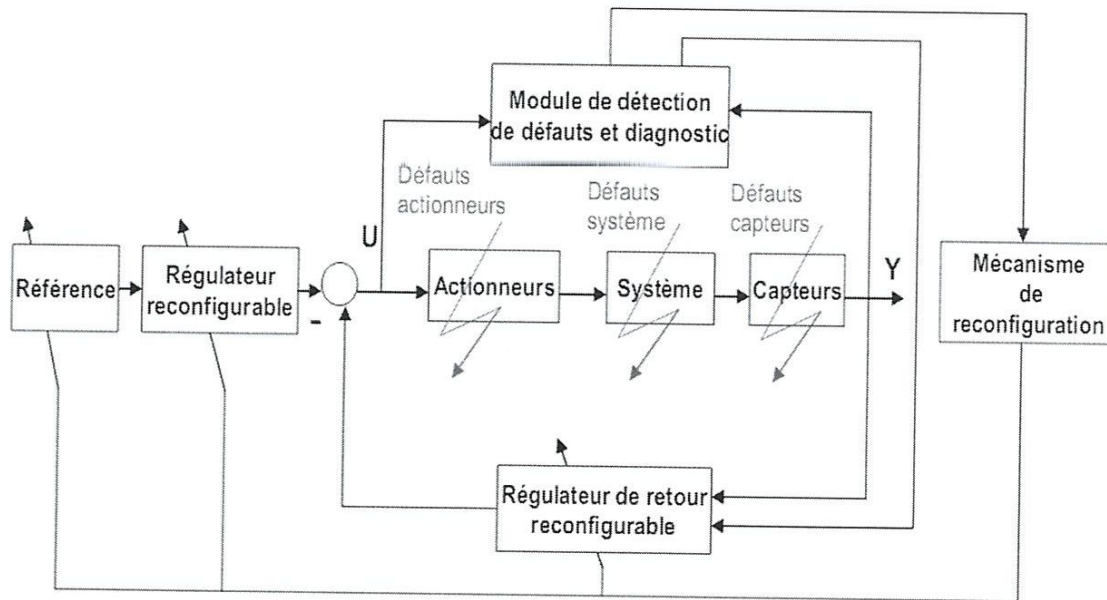
Pour pallier de telles catastrophes, de nouvelles lois de commande ont été développées dans le but précis de maintenir les performances du système ainsi que sa stabilité, lors d'un mauvais fonctionnement du système. Dans le domaine industriel ou en aéronautique, ce type de problèmes a été souvent évité en se fondant sur de la redondance matérielle à base d'actionneurs et de capteurs. Cette stratégie est non seulement onéreuse mais elle requiert aussi un important dispositif de maintenance. Ainsi, la commande tolérante aux défauts traitée de manière analytique, permet d'éviter de tels coûts d'achat et d'entretien. [70]

La tâche principale qui incombe à la commande tolérante aux défauts est de synthétiser des lois de commande avec une structure permettant de garantir la stabilité et les performances du système, non seulement lorsque tous les composants de la commande sont

opérationnels, mais aussi lorsque des capteurs ou des actionneurs sont défectueux. [1] [5] [12] [14].

La commande tolérante aux défauts est généralement classée en deux approches distinctes :

Une approche passive (Passive Fault Tolerant Control, PFTC) et une approche active (Active



**Figure I.2 : Principe d'un système de commande tolérante aux défauts [12]**

Fault tolerant Control, AFTC). Dans le cadre de la première approche, les régulateurs sont synthétisés de façon à être robuste à certains défauts (Eterno et al., 1985). L'idée principale est de faire en sorte que le système en boucle fermée (BF) soit robuste aux incertitudes et à quelques défauts spécifiques. Cette approche ne nécessite aucun schéma de détection de défauts ni aucune reconfiguration de loi de commande mais sa capacité de tolérance reste restreinte à quelques défauts. [5] [7] [41].

A l'opposé de la voie passive, l'AFTC est amenée à réagir aux diverses défaillances du système en reconfigurant les lois de commande tout en préservant la stabilité et les performances de celui-ci. La figure (I.1) présente un schéma typique de systèmes de commande tolérante aux défauts, 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, 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. [20]

L'AFTC requiert tout d'abord, de synthétiser un schéma de FDD permettant de fournir de manière aussi précise que possible une information sur les défauts éventuels (l'instant d'apparition, le type et l'amplitude du défaut) ainsi qu'un modèle de défaut du système. Puis, de synthétiser en ligne un nouveau régulateur (reconfigurable ou restructurable) en réponse aux défauts du système et de compenser l'effet de ceux-ci tout en assurant la stabilité et les performances de l'ensemble.[12]

#### **IV. L'Analyse et l'évaluation des performances des systèmes**

L'analyse et l'évaluation des performances a fait l'objet de nombreux travaux de recherche dans le contexte de la commande standard, ainsi que dans le cas de la commande tolérante aux défauts. Par ailleurs, la tolérance aux défauts des systèmes dits "critiques" a également été largement traitée au cours des deux dernières décennies. Mais force est de constater que le problème de la conception des systèmes de commande tolérants aux défauts avec prise en compte explicite de la dégradation des performances possibles n'ont pas reçu, jusqu'à récemment, le même niveau d'attention. La plupart des travaux antérieurs sur la conception des FTCS sont axés sur le principe du recouvrement des performances nominales du système sain. [7].

En pratique, après l'apparition d'une défaillance sur un actionneur, le degré de redondance du système et la disponibilité des actionneurs se trouvent généralement considérablement réduits. Si l'objectif de conception du système de commande est de maintenir les performances du système d'origine, il peut forcer les actionneurs restants à

travailler au-delà de leurs plages fonctionnelles normales pour compenser l'impact du défaut. Cette situation n'est pas souhaitable dans la pratique du fait des limitations physiques des actionneurs. Afin d'éviter une dégradation des actionneurs, il est souhaitable de réaliser un compromis entre le niveau de performance fixé et la disponibilité des actionneurs valides.

## V. Analyse de performances dans un AFTCS

### a) Modes de fonctionnement des systèmes dynamiques

Un système dynamique tolérant aux défauts a généralement trois modes de fonctionnement distincts :[37]

#### ✓ Mode Nominal

Ce mode correspond aux caractéristiques de fonctionnement normal. Dans ce mode, tous les objectifs sont censés être atteints. Cela signifie que si un ensemble de signaux de commande nominaux est envoyé aux actionneurs, le système produira des performances nominales.

#### ✓ Mode Défectueux

Après l'apparition du défaut, le système passe à un mode de fonctionnement anormal qui est appelé "mode défectueux". Dans ces conditions, le système produira des performances défectueuses pour des signaux de commande nominaux. Le mode défectueux peut entraîner des comportements différents en fonction de la gravité du défaut.

#### ✓ Mode Dégradé

Ce mode est un mode de fonctionnement temporaire. Dans ce mode, le système continue à fonctionner avec des objectifs/performances acceptables. Ces performances sont considérées comme dégradées et les signaux de commande sont censés être admissibles.

### b) Niveaux de performances de FTCS

La notion de performances du système est un terme générique reflétant les sorties du système dynamique sous ses différents états et sous différents points de vue. Supposons qu'on peut représenter la performance à partir d'un indice  $\pi$  et en fonction d'une variable  $v$  (cette variable contient implicitement les objectifs et les commandes). **La figure I.3** montre les différentes régions de fonctionnement d'un système qui s'exprime en termes de performances.

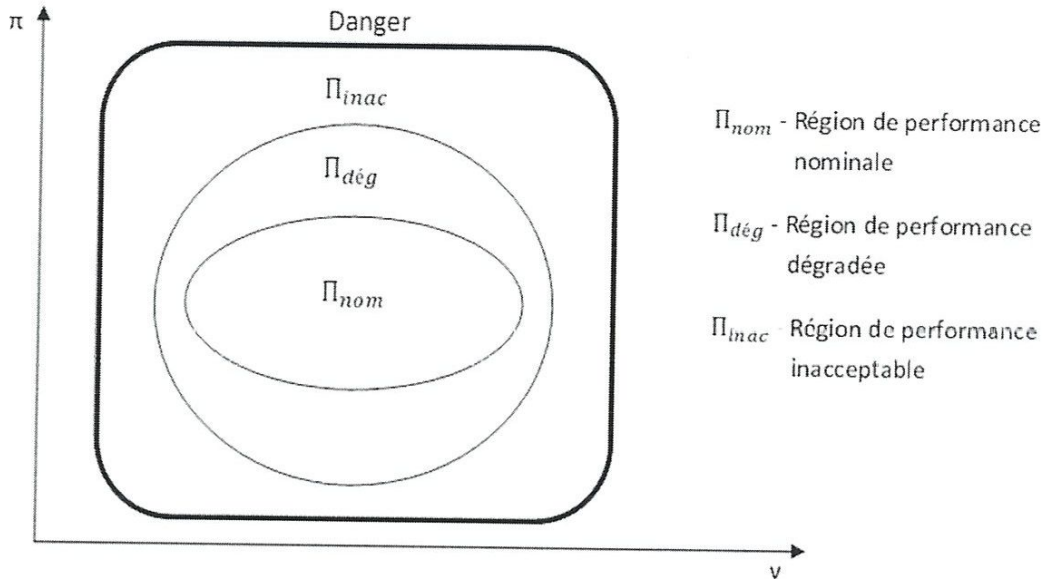


Figure I.3 – Différentes régions de performance d'un système dynamique [37]

➤ **Région de Performance Nominale :**

Dans cette région, le système remplit les tâches qui lui sont confiées. C'est dans cette région que le système devrait rester tout au long de son fonctionnement. Le contrôleur doit permettre au système nominal de rester dans cette région en dépit des perturbations et incertitudes du modèle utilisé lors de la conception du contrôleur. Le contrôleur peut même maintenir le système dans cette région si des défauts de faible gravité apparaissent, bien que ceci ne soit pas son but premier. Dans ce cas, le contrôleur "cache" l'effet des défauts, qui n'est pas sa mission attendue mais rend la tâche de diagnostic du défaut plus difficile. [37]

➤ **Région de Performance Dégradée :**

Cette région exprime la région où les points de fonctionnement du système défectueux sont autorisés à se déplacer. Le contrôleur tolérant aux défauts enclenche des actions de commande qui permettent de ramener de nouveau le système dans la région de la performance nominale si possible ou empêcher une autre dégradation de la performance vers des régions inacceptables ou dangereuses. [37]



➤ **Région de Performance Inacceptables :**

Dans cette région, le système de surveillance est appelé à diagnostiquer le défaut et ajuster le contrôleur compte tenu de la nouvelle situation du système. La région de la performance inacceptable doit être évitée à l'aide du contrôleur tolérant aux défauts. Cette région se trouve entre la région de la performance acceptable dans laquelle le système pourrait fonctionner dans le cas le plus défavorable et la région dangereuse, que le système devrait ne jamais atteindre. En cas d'un défaut très grave qui peut engendrer des dommages importants, un système de sécurité interrompt le fonctionnement du système global pour éviter la mise en danger du système et de son environnement. Cette procédure est enclenchée si le niveau minimum acceptable de performance est atteint.[37]

# Chapitre II

Diagnostic Et Commande Tolérante Aux Défauts

## I. Introduction

La surveillance n'est qu'un module d'un processus complet permettant à une installation

de fonctionner en respectant des critères de sécurité, de productivité et de qualité même en présence de défaillance. La commande du système peut être conçue de manière à utiliser les informations fournies par le module de surveillance. On parle alors de « commande tolérante aux défaillances ».

La conception de systèmes de fonctionnement sûr nécessite d'une part, l'implantation d'un système de diagnostic pour réaliser la détection et la localisation de défaut (fault détection and isolation) ou FDI et d'autre part la mise en œuvre de traitement tolérant aux défauts (fault tolerant control) ou FTC. [2].

Dans ce chapitre nous allons faire un tour d'horizon sur les méthodes et les approches utilisées dans le domaine du diagnostic et de la commande tolérante aux défauts.

## II. Définition

Un diagnostic est un état expliqué d'un système physique compatible avec les informations disponibles sur le comportement réel du système et avec le modèle de comportement de référence disponible. Couramment, le diagnostic est exprimé par les états des composants ou l'état des relations de description du comportement. [37] [38].

## III. Classification des défauts

Les défauts sont des événements qui apparaissent à différents endroits du système. Dans la littérature, les défauts sont classés en fonction de leur location, définissant alors des types de défauts. [31].

Trois classes de fautes peuvent être définies :

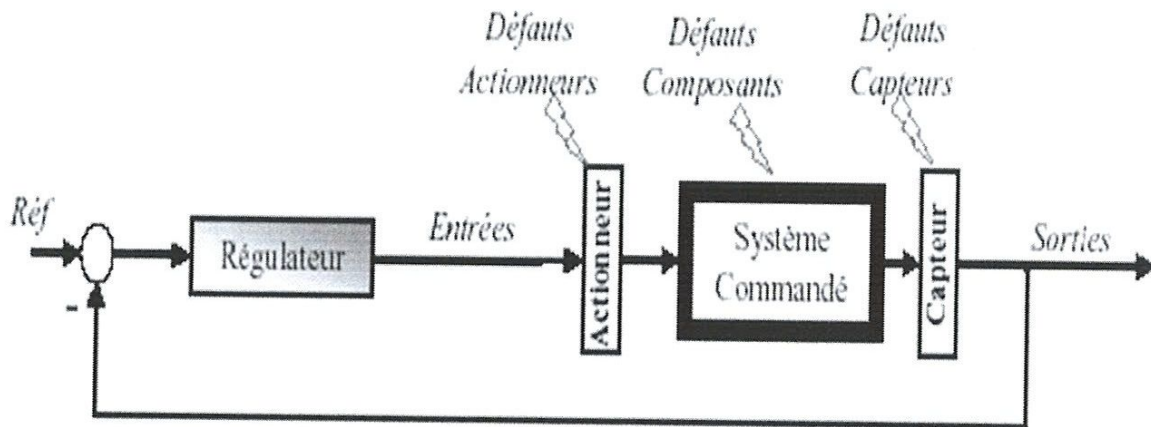


Figure II.1 Différents types de défauts [23]

### a. Défauts actionneurs

Les défauts actionneurs agissent au niveau de la partie opérative du système de commande et détruisent le signal d'entrée (conduisent à une perte partielle ou totale du signal d'entrée). Une partie du système devient non commandable et de nouveaux actionneurs doivent être utilisés. Ces défauts peuvent causer une perte totale ou partielle de l'actionneur. Une perte totale d'un actionneur peut se produire, par exemple, à la suite d'une fracture ou coupure d'un fil électrique reliant l'actionneur au système. Un exemple de perte partielle d'un actionneur est la fuite hydraulique ou pneumatique ou encore la chute de la tension d'alimentation. [5][13] [19]

### b. Défauts capteurs

Ils caractérisent une mauvaise image de la grandeur physique à mesurer. Un défaut capteur peut aussi être partiel ou total. Un capteur totalement défectueux donne une information qui ne correspond pas du tout à la vraie valeur de la variable à mesurer. 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. Une des solutions pour augmenter la tolérance aux défauts capteurs est de dupliquer les capteurs (redondance matérielle). Une vérification est faite sur les valeurs redondantes pour décider si une faute est présente ou non. Cette approche entraîne un coût important en instrumentation mais s'avère extrêmement fiable et simple à implanter. Elle

est mise en œuvre essentiellement sur des systèmes à haut risque telles que les centrales nucléaires ou les avions. [5][13]

### c. Défauts système ou composants

Ce sont des défauts qui apparaissent dans les composants du système lui-même, c'est-à-dire des défauts qui ne peuvent pas être classifiés ni parmi les défauts capteurs, ni parmi les défauts actionneurs. Ils représentent des changements dans les paramètres du système, ce qui induit un changement du comportement dynamique de ce dernier. [5][13]

Si les défauts doivent être classés relativement à leurs effets sur les performances du système, deux types de défauts peuvent être distingués : des **défauts additifs** et des **défauts multiplicatifs**. Les défauts additifs influencent la moyenne du signal de sortie du système, alors que les défauts multiplicatifs induisent des changements sur la variance et les corrélations du signal de sortie du système, ainsi que des changements dans la dynamique du système.

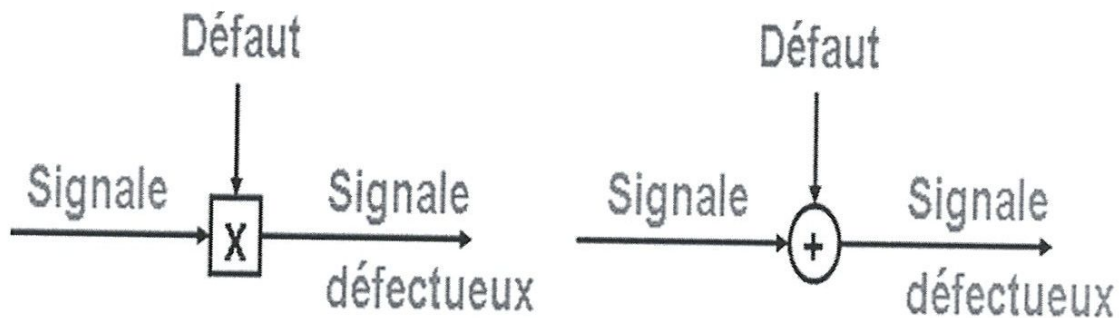
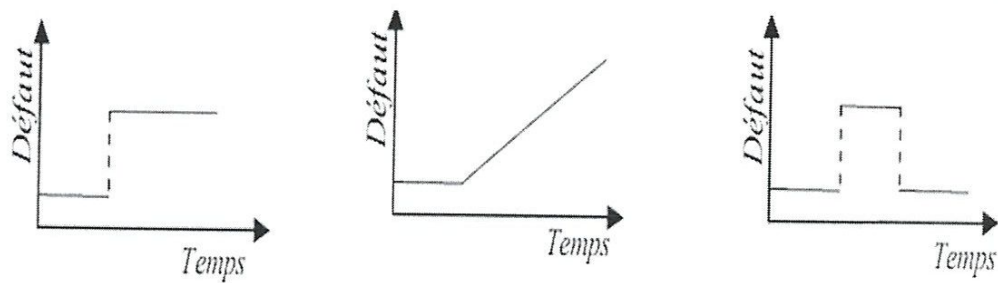


Figure II.2 : Classification des défauts: multiplicatifs et additifs. [5][13]

Les défauts sont classés également selon leurs **caractéristiques temporelles** comme **brusque**, **progressif** et **intermittent**. Les défauts brusques se produisent instantanément souvent à cause de dommages matériels. Habituellement ils sont très graves car ils affectent les performances et/ou la stabilité du système commandé, de tels défauts exigent une réaction rigoureuse du bloc « FTC ». Les défauts progressifs représentent les changements lents des valeurs paramétriques. Souvent due au vieillissement, ils sont plus difficiles à détecter en raison de leur dynamique lente, mais sont également moins graves. Les défauts intermittents sont des défauts qui apparaissent et disparaissent à plusieurs reprises, par exemple à cause d'un câblage partiellement endommagé. [5]



**Figure II.3 Représentation des défauts selon le comportement temporel [5][13]**

Il existe de nombreuses autres classifications possibles des défauts des systèmes automatisés.

## IV. Formulation d'un problème de diagnostic

### 1. La maintenance, la surveillance et le diagnostic

La tâche principale d'un ingénieur est de garantir la fiabilité, la disponibilité et la sûreté des systèmes industriels. La responsabilité de garantir la disponibilité des systèmes repose sur la maintenance. Cette dernière nécessite de connaître l'état de fonctionnement des systèmes. La surveillance donne une réponse aux besoins d'information de la maintenance. Dans la commande automatique des systèmes, la surveillance sert, d'une part, à signaler les anomalies de fonctionnement et, d'autre part, à prendre en compte les actions destinées à maintenir l'opération des systèmes. La surveillance est composée de trois tâches [46] :

- ✓ la tâche du moniteur
- ✓ la tâche de protection
- ✓ la tâche de diagnostic

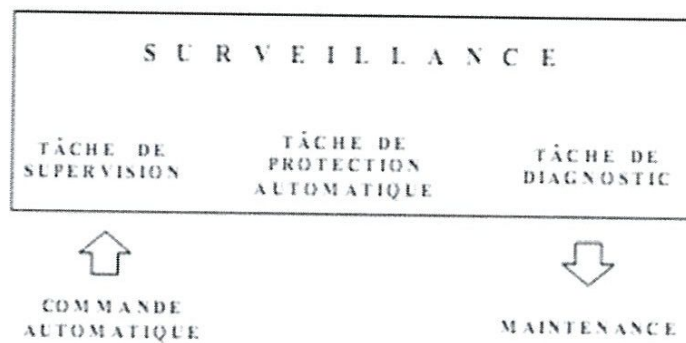


Figure II.4 La surveillance [46]

## 2. Les différentes tâches de la surveillance

Les trois tâches de la surveillance sont définies de la façon suivante :

### a. Moniteur :

Les variables mesurées sont comparées à des valeurs de référence et le résultat est affiché et lu par l'opérateur;

### b. Protection automatique :

Dans le cas d'une anomalie dangereuse, la tâche du moniteur est de déclencher automatiquement des actions préventives. Ces actions ont pour objectif de garantir la sûreté de l'opérateur et du système;

### c. Diagnostic :

Des indicateurs d'anomalies dans le fonctionnement du système sont calculés à l'aide des variables mesurées. Le diagnostic a pour objectif de trouver la cause de l'anomalie.

Avant de chercher la cause du défaut, il est important de valider l'information fournie par les résidus. La redondance est un moyen de valider cette information. Deux grandes classes de redondance existent [46]:

- La redondance matérielle
- La redondance analytique

## V. Les différentes étapes du diagnostic d'un système

Le diagnostic d'un système industriel nécessite un certain nombre d'étapes :

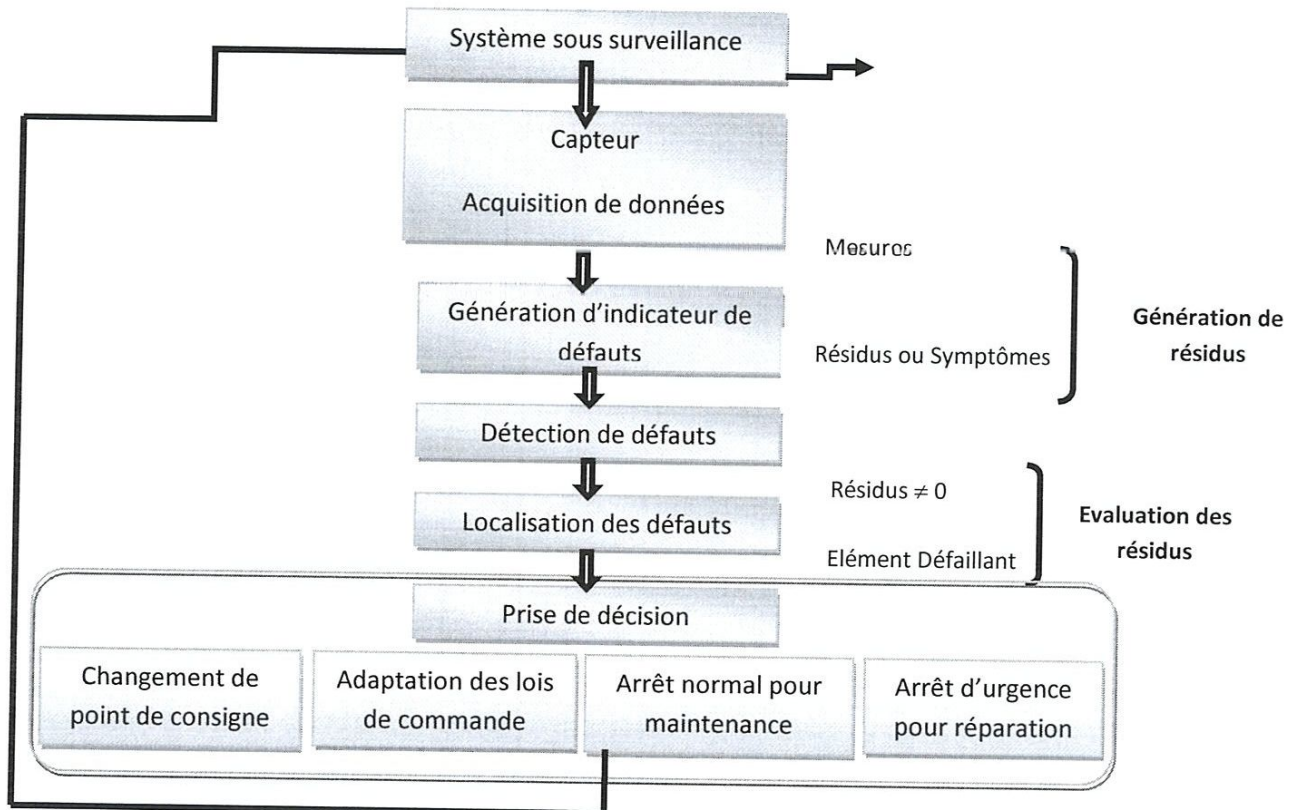


Figure II.5 les différentes étapes d'un système de diagnostic [28][29]

### a. Acquisition de données :

Cette étape a pour objectif de rassembler toutes les données sur le processus physique à diagnostiquer, que cela soit des données réelles issues des capteurs, ou bien des paramètres réels de chacun de ces composants. Cette étape fournit les informations sur le comportement réel du procédé.

**b. Etape d'élaboration d'indicateurs de défauts:** les indicateurs de défauts sont couramment nommés les résidus ou symptômes.



**c. Etape de détection :**

Cette étape doit permettre de décider si le système se trouve ou non dans un état de fonctionnement normale. On pourrait penser qu'il suffit de tester le non nullité des résidus pour décider l'apparition d'un défaut. En pratique, le problème n'est pas si simple, car le système à surveiller est toujours soumis à des perturbations non nécessairement mesurables ou mesurées.

**d. Etape de localisation :**

Il s'agit, à partir des résidus détectés non nuls statistiquement, de localiser le défaut, en d'autres termes de déterminer le ou les éléments défailants.

**e. Etape de prise de décision :**

La prise de décision doit permettre de générer éventuellement sous le contrôle d'un opérateur humain, les actions correctrices nécessaires à un retour à la normale du fonctionnement de l'installation. [24] [32]

## VI. Méthodes de diagnostic

Les méthodes de diagnostic de défaillances et de dégradations utilisées dans les différents secteurs industriels sont très variées, elles correspondent à la diversité des problèmes rencontrés. Il existe plusieurs façons de catégoriser ces méthodes, mais on les classe généralement en deux groupes : les approches qui n'utilisent pas de modèle mathématique et les approches à base de modèle. . [11] [12].

Il est possible de les classer selon le schéma de la figure (II-6)

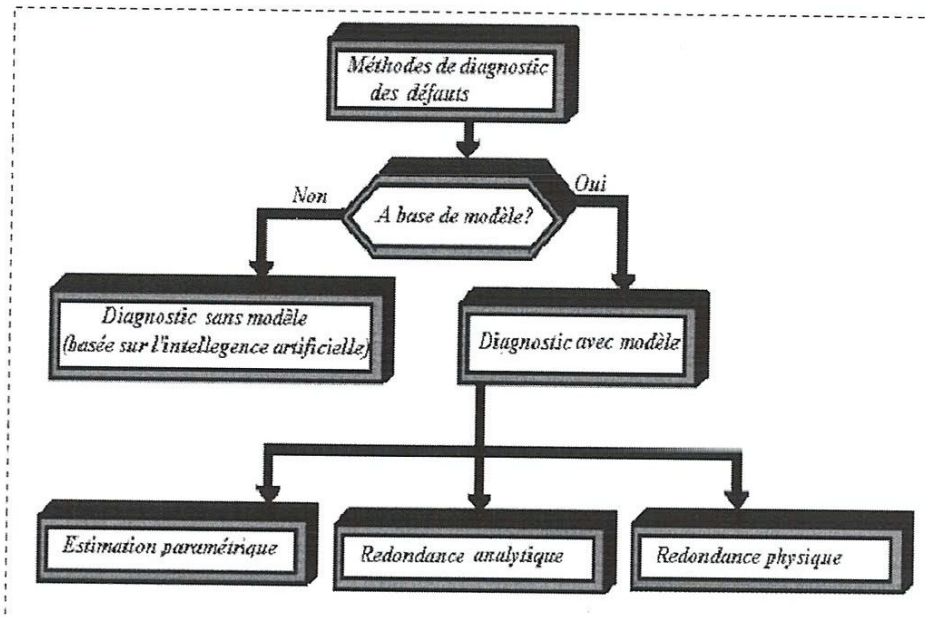


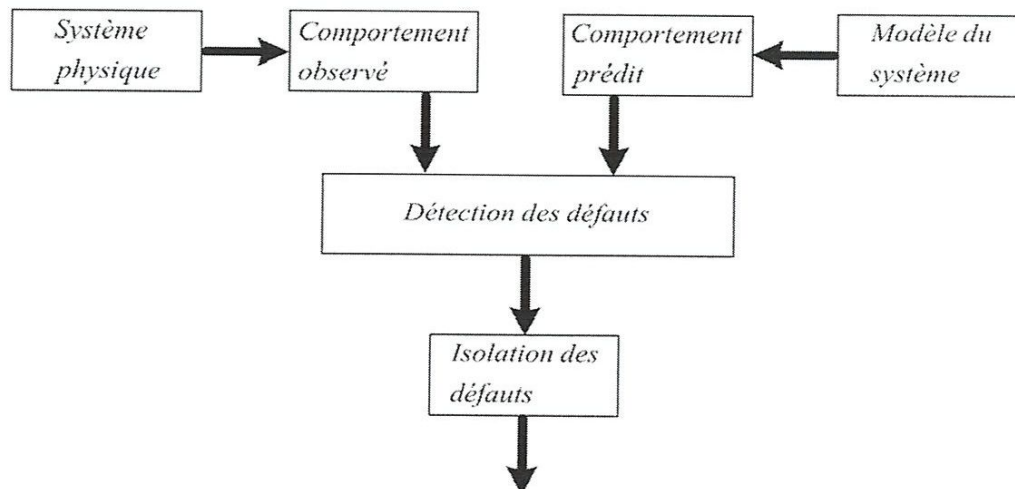
Figure II.6 : Méthodes de diagnostic [12][13]

### 1. Méthodes de diagnostic sans modèle mathématique

Au sens strict, ces méthodes supposent qu'aucun modèle n'est disponible pour décrire les relations de cause à effet. La seule connaissance repose sur l'expertise humaine confortée par un solide retour d'expérience. Dans cette catégorie, on retrouve les méthodes basées sur les tests statistiques et celles basées sur l'**intelligence artificielle**. [11] [12].

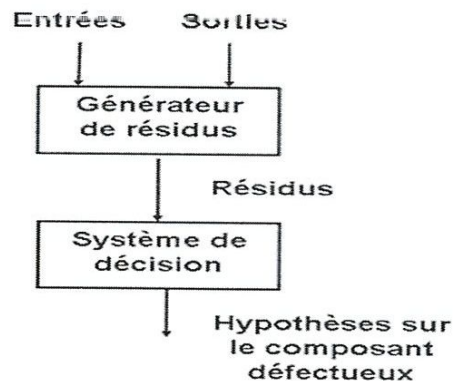
### 2. Méthodes de diagnostic avec modèle mathématique

La première démarche dans la mise en œuvre d'un système de diagnostic à base de modèle consiste à générer des indicateurs de défauts. Ils contiennent des informations sur les anomalies ou dysfonctionnements du système à surveiller. Le principe est de mesurer l'écart entre les mesures des signaux du procédé, capteurs ou actionneurs, et la valeur théorique fournie par le modèle dans des conditions de fonctionnement nominal. [11] [12].



**Figure II.7 : Diagnostic à base de modèle. [11] [12] [13].**

La qualité de la génération de résidus est un élément essentiel pour garantir les performances d'un système de diagnostic. En effet, de la structure (composition et précision) du système de résidus engendré dépendra la robustesse de la détection et de la localisation.



**Figure II.8 : Schéma du principe de FDI [31] [32]**

Le diagnostic à base de modèles est largement présent dans la littérature et a été développé dès les années soixante-dix. Cette méthode s'appuie uniquement sur la vérification de la consistance entre le comportement réellement observé du système et le comportement attendu de ce système. Elle est connue sous le nom de **FDI** (Fault Detection and Isolation), qui, fait intervenir les techniques de génération de résidus, de détection et de localisation.

Cette approche est schématisée sur la figure (II-9) :

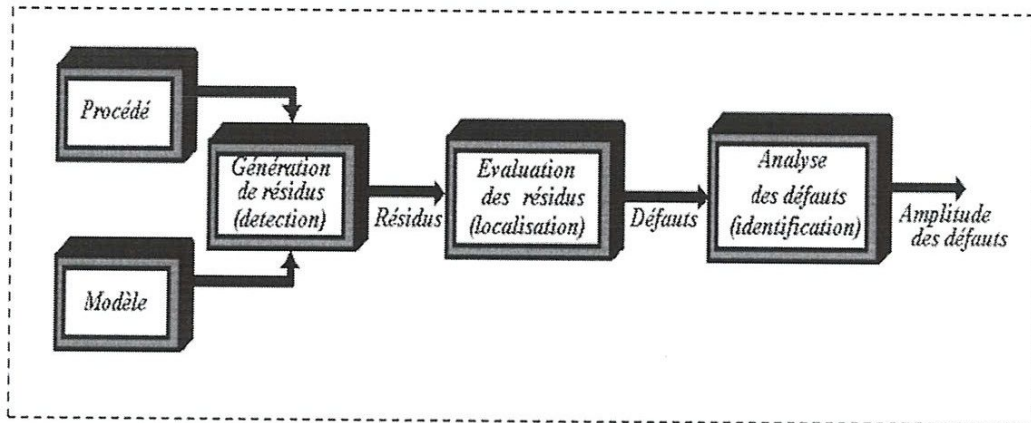


Figure II-9 : Procédure de détection et d'isolation des défauts. [6]

Cette approche utilise des techniques provenant de la théorie de la commande et de la décision statistique. Cette approche se consacre principalement à la partie détection qui consiste à générer des symptômes les plus révélateurs possibles de l'état courant du système. Cette approche se base sur les modèles quantitatifs. Elle utilise la redondance de l'information présente dans le système. Deux types de redondance peuvent être distingués : La redondance physique et la redondance analytique. [4]

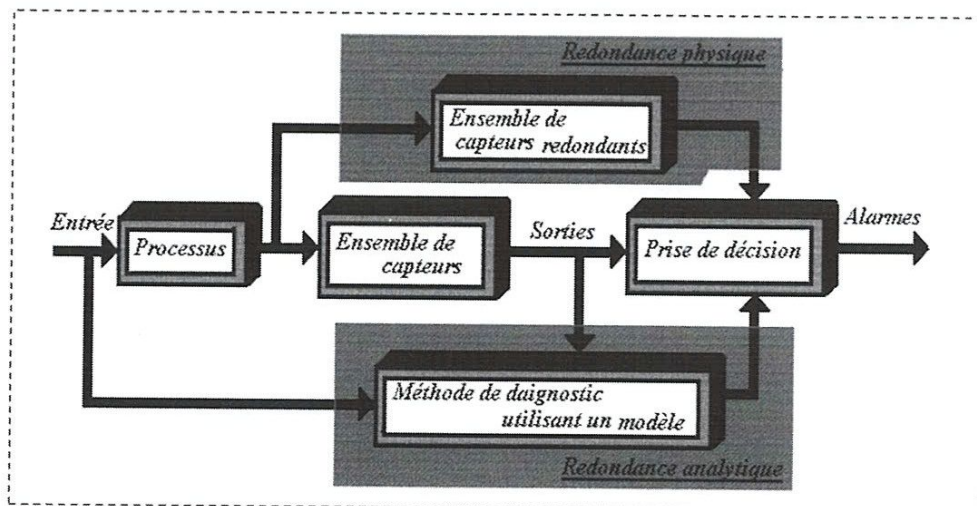


Figure II-10 : Architecture de redondance physique et analytique.[6]

**a) Redondance physique ( Diagnostic qualitatif )**

Les observations et la référence sont issues de plusieurs capteurs qui mesurent la même variable. Les avantages de la redondance matérielle sont la fiabilité et la simplicité de la mise en œuvre. En revanche, le coût et l'encombrement élevés, ainsi qu'un champ d'application limité aux capteurs, sont les principaux inconvénients;

La redondance physique est utilisée pour rendre la détection des défaillances, à partir des signaux mesurés, plus efficace et aussi distinguer les défaillances capteur des défaillances système. Elle consiste à doubler ou à tripler les composants de mesure du système. Si ces derniers sont placés dans le même environnement et émettent des signaux identiques, on considère qu'ils sont dans un état normal, dans le cas contraire on peut conclure qu'une défaillance capteur s'est produite dans au moins un des composants.[3] [4][31]

Elle est le moyen le plus direct pour obtenir une information fiable sur une même variable est de disposer de plusieurs capteurs la mesurant simultanément. Une redondance a trois permettre notamment d'isoler un capteur défaillant. Ce que montre l'avantage de la méthode par la redondance physique, dont est conceptuellement simple, mais cette méthode souffre des désavantages qui limitent son application :

1. Doubler ou tripler le nombre de capteur revient à augmenter considérablement son coût et à affronter des problèmes d'encombrement liées à l'installation et à la maintenance des ces capteur. Elle est par conséquent, utilisée uniquement pour la surveillance des sous-ensembles critiques d'un système.
2. Les composants identiques fabriqués dans la même série peuvent se dégrader de la même façon et tomber en panne en même temps.

**b) Redondance analytique ( Diagnostic quantitatif )**

Les observations et les valeurs de référence sont issues de plusieurs capteurs qui mesurent des variables différentes. Cette redondance utilise un modèle mathématique du système. La redondance analytique permet, d'une part, le diagnostic de défauts de type capteur, actionneur et système et, d'autre part, de remplacer la redondance matérielle par une redondance informationnelle. [32][47]

Les méthodes de redondance analytique nécessitent un modèle du système à surveiller. Ce dernier dépend d'un nombre de paramètres supposés connus lors de son fonctionnement nominal. Le but des méthodes de redondance analytique est d'estimer l'état du système afin de le comparer à son état réel. L'estimation de l'état du système peut être réalisée soit à l'aide de techniques d'estimation d'état, soit par obtention de relations de redondance analytique. Le but des techniques d'estimations d'états est de reconstruire au moyen d'observateurs, les états et les sorties du système, à partir des entrées et des sorties mesurées. On disposera donc d'une estimation du vecteur d'état et du vecteur de sortie. Les sorties du système sont alors comparées aux sorties réelles et tout écart est révélateur d'une défaillance. La théorie de la décision est ensuite utilisée pour déterminer si l'écart observé est dû à des aléas normaux du fonctionnement ou à des défaillances. Cette méthode dite méthode de résidus.. [3] [4] [31] [32]

## VII. Méthodes des résidus

La figure II.11 montre les trois étapes de la méthode des résidus:

- ✦ la génération des résidus
- ✦ évaluation des résidus
- ✦ la prise de décision



Figure II.11 : Schéma général de détection des défauts [31] [32]

### i. Génération des résidus

Les résidus représentent des changements ou des divergences entre le comportement réel du processus. La figure II.12 montre le principe général pour la génération des résidus.

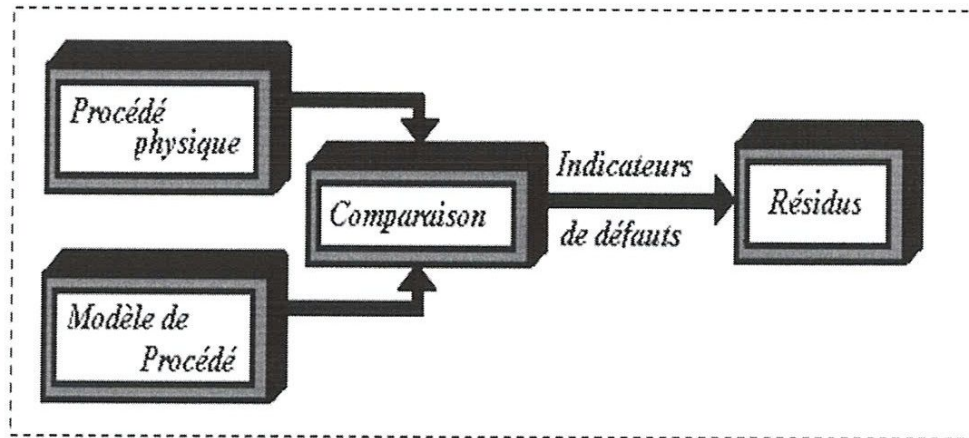


Figure 11.12: Schéma générale des générateurs de résidus [31] [32]

## ii. Evaluation des résidus

En absence de bruits, l'évaluation des résidus est une tâche insignifiante et peut être accomplie par l'inspection visuelle des résidus. Comme garantie par la conception des observateurs, tous les résidus tendent vers zéro quand aucun défaut n'est présent dans le système. L'occurrence d'un défaut modifie le comportement des divers résidus. Ainsi, un défaut est détecté si l'un des résidus  $r_i$  diffère de zéro. [31] [32]

En présence de bruit, l'évaluation des résidus peut être plus difficile. Si le bruit est petit, comparé à l'effet des défauts sur les résidus, alors nous pouvons raisonnablement continuer à exécuter le module FDI par l'inspection visuelle des résidus. Cependant, si le bruit est relativement significatif, l'effet des défauts sur les résidus sera caché par le bruit.

Un modèle stochastique serait utile, mais pour les systèmes non linéaires. En conséquence, les propriétés statistiques des résidus produits sont généralement inconnues. Ainsi, les méthodes statistiques habituelles de décision ne sont pas utiles. L'idée est de filtrer les résidus, puisque l'évaluation des résidus les moins bruités est beaucoup plus facile.

L'utilisation des filtres conventionnels peut mener à des résultats satisfaisants si des caractéristiques du bruit sont connues. L'étape d'évaluation semble être sensible en présence du bruit de mesure.

### iii. Prise de décision

Une fois le fonctionnement incorrect du système constaté, il est primordial d'agir de façon à maintenir les performances souhaitées. Cette prise de décision permet de choisir entre plusieurs options comme arrêter le système ou encore ne rien faire, réévaluer les objectifs ou accepter un fonctionnement dégradé ou bien encore faire de la maintenance. Il peut encore s'agir, quand cela est possible, de reconfigurer ou de réorganiser le système. Le rôle de la reconfiguration est de s'affranchir des conséquences du défaut pour conserver les performances initiales lorsque cela est possible ou encore de réévaluer les objectifs afin d'assurer le fonctionnement dégradé du système si celui-ci est tolérable. Il est évident que ce n'est pas toujours le cas et on se rend bien compte qu'il est important que le défaut soit identifié avec exactitude (étendue, amplitude, type, cause) afin d'en permettre sa compensation éventuelle. La reconfiguration peut donc porter sur le système de régulation (ou une partie de celui-ci), sur la structure de la loi de commande, sur le processus physique (en présence de redondance matérielle, on peut basculer sur les éléments ayant un fonctionnement correct) ou encore sur la réévaluation des objectifs assignés au système.[03] [31]

## VIII. Performance d'une procédure de diagnostic

La performance d'un système de diagnostic est généralement évaluée à travers un certain nombre de critères : la performance de détection et la performance de la localisation. Ces performances reposent sur la définition de critères de la méthode de diagnostic. La phase de détection est très importante dans les processus de surveillance du système. Si cette étape n'est pas correctement réalisée, les défauts peuvent être mal ou pas détectés ou de fausses alarmes peuvent apparaître. [24]

De manière générale, on relève quatre principaux critères :

### 1. La détectabilité :

Est l'aptitude du système de diagnostic à pouvoir déceler la présence d'un défaut sur le processus. Elle est fortement liée à la notion d'indicateurs de défauts (résidus): le générateur de résidus doit, d'une certaine manière, être sensible au défaut que l'on souhaite détecter. Il faudra en fait se fixer un compromis entre le taux de fausses alarmes et celui de non-détection.



## 2. L'isolabilité :

Est la capacité du système de diagnostic à remonter directement à l'origine du défaut. Un défaut engendre souvent une cascade d'alarmes et il peut être difficile de remonter à l'organe défaillant. Le degré d'isolabilité des défauts est lié à la structure des résidus rendus disponibles et à la procédure de détection mise en œuvre.

## 3. La sensibilité :

Caractérise l'aptitude du système de diagnostic à détecter des défauts d'une certaine amplitude, elle dépend de la structure des résidus.

## 4. La robustesse :

Détermine la capacité du système à détecter des défauts indépendamment des erreurs de modélisation. [22]

Ils se décomposent en critères à **minimiser** :

- Le retard à la détection,
- Le taux de fausse alarme et de mauvaise détection,
- Le temps de calcul pour une utilisation en temps réel,

Et en critères à **maximiser** :

- La sensibilité à des défauts de faible amplitude,
- L'insensibilité aux bruits et aux perturbations ainsi qu'aux incertitudes sur les paramètres du modèle du système. [22]

## **IX. Conclusion**

Le diagnostic fait principalement référence à la détection puis l'isolation de défaillances à partir de l'observation du système (par exemple grâce aux mesures de l'entrée et de sortie. L'objectif de la détection est d'indiquer si au moins une faute s'est produite. Si une faute est détectée, son isolation consiste à définir l'origine ou la nature de la faute.

L'identification d'une faute, c'est-à-dire caractériser ou identifier les paramètres d'un défaut, peut également être traitée par la procédure de diagnostic.

L'apparition d'un défaut sur un système peut conduire à une situation critique, non seulement pour le matériel utilisé et son environnement, mais aussi pour l'opérateur humain.

Donc, l'application d'une commande tolérante suppose que l'apparition d'un défaut peut être isolée par un outil de diagnostic. Egalement, l'isolation d'une faute est un bon moyen pour indiquer l'élément du système dont la maintenance est nécessaire.

# Chapitre III

## Commande Tolérante Aux Défauts

## I. Introduction

Au cours des dernières décennies, les performances des équipements industriels ont été considérablement augmentées. Le gain en performances s'est accompagné d'un accroissement de la complexité des installations provoquant une demande plus forte de disponibilité et de sécurité. Cependant, la capacité à effectuer les tâches pour lesquelles le système a été conçu peut être entravées par l'apparition de phénomènes anormaux que sont les défauts. [1]

Introduite dans les années 80, la commande tolérante aux fautes fut l'objet de plusieurs travaux de recherches dans le domaine de systèmes à risque. L'objectif principal est de pallier aux problèmes liés à l'apparition des défauts pouvant conduire à des fonctionnements non désirés, voire catastrophiques. En effet, ce type de problème a été souvent évité en se fondant sur la redondance matérielle à base d'actionneurs et de capteurs. Cette stratégie est non seulement onéreuse mais elle nécessite aussi un important dispositif de maintenance.

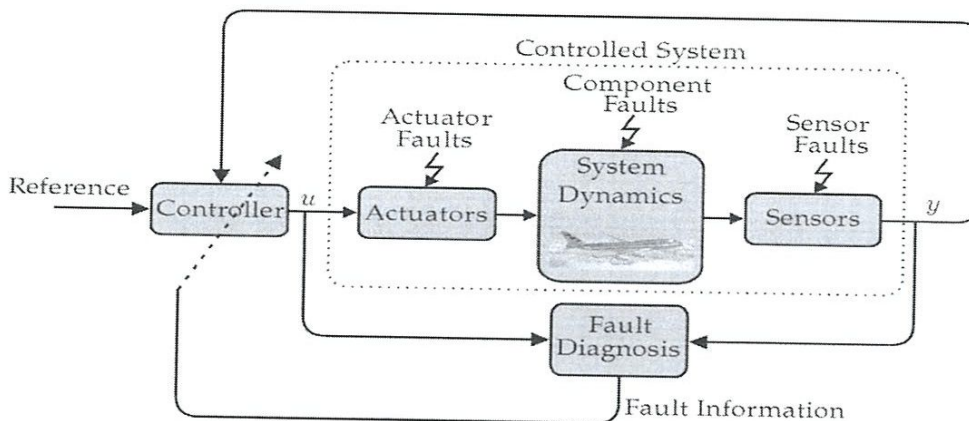
Dans ce contexte et pour répondre aux nouveaux problèmes posés par les impératifs de tolérance aux défauts et au coût, de nombreuses méthodes et techniques fondées sur des modèles dynamiques ont été développées et traitées de manière analytique. L'objectif est de détecter les défauts, de les traiter et de prendre une décision concernant la reconfiguration du système ou de ses objectifs. Cette problématique est abordée dans la littérature comme relevant du problème de la commande tolérante aux fautes.[1][3]

## II. Système tolérant aux défauts

L'objectif d'une commande tolérante aux défauts consiste à déterminer une stratégie de commande qui permet de limiter, voire d'annuler, les effets d'un défaut sur les performances du système. [5]

## III. Commande tolérante aux défauts

Un système de commande tolérante aux fautes se caractérise par son aptitude à maintenir ou retrouver des performances acceptables proches de celles désirées en régime nominal ainsi que dans un mode de fonctionnement dégradé. Une commande tolérante aux fautes possède la capacité de s'accommoder, de manière automatique, des défauts pouvant affecter ses différents composants. La tâche incombant les systèmes tolérants aux fautes est de synthétiser des lois de commande garantissant la stabilité et les performances dynamiques désirées, non seulement lorsque tous les composants sont opérationnels, mais aussi après l'apparition de défauts. [1]



**Figure III.1:** Architecture d'un système "FTC" [38]

En effet, un défaut est défini comme étant une déviation, non souhaitée, d'au moins une propriété caractéristique ou d'un paramètre du système. Le défaut est une dérive pouvant conduire à des mauvais fonctionnements ainsi que la perte totale du composant. Les défauts sont des phénomènes qui apparaissent à différents endroits du système. Les défauts actionneurs agissent au niveau de la partie opérative du système en détériorant le signal d'entrée. Un défaut de type actionneur peut être une perte d'efficacité, un blocage ou une panne totale de l'actionneur.

En revanche, les défauts de type capteur sont la cause d'une mauvaise image de l'état physique du système. Un défaut capteur partiel produit un signal relativement différent de la vraie variable. Il peut se traduire par une réduction de la valeur affichée, de la présence d'un biais ou de bruit accru empêchant une bonne lecture.

#### IV. Classification des méthodes de commande tolérante aux défauts

La classification des approches de la commande tolérante aux défauts peut se reposer sur les effets d'un défaut sur les performances du système. Dont, en présence d'un défaut de faible gravité, une simple commande robuste peut assurer le maintien des performances nominales. Mais dans le cas d'un défaut critique, la détection et la localisation de ce dernier est nécessaire afin de mettre en œuvre une stratégie active de tolérance aux défauts. On distingue alors l'accommodation et la reconfiguration suivant la qualité des performances après fautes. Deux classes qui peuvent être résumées comme suit :

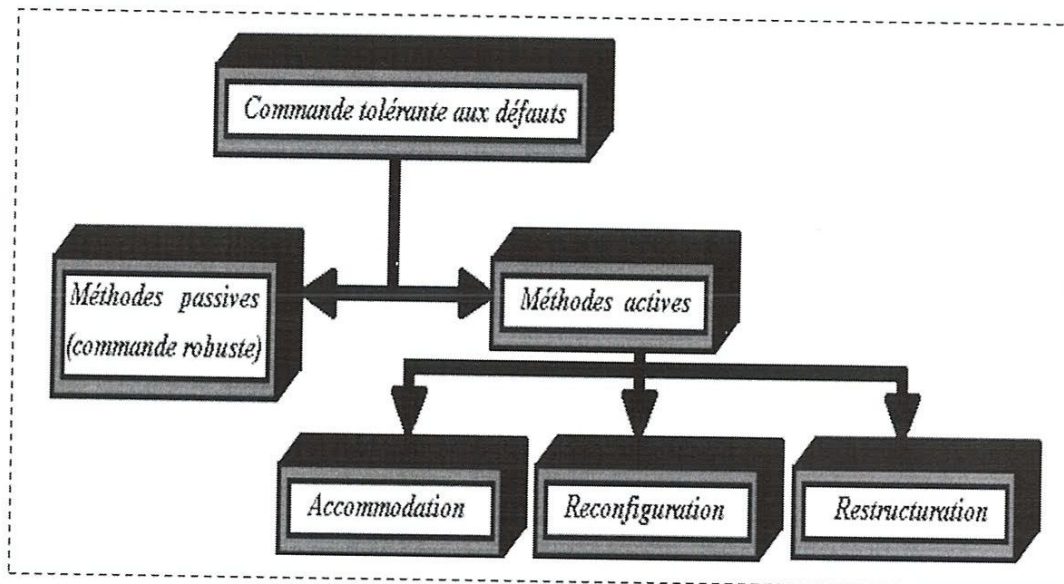
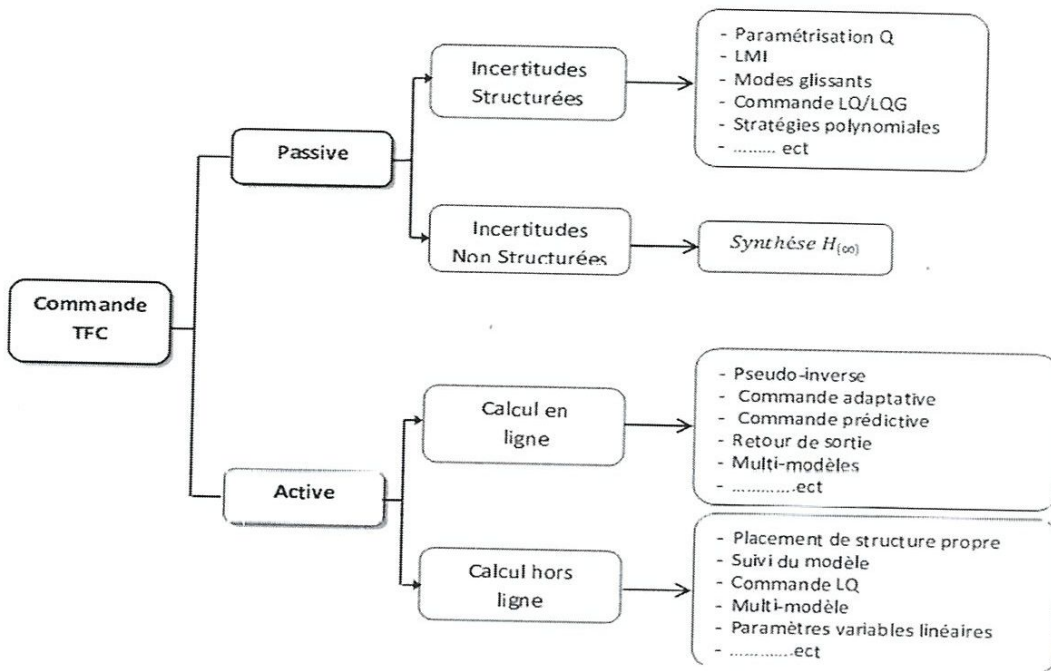


Figure III-2 : Classification des commandes tolérantes aux défauts [10]

Les méthodes de synthèse des systèmes de commande tolérante aux défauts sont généralement classées et regroupées dans deux grandes familles : les approches passives (*Passive Fault Tolerant Control Systems, PFTCS*) et les approches dites actives (*Active Fault Tolerant Control Systems, AFTCS*). La distinction entre les deux approches dépend de la méthode de synthèse, des défauts considérés, du type de redondance présent ainsi que du comportement du système dans le cas dégradé.[8][9][12][31].



**Figure III.3: Classification des méthodes tolérantes aux défauts [1][2][9]**

Une fois le défaut détecté, localisé et identifié, se pose la question de savoir quelle stratégie adopter afin de permettre au système d'assurer la tâche pour laquelle il a été conçu. De toute évidence, la stratégie à employer dépend fortement de facteurs tels que la gravité des défauts, ou le degré de redondance matériel de l'installation.[4]

Les idées principales liées à la conception et au développement d'un système de commande reconfigurable ont été proposées initialement par *Blanke* et *Patton* [7]. Ils ont montré comment la conception de chaque sous-système affecte les performances de l'ensemble du système, ce qui montre la nécessité d'une approche globale pour la conception de tels systèmes de commande pour lesquels on attend un haut degré de sécurité. [7].

## 1. Approche passive de la commande FTC

Dans l'approche passive, les stratégies de commande sont basées sur l'idée de synthétiser une commande permettant de rendre le système insensible aux incertitudes de modélisation et à certains défauts connus a priori. Les défauts sont alors pris en compte dans la conception du système de commande. La méthode est basée sur l'idée simple que les défauts représentent des perturbations que la loi de commande doit prendre en considération dès sa conception initiale, par conséquent aucune information en ligne sur ces défauts n'est nécessaire. Un bloc de détection, localisation et d'estimation des défauts n'est pas

indispensable. L'inconvénient majeur de ces approches réside dans le fait que la robustesse accrue vis-à-vis de certains défauts est obtenue au dépend d'un niveau de performance dégradé en régime normale de fonctionnement. [1][8][9][12]

De plus, la classe des défauts considérés est limitée, il devient, alors, très risqué d'utiliser la commande passive tolérante aux défauts seule. Néanmoins, dans certaines applications où la classe de défauts est connue et restreinte, ces stratégies pourraient s'avérer suffisante[33].

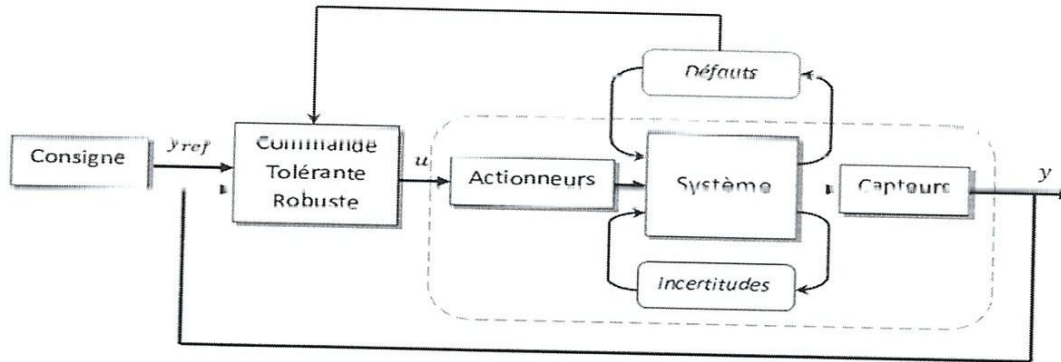


Figure III.4: Schéma de principe d'une loi de commande FTC passive [1]

Afin de mieux comprendre le principe de la tolérance aux défauts des systèmes dynamiques, nous procédons à la décomposition du système en couches ou niveaux. La figure III.5 représente une décomposition hiérarchique d'un système de commande tolérant aux défauts passifs. Dans cette figure, un système « PFTC » est décomposé en trois niveaux :

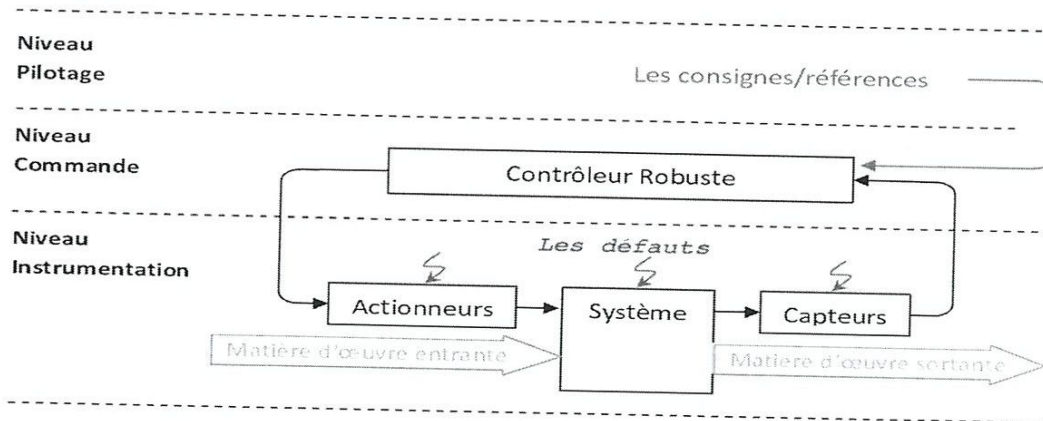


Figure III.5 Décomposition hiérarchique d'un système PFTC [37]



- i. Niveau pilotage qui gère les consignes/références nécessaires pour piloter l'activité en question,
- ii. Niveau commande qui contient le contrôleur robuste chargé de commander en temps réel l'activité,
- iii. Niveau instrumentation qui regroupe les instrumentations nécessaires pour la transformation de la matière d'œuvre à savoir les actionneurs, les capteurs et autres composants du système.

Le contrôleur reçoit les consignes/références de la couche supérieure (niveau pilotage) et les mesures de la couche inférieure (niveau instrumentation) pour élaborer les signaux de commandes pour le système. Le niveau commande fonctionne en permanence pour assurer la poursuite de la référence et l'atténuation des perturbations et de quelques défauts prédéfinis.[37]

On trouve dans la littérature, une vaste panoplie d'outils de synthèse de loi de commande robuste. Des auteurs proposent de modéliser l'effet des défauts sur le système par un processus aléatoire. Une méthodologie basée sur *la minimisation d'un critère* « **LQG** », est ensuite utilisée pour synthétiser le correcteur « **FTC** ». Une autre idée est d'utiliser la *paramétrisation de Youla* comme degré de liberté pour atteindre les performances « **FTC** » requises. Le problème est résolu à l'aide de la technique « **loopshaping** » de la commande robuste « **H<sub>∞</sub>** ». La méthode de synthèse mise en jeu est basée sur les inégalités matricielles linéaires (**LMI**), ou sur la résolution d'équations algébriques de **Riccati**.

Dans le cas où les incertitudes paramétriques sont structurées, les approches utilisées généralement sont la méthode « **QFT** » (**Quantitative Feedback Theory**) et la commande « **CRONE** » (**Commande Robuste d'Ordre Non Entier**). Lorsque ces incertitudes sont non structurées, on peut citer des méthodes telles que l'optimisation à sensibilité mixte et la synthèse « **H<sub>∞</sub>** ». Les incertitudes portant sur les matrices de la représentation d'état du système sont notamment utilisées par les approches quadratiques.

Des approches multi modèles peuvent aussi être utilisées afin de considérer tous ces états paramétriques possibles sans qu'un pessimisme ne soit introduit. C'est le cas du placement de valeurs et vecteurs propres, ou encore du placement de pôles avec calibrage des fonctions de sensibilités. L'évolution des paramètres du procédé quand elle peut être mesurée permet aussi d'élaborer des commandes robustes linéaires à paramètres variant. [6] [26]

Comme l'illustre la figure III.4, les méthodes passives ne requièrent pas d'information en ligne sur le défaut, ce qui représente un avantage par rapport aux systèmes actifs, puisqu'on obtient une certaine autonomie. Le système continuera à travailler avec la même commande et la même structure. Néanmoins, leur domaine d'application reste limité au nombre restreint de défauts anticipés et à une faible capacité de tolérance aux défauts. Cette dernière se traduit par l'obtention des objectifs liés à faibles niveaux de performance, autrement dit, ces commandes sont conservatives. [14]

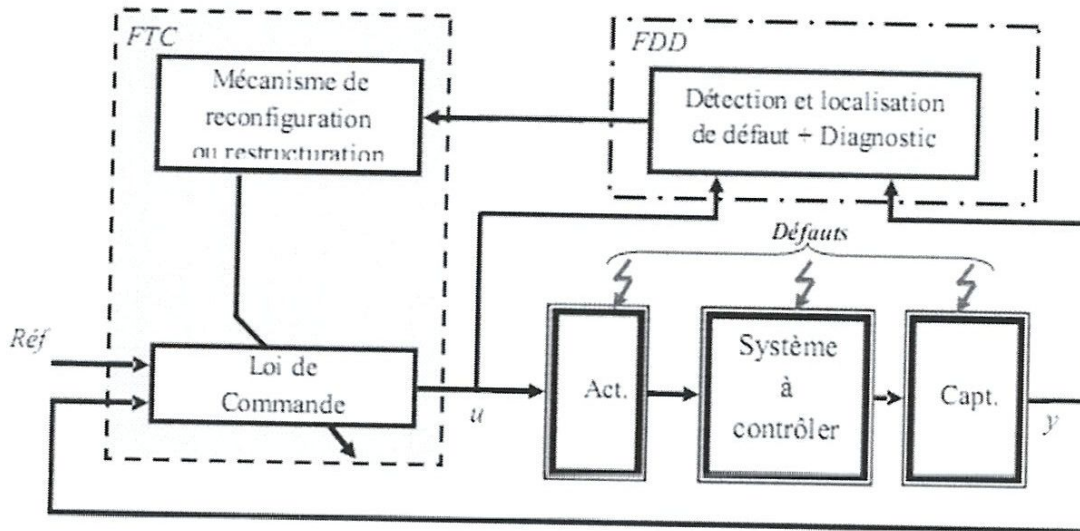
Au niveau de la tolérance aux défauts de ces méthodes, elle est assez limitée. En effet, en boucle fermée, la loi de commande ne peut être tolérante qu'à certains types de défauts et surtout aux incertitudes paramétriques du système. [6]

## 2. Approche active de la commande FTC

A la différence de l'approche passive, l'approche active de la commande tolérante aux défauts intègre un module de diagnostic permettant de détecter et de localiser les défauts imprévus pouvant affecter le système. Une fois qu'un défaut est détecté lors de la phase de diagnostic, la stratégie de la FTC est activée via un mécanisme de reconfiguration. [1]

Généralement, on distingue trois classes de différences :

- a. **L'accommodation des défauts**: elle agit que sur les défauts de faible amplitude. La nouvelle loi de commande est générée par l'adaptation en ligne des paramètres du régulateur et les entrées / sorties entre la loi de commande, sans modifier la structure du système.
- b. **La reconfiguration du système** : elle est utilisée dans le cas où les parties défaillantes ne peuvent pas être accommodées. Elle est caractérisée par la modification des entrées / sorties entre la loi de commande et le système à contrôler à travers un changement des paramètres et de la structure de la loi de commande.
- c. **La restructuration** : il consiste dans la synthèse d'une nouvelle loi de commande en modifiant la structure et les paramètres de cette dernière. Elle est utilisée dans le cas où le problème de commande n'a pas de solution avec l'accommodation et la reconfiguration [33]



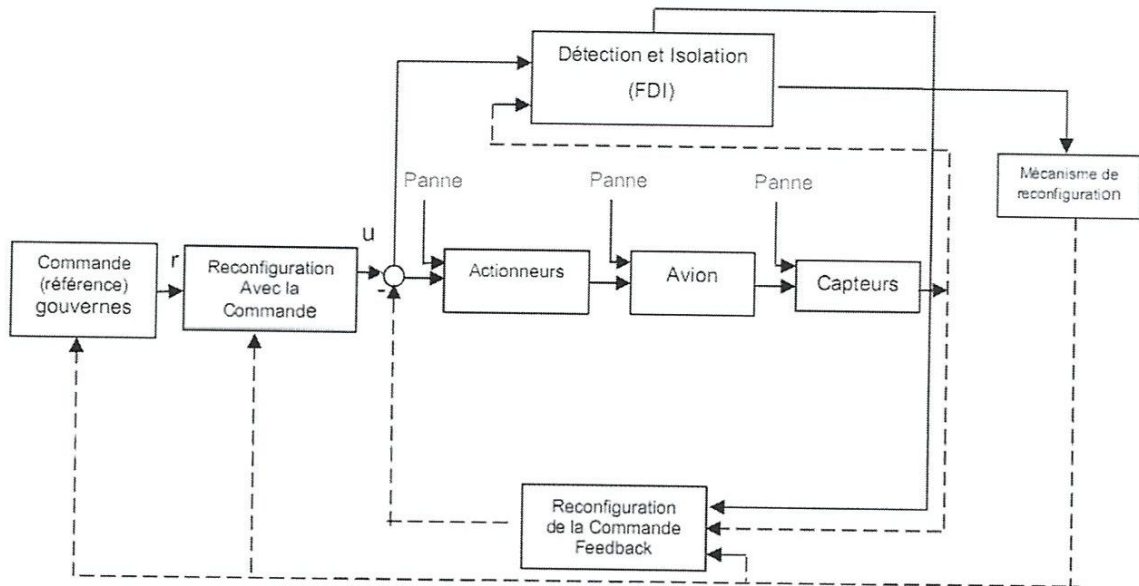
**Figure III.6: Schéma de principe d'une loi de commande FTC active [1][5]**

En général, un système tolérant aux défauts actif est constitué de quatre blocs essentiels:

- a. Le système commandé muni de son contrôleur, de ses actionneurs et de ses capteurs ; ainsi que les défauts pouvant affecter ces derniers ;
- b. Un système de diagnostic (**FDD**) qui surveille le procédé en ligne (en temps réel). Une fois que le défaut est apparu, le bloc diagnostic délivre des informations au superviseur sur l'état du système ;
- c. Un superviseur qui, en cas de défaut, exploite ces informations et redéfinit les consignes et les modifications à apporter aux lois de commande « **FTC** ». (*un mécanisme de reconfiguration + un régulateur reconfigurable*)
- d. Un bloc de gestion des références appliquée au système. [2][4][5][9][13][31]

Le bloc de diagnostic de défauts (*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. A partir de cette information en ligne produite par le module de « **FDD** », le régulateur reconfigurable doit être synthétisé automatiquement pour maintenir la stabilité, la dynamique du système ainsi que ses performances initiales. 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. [14]



**Figure III.7: Schéma général d'un système de commande tolérante aux défauts [7]**

Dans ce schéma, les lignes continues représentent les principaux signaux (*commande, consignes, estimations, mesures*) pendant que les lignes discontinues représente l'adaptation (*le réglage, la programmation, la reconfiguration ou la restructuration*). Le bloc « FDI » suit de manière permanente le comportement, dont la stabilité, du système en utilisant le signal de retour d'état de la boucle de pilotage/guidage et commande la position des actionneurs, il fournit aussi au bloc de surveillance les informations concernant l'emplacement et l'ampleur des défauts.

Une bonne mise en œuvre de la commande de reconfiguration dépend de la capacité du sous-système « FDI » à identifier le défaut d'une manière prompte. C'est important que l'unité « FDI » soit capable de fournir et diagnostiquer l'information dans un format convenable et faciliter au système l'adoption de la commande adaptative. [7]

La majorité des approches actives qui traitent le problème de la commande « FTC », modifie (*partiellement ou complètement*) la loi de commande déjà en place pour mettre en œuvre une loi de commande « FTC ». Cette approche permet de concevoir un système « FTC » indépendamment du correcteur nominal déjà en place.

Les systèmes tolérants "actifs" réagissent d'une manière "active" lorsque le défaut apparaît selon deux approches distinctes : *la sélection d'une loi de commande pré-calculée ou la synthèse d'une nouvelle loi de commande en ligne.* [1][2]

### i. Lois de commande pré-calculée :

Cette première approche est basée sur l'idée qu'il existe un banc de régulateurs pré-calculés pour chaque mode de fonctionnement. Un régulateur pour le mode de fonctionnement nominal et un régulateur pour chaque mode défaillant. La sélection du régulateur associé au mode de fonctionnement actif (présent) est effectuée par le coordinateur, qui est constitué d'un ensemble d'estimateurs permettant la reconstruction des sorties du système pour chaque mode de fonctionnement. Après avoir évalué les performances de chaque mode, le régulateur concerné est sélectionné. [10] [23]

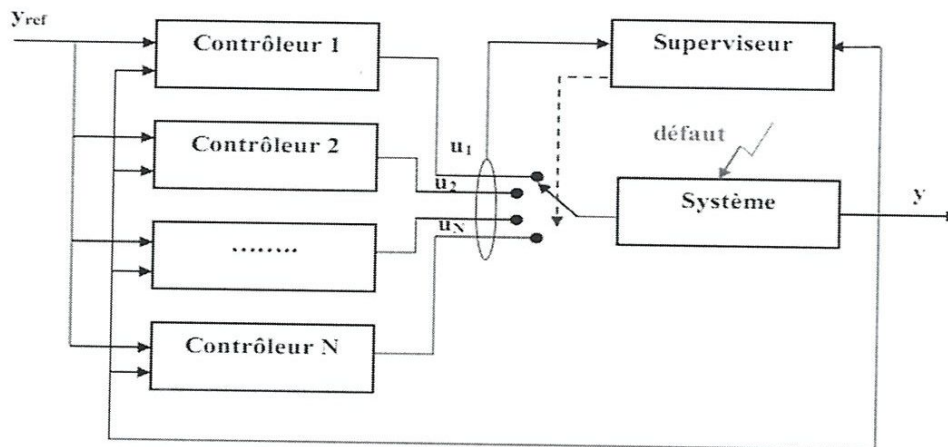


Figure III.8 Le principe de la commande AFTC pré-calculée [9][23][31]

Cette approche ne semble pas raisonnable dans le cas d'un nombre important de défauts car il faut également un nombre important de régulateurs à synthétiser, de ce fait, nous nous intéressons à la seconde approche fondée sur la synthèse d'une nouvelle loi de commande en ligne. [23]

### ii. Lois de commande synthétisée en ligne

Suivant le défaut, en fonction de sa sévérité et les informations qui peuvent être fournies par le bloc diagnostique, trois cas peuvent être considérés : l'accommodation, la reconfiguration ou la restructuration du système. [23]

Les méthodes actives réagissent à l'apparition d'un ou de plusieurs défauts par la reconfiguration en ligne de la loi de commande, ou du système ou des objectifs. Leur objectif principal est de comparer au mieux l'effet des défauts sur le système afin que la stabilité et les performances du système soient maintenues en jouant sur la robustesse de la commande qui doit être améliorée à chaque détection de défaut. Il existe deux méthodes dans cette approche. La première consiste en l'accommodation des défauts et l'autre en la reconfiguration soit de la loi de commande ou de l'objective ou du système.

### iii. Méthodes FTC actives

Grâce à leurs meilleures performances et leur capacité de traiter une large classe de défauts, les méthodes « **FTC** » actives sont plus développées dans la littérature que les méthodes passives. On peut identifier les principales méthodologies pour la conception de stratégies d'accommodation de défauts [31] :

- 1) la méthode du pseudo-inverse
- 2) l'approche par modèle de référence
- 3) le placement de structure propre
- 4) la loi de commande par séquençement de gain
- 5) la commande prédictive à base de modèle
- 6) Approche multi-modèle ( MMC )
- 7) La méthode adaptative
- 8) La commande prédictive (modèle predictive control –MPC )

#### 1) Technique du pseudo inverse :

La méthode pseudo-inverse est l'une des méthodes « **FTC** » les plus citées grâce à sa simplicité de calcul et sa capacité de traiter une grande classe de défauts système, à condition qu'ils soient prédéfinis. [4][31]

Cette approche consiste à synthétiser le gain d'une loi de commande par retour d'état de telle sorte que la dynamique du système défaillant en boucle fermée s'approche de celle en fonctionnement nominal, en minimisant un critère donné.[4]

Elle considère un système nominal de la forme :

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \\ y(t) = Cx(t) \end{cases} \quad \text{III.1}$$

où «  $x(t) \in \mathbb{R}^n$ ,  $u(t) \in \mathbb{R}^m$ ,  $y(t) \in \mathbb{R}^p$  ».  $A, B$  et  $C$  sont des matrices de dimensions appropriées. La loi de commande considérée dans le cas nominal est un retour d'état défini par «  $u(t) = Kx(t)$  », sous l'hypothèse d'accessibilité du vecteur d'état. Après l'apparition du défaut, le système (III.1) est modélisé par une représentation d'état de la forme :

$$\begin{cases} \dot{x}^f(t) = A_f x^f(t) + B_f u^f(t) \\ y^f(t) = C_f x^f(t) \end{cases} \quad \text{III.2}$$

Où la nouvelle loi de commande tolérante aux défauts «  $u_f(t)$  » est de structure équivalente, c'est à dire «  $u_f(t) = K_f x^f(t)$  ». La méthode de pseudo-inverse consiste à calculer la matrice de gain de retour d'état «  $K_f$  » de telle sorte que la distance entre la dynamique en boucle fermée, du système nominal et celui défaillant, soit minimisé. Le problème est reformulé comme suit,

$$\begin{cases} K_f = \arg \min \| (A + BK) - (A_f + B_f K_f) \|_F \\ = B_f^+ (A + BK - A_f) \end{cases} \quad \text{III.3}$$

Où «  $B_f^+$  » est la matrice pseudo-inverse de «  $B_f$  ». «  $\| \cdot \|_F$  » représente la norme de Frobenius.

Le principal inconvénient relatif à cette méthode réside dans le fait que la loi de commande optimale ne garantit pas toujours la stabilité en boucle fermée du système défaillant.

En effet, le gain de retour «  $K_f$  » minimisant le critère (III.3) n'assure pas forcément la stabilité du système dégradé en boucle fermée. [4][7][9][12][13][14][31]

## 2) Approche par modèle de référence :

La méthode à base de modèle de référence permet de concevoir une nouvelle loi de commande telle que les performances du système défaillant commandé s'approche le plus possible de celles d'un modèle désiré, au sens d'un critère.

Généralement, la méthode considère un modèle de référence de la forme :

$$\begin{cases} \dot{x}_M = A_M x + B_M r \\ y_M = x_M \end{cases} \quad \text{III.4}$$

Le but est de synthétiser les matrices «  $K_r$  » et «  $K_x$  », telles que la loi de commande par retour d'état «  $u$  » définie par :

$$u = K_r r + K_x x$$

III.5

Puisse maintenir un niveau de performance acceptable du système défaillant. On cherche alors les matrices «  $K_r$  » et «  $K_x$  », telles que le système défaillant coïncide au modèle de référence en boucle fermée. Il vient alors que :

$$K_x = (CB)^{-1}(A_M - CA)$$

$$K_r = (CB)^{-1}B_M$$

III.6

Ces gains sont obtenus si le système a le même nombre de signaux mesurés que d'actionneurs et que l'inverse de la matrice «  $CB$  » existe. Lorsque les matrices du système «  $A_f$  », «  $B_f$  » sont inconnues, on peut les substituer par des estimation ( $\hat{A}, \hat{B}$ ), il en résulte alors une méthode indirecte qui ne garantit pas toujours la stabilité en boucle fermée. [7][12][21].

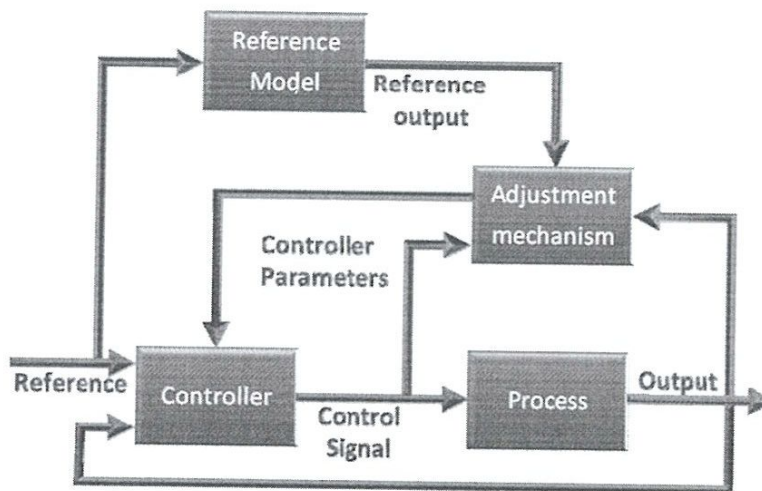


Figure III.9: A simplified Block diagram of a model reference adaptive system

[48]

### 3) Placement de structure propre :

La méthode proposée consiste à placer les valeurs et les vecteurs propres caractérisant la dynamique de la boucle fermée de façon à être robuste vis-à-vis des défauts. [7][12][21][23][26][31]



La méthode par placement de structure propre calcule le gain de retour d'état pour le système avec défauts comme étant la solution du problème suivant :

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{trouver } F_R \\ \text{tel que } (A_f + B_f F_R) v_i^f = \lambda_i v_i^f, i = 1, 2, \dots, N \\ \text{et } v_i^f = \arg_{v_i^f} \min \|v_i - v_i^f\|^2 w_i \end{array} \right. \quad \text{III.7}$$

Avec «  $\arg_{v_i^f} \min \|v_i - v_i^f\|^2 w_i = (v_i - v_i^f)^T W_i (v_i - v_i^f)$  » où la matrice est une matrice de pondération définie positive servant de degré de liberté supplémentaire. En d'autres termes le nouveau gain est synthétisé de manière à ce que les pôles du système en boucle fermée coïncident avec les pôles du système nominal en boucle fermée; de même que les vecteurs propres des matrices d'état doivent être les plus proches possibles. Le désavantage vient du fait que les erreurs de modèles ne sont pas aisément incorporables dans le calcul d'optimisation et que seuls des régulateurs statiques sont considérés. [7][21][12][31]

L'avantage de cette approche comparée à la méthode du pseudo-inverse réside dans le fait que la solution fournie (si elle existe), assure la stabilité de la boucle fermée du système défaillant. [9][25][26]

#### 4) La loi de commande par séquençement de gain :

Appartenant à la classe des méthodes à base de projection, cette loi a été largement appliquée au domaine de l'aéronautique où un correcteur linéaire invariant unique ne peut remplir l'ensemble des objectifs de performance et de robustesse sur la totalité du domaine de fonctionnement (situation normal et défaillante).

L'idée consiste alors, à partir d'une structure d'une loi de commande « FTC » fixe, à modifier la valeur des gains du correcteur « FTC » en fonction de certains paramètres physiques variant avec le temps (la vitesse d'un véhicule, l'altitude, la masse, etc....) et/ou en fonction d'un résultat de diagnostic. [25][49]

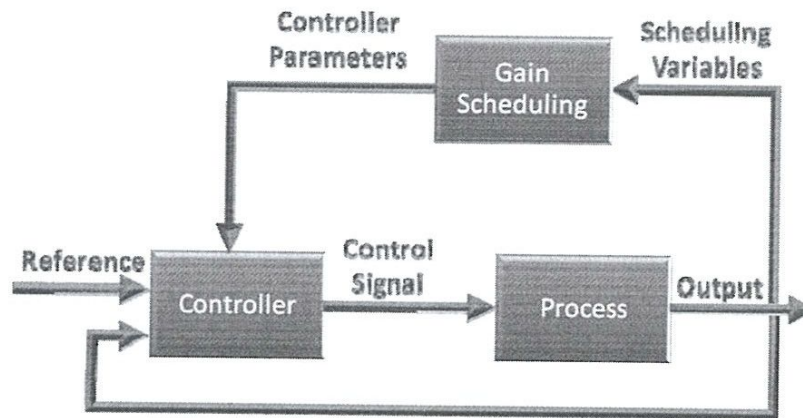


Figure III.10: A simplified block diagram of a gain scheduling controller [48]

### 5) Approche Multi-Modèles (MMC) :

L'approche Multi-Modèle est basée sur un ensemble de modèles «  $j = 1, \dots, N$  » décrivant le système dans diverses conditions opératoires selon la représentation d'état suivante :

$$\begin{cases} \dot{x} = f_j(x, u) \\ y = g_j(x, u) \end{cases} \quad \text{III.8}$$

Où «  $f_j(x, u)$  » et «  $g_j(x, u)$  » sont des fonctions connues pour chaque modèle «  $j$  ». Chaque modèle représente un type de défaut. Ainsi, pour chaque modèle «  $j$  », un régulateur «  $R_j$  » est synthétisé.

L'objectif est de synthétiser en ligne la loi de commande à appliquer au système au travers une combinaison pondérée des différentes lois de commande issues de chaque régulateur pré-calculés «  $R_j$  ».

Les désavantages résident dans le fait qu'un nombre fini et prédéterminé de défauts est capable d'être détecté. En effet, selon la plupart des approches multi-modèles, celles-ci ne considèrent qu'un seul défaut pouvant intervenir à la fois sur le système et que par conséquent un seul modèle «  $j$  » est sélectionné. Si le modèle représentant le système à l'instant «  $k$  » n'appartient pas à l'ensemble des modèles prédéfinis, la commande alors associée n'est pas optimale correspondant à une pondération inadéquate de plusieurs modèles à la fois conduisant le système à l'instabilité.

Dans cette famille de méthodes « **AFTC** », deux principales approches peuvent être distinguées : Multiple Model Switching and Tuning « **MMST** » et Interacting Multiple Model « **IMM** ». [23][26][31]

#### ❖ La Commande **MMST** (Multiple Model Switching and Tuning):

L'approche multi-modèle concerne plus particulièrement la commande reconfigurable. Ainsi, lorsqu'un défaut apparaît, la stratégie « **MMST** » conduit à commuter sur une loi de commande pré-calculée correspondant à une situation donnée. Ainsi, chaque scénario de défaut est décrit par un modèle différent. Ces modèles sont implantés en parallèle, et à chacun correspond un régulateur différent.

Le problème est alors équivalent à définir quel couple (**M,K**) de modèle et de régulateur est à chaque instant le plus approprié pour une situation particulière. En présence d'un défaut, la représentation du système est supposée s'écarter du modèle nominal « **M<sub>0</sub>** » et adopter un modèle de défaillance (**M<sub>f</sub>**). La méthode « **MMST** » permet en principe de converger très vite vers le modèle qui permet de mieux couvrir les effets du défaut et est donc plus performant qu'une approche par modèle unique. [9][21][25][26]

#### ❖ La commande **IMM** :

La méthode de commande par interaction de modèles multiples atténue les limitations de la méthode « **MMST** » en considérant que les modèles de défauts sont représentés par une combinaison convexe de modèles pris dans un ensemble de modèles.

La commande par interaction de modèles multiples utilise un banc de filtres de **Kalman** où chaque filtre est associé à un mode de fonctionnement différent du système. L'estimation utilisée au début de chaque cycle, est une combinaison appropriée des estimations récentes, ce qui permet à l'algorithme « **IMM** » de prendre en compte l'évolution des modes du système. La commande par interaction de modèles multiples met néanmoins en œuvre un changement brusque de modélisation pour le système. Les probabilités associées à chaque modèle sont calculées à chaque instant pour décider du passage du modèle actuel à un nouveau modèle.

Pour tous les types de commande multi-modèle on retrouve la caractéristique que seul un nombre fini et prédéterminé de défauts sont capables d'être détectées. En effet, pour la plupart des approches multi-modèles étudiées, celles-ci considèrent qu'un seul défaut peut

survenir simultanément dans le système et que par conséquent un seul modèle doit être choisi. Si le modèle représentant le système à l'instant «  $k$  » n'appartient pas à l'ensemble des modèles prédéfinis, la commande alors associée risque fort de ne pas être efficace car correspondant à une pondération inadéquate de plusieurs modèles. Dans ce cas la commande peut conduire le système à l'instabilité. [7][4][12]

#### 6) Les méthodes adaptatives :

Ce type de commande a la capacité d'adapter automatiquement les paramètres du régulateur en fonction des changements paramétriques du système détectés à partir d'écart dans les performances réalisées par le système. Ce type de méthode ne requiert donc pas de module « **FDI** » comme c'est le cas dans les schémas de commande de type « **AFTC** ». Les méthodes de commandes avec paramètres linéaires variant dans le temps ( Linear Parameter Varying -**LPV**) dédiées au « **FTC** » sont incluses dans la classe des commandes adaptatives.

L'inconvénient de cette approche réside dans la difficulté de déterminer les matrices de pondération nécessaires au compromis stabilité/performance. [7][14][22]

#### ❖ Commande par adaptation du modèle de référence (MRAC) :

Cette méthode a été développée principalement par Calise en vue de son application dans le domaine aéronautique. Elle conduit à l'élaboration d'une commande adaptative suivant un modèle de référence « **MRAC** ». Cette approche a été évaluée avec succès par simulation sur l'avion de combat avancé « **TAF**A » et sur le « **X-36** ». Dans le cas de la commande d'un avion, l'approche considère que la dynamique de l'avion est composée de trois sous-systèmes « **SISO** » et le système de commande comporte un modèle de référence, un module d'élaboration des signaux de commande, un mécanisme de distribution des signaux de commande vers les différentes surfaces aérodynamiques. [4][7][9][12]

#### ❖ Linéarisation Adaptative par retour d'état par les réseaux de neurones (Artificial Neural Networks-ANN) :

La linéarisation par retour d'état (Feedback Linearization) est une technique de reconfiguration en ligne qui s'applique aux systèmes non linéaires. La méthode est basée sur un contrôleur adaptatif qui modifie en ligne les paramètres de l'algorithme de calcul du signal de commande par estimation de ceux-ci.

Les régulateurs linéaires ne fonctionnent généralement correctement que pour de petites variations des variables autour de leur valeur nominale. Le concept de linéarisation par retour d'état ou de sortie peut être utilisé pour compenser les effets liés aux non linéarités. Les défauts sont identifiés en estimant les paramètres des équations du mouvement de l'avion par la méthode des moindres carrés récursifs. Les paramètres estimés sont alors utilisés pour mettre à jour les nouveaux gains du régulateur.

#### ❖ **Commande par mode glissant (SMC)**

L'intérêt de ce type de contrôleur pour la reconfiguration de la commande est double:

- C'est un contrôleur robuste qui peut faire face à des défauts structurels qui conduisent à une modification de la dynamique du système.
- Elle permet de gérer des cas où il y a perte partielle des surfaces de l'actionneur, en évitant les mises en saturation par l'emploi d'intégrateurs, même si ceci réduit la précision des résultats obtenus.

Cette technique présente aussi des conditions d'utilisation : le système doit être carré, ceci suppose qu'une seule surface de commande est associée à chaque variable de commande, et aucune surface de commande ne peut être totalement perdue. [4][7][21]

#### ❖ **Commande par réaffectation des actionneurs :**

En cas d'un défaut d'actionneur, cette technique de commande utilise les redondances fonctionnelles existantes entre divers actionneurs, voisins ou pas, pour réaliser l'effet désiré, que ce soit une force ou un moment. Diverses techniques ont été proposées dans la littérature pour être appliquées au cas de la conduite du vol des avions, mais celles-ci ne considèrent en général qu'un modèle linéarisé de la dynamique du vol, ce qui en limite considérablement la portée.

Cependant, il y a deux limitations importantes à cette approche de reconfiguration :

- Le système ne retrouvera pas nécessairement ses performances nominales, même en présence d'une loi de commande stabilisante, car l'action effectivement appliquée au système commandé peut ne pas être égale à celle prévue par le contrôleur.

- Les modifications de la dynamique et les limitations des actionneurs après un défaut ne sont pas prises en considération dans la loi de commande. Ceci signifie que le système de commande pourra envoyer des signaux de commande auxquels les capteurs seront incapables d'obéir de façon nominale. [4][31]

❖ **Loi de commande par reséquencement (Control Law Rescheduling-CLR) :**

Une approche simple de la conception de lois de commande tolérante aux défauts consiste à enregistrer au préalable des valeurs de gains pré-calculés. Ceci correspond aux lois de commandes tolérantes aux défauts par reséquencement. Ce type de commande rappelle celui utilisé, c'est le Gain Scheduling, lors des variations des paramètres associées à une évolution de la position de l'avion dans le domaine de vol. Pour ce type d'application, le mécanisme de **CLR** est déclenché par la détection d'écarts entre les performances attendues et les performances effectives. [49]

Un système de commande muni d'une telle loi peut être vu comme un système mettant en œuvre une commande par retour d'état dont les gains sont ajustés par compensation. Cependant l'ajustement effectué par cette technique ne tient pas compte des performances du système en boucle fermée pour compenser une action incorrecte de la « **CLR** ». Ceci suppose une robustesse accrue du module de « **FDI** » car une fausse alarme ou un défaut non détecté pourrait entraîner une instabilité et conduire au désastre. [12][31]

## 7) La commande prédictive (Model Predictive Control-MPC)

Cette technique de synthèse de lois de commande a pris au cours du temps différentes formes tels : Model Basique de Commande Prédictive « **MBPC** », Commande par horizon fuyant (Receding Horizon Control), commande prédictive Généralisé (Generalized Predictive Control-**GPC**), commande dynamique de la matrice (Dynamic Matrix Control-**DMC**) et optimisation séquentielle de la commande en boucle Ouverte (Sequential Open Loop Optimization-**SOLO**).

Cette méthode diffère des autres parce que :

- Un modèle interne explicite est utilisé pour élaborer les prédictions sur le comportement du système.

- La commande optimale est calculée à chaque pas de temps de façon à optimiser une mesure de performance portant sur tout l'horizon de temps restant.
- Seule la partie initiale du signal de commande calculé sur l'horizon fuyant actuel est effectivement implémentée et au pas de temps suivant, le cycle de prédiction et d'optimisation se répète. [6] [8]

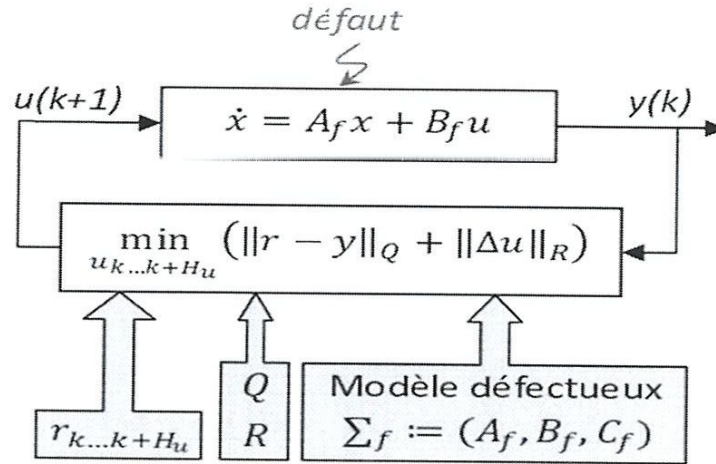


Figure III.11 : Principe de la méthode de la commande prédictive [26]

iv. L'architecture d'une commande FTC active

La commande FTC active est amené à réagir aux diverses défaillances du système en accommodant ou en reconfigurant les lois de commande tout en préservant la stabilité et les performances de celui-ci. L'architecture d'une commande FTC active est décrite comme le montre la figure suivante :

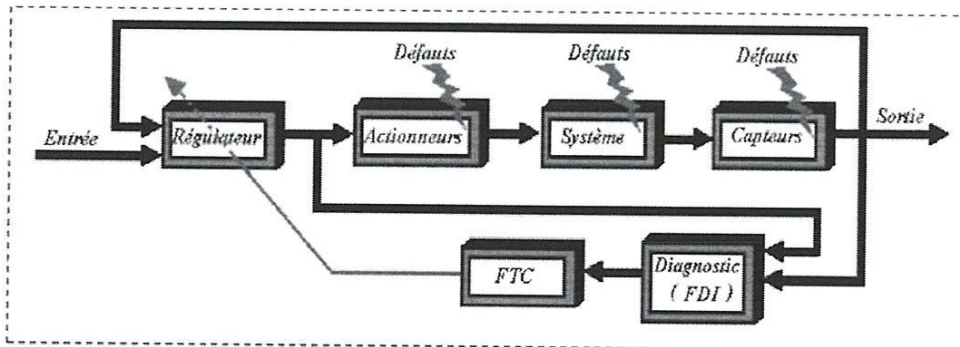


Figure III-12 : Schéma de principe d'une loi de commande FTC active [13][25].

Le principe fonctionnel de la commande FTC, se repose sur le fonctionnement duel des deux blocs, à savoir le bloc FDI et le bloc FTC ; qui peut être résumé comme suit :

**a) Le bloc FDI** : sa fonction principale est la détection et l'estimation du défaut ainsi que les variables d'états du système en ligne. Une fois que le défaut est apparu, le bloc FDI fournit en ligne les informations identifiants le défaut et l'état du système au bloc FTC

**b) Le bloc FTC** : le fonctionnement du FTC dépend des informations fournis par le bloc FDI. En fonction du mécanisme utilisé et du défaut survenu, il procède à l'accommodation ou à la reconfiguration en ligne de la loi de commande.[47]

## V. Conclusion

Ce chapitre a été consacré au principe de la commande tolérante aux défauts. Dans un premier temps, nous avons exposé les différents types de défauts qui peuvent apparaître dans un procédé industriel, ainsi que leur modélisation. Dans un seconde temps, nous nous sommes intéressés à la méthode de diagnostic à base de modèle (FDI), pour la détection et la localisation des défauts. Ensuite, nous avons présenté une analyse des différentes approches d'accommodation des défauts, à savoir l'approche active et l'approche passive, qui a permis de mettre en évidence les limitations des approches passives. Nous nous sommes alors intéressés aux méthodes actives.



# Chapitre IV

## La Commande Prédicative " MPC "

## I. Introduction

La commande prédictive à base de modèle (MPC, sigle Anglais correspondant à Model Predictive Control) connue aussi sous l'appellation de commande à horizon fuyant ou glissant (Receding Horizon Control or Moving Horizon Control) est apparu au début de la décennie 60, connue plus simplement comme commande prédictive, se situe parmi les commandes avancées les plus utilisées dans le milieu industriel ces dernières décennies [15], grâce à ses performances, sa facilité de mise en œuvre et sa capacité d'inclure de manière explicite des contraintes imposées dans l'étape de calcul de la loi commande.

La commande prédictive à base de modèle notée "MBPC" (Model Based Predictive Control). MBPC n'indique pas une stratégie de commande spécifique mais plutôt des méthodes de contrôles qui font l'utilisation explicite d'un modèle du processus pour obtenir le signal de commande en minimisant une fonction coût. L'idée principale des commandes prédictives est basée sur l'utilisation d'un modèle du système à commander pour prédire sa sortie sur un certain horizon, l'élaboration d'une séquence de commandes futures minimisant une fonction coût, l'application du premier élément de la séquence optimale précédente sur le système et la répétition de la procédure complète à la prochaine période d'échantillonnage. C'est le principe de l'horizon fuyant. MBPC implique alors la résolution d'un problème d'optimisation de dimension finie à chaque période d'échantillonnage. Il est clair que le temps d'obtention de la solution joue un rôle important dans l'application de cette stratégie en temps réel. Si pour les systèmes lents à grande période d'échantillonnage, l'application des méthodes numériques ne pose pas de problème, pour les systèmes rapides échantillonnés à haute fréquence tels que les moteurs, robots..., la solution numérique en ligne du problème d'optimisation peut être impraticable. Aussi, il est utile de rechercher des solutions analytiques rapides et efficaces. [43].

Ce chapitre introduit le cadre général de la famille de lois de commande prédictives. Nous abordons les méthodes de résolution du problème d'optimisation associé à la commande prédictive linéaire et non linéaire.

## II. Bref historique

Au début des années 1960, Propov[ 1] fut l'un des premiers à proposer explicitement une forme de commande prédictive basée sur un modèle en utilisant une méthode de programmation linéaire. L'idée est d'insérer, dans l'algorithme de commande, un élément de prédiction concernant l'évolution des sorties du procédé, donnée par un modèle. Le calculateur détermine alors, à l'instant d'échantillonnage présent, la séquence de commandes à appliquer sur un horizon de prédiction , à la prochaine période d'échantillonnage, seule la première composante de cette séquence est effectivement appliquée au procédé et la résolution recommence de la même façon en prenant en compte les nouvelles mesures du procédé et ainsi de suite.[52]

La première génération de commande prédictive appliquée en milieu industriel a été initiée par Richalet [10] sous le nom Identification et Commande (IDCOM) et par les ingénieurs de Shell sous le nom Dynamic Matrix Control (DMC), une liste dans l'annexe A, propose un aperçu des variantes de MPC les plus « classiques ». Dans ces approches, le modèle est de type boîte noire, l'objectif est de poursuivre une référence mais les contraintes ne sont pas encore prises en compte. Ces algorithmes possèdent un impact énorme sur la commande des procédés industriels et permettent de définir un exemple de commande prédictive basée sur un modèle.

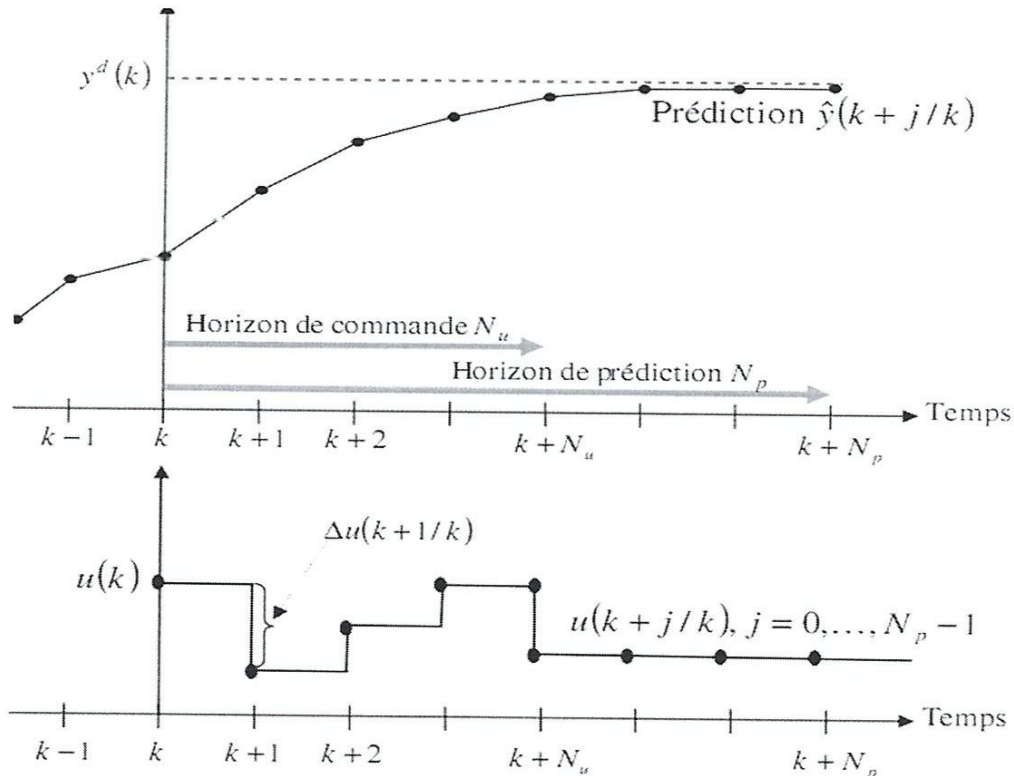
La deuxième génération qui apparaît au début des années 1980 permet en plus la prise en compte de contraintes sur les entrées et les sorties en posant un problème quadratique (Quadratic Dynamic Matrix Control).

Enfin, la génération actuelle (SMOC, IDCOM-M, PCT, RPMC, [15]) permet de distinguer divers degrés de contraintes, permet de prendre en compte certains problèmes d'infaisabilité, utilise l'estimation d'état et permet de résoudre pour des systèmes stables ou instables en boucle ouverte divers objectifs de commande.

## III. Principe de base de la commande prédictive

Le principe de la commande prédictive consiste à créer pour le système à commander un effet anticipatif par rapport à une trajectoire à suivre connue à l'avance, en se basant sur la prédiction du comportement futur du système et en minimisant l'écart de ces prédictions par rapport à la trajectoire au sens d'une certaine fonction coût, tout en respectant des contraintes de fonctionnement. Cette idée est simple et pratiquée de façon assez systématique dans la vie quotidienne. Par exemple, le conducteur d'une véhicule connaît la trajectoire de référence désirée à l'avance (la route) sur un horizon de commande

fini (son champ visuel), et en prenant en compte les caractéristiques de la voiture (modèle mental du comportement du véhicule), il décide quelles actions (accélérer, freiner ou tourner le volant) il faut réaliser afin de suivre la trajectoire désirée. Seule la première action de conduite est exécutée à chaque instant, et la procédure est répétée à nouveau pour les prochaines actions. [43][52].



**Figure IV.1. Principe de la commande prédictive [43]**

1. A chaque instant d'échantillonnage  $k$ , les sorties futures du système sont prédites sur un horizon de temps «  $H_p$  », appelé horizon de prédiction, il est relativement long par rapport à la vitesse d'évolution du procédé. Les prédictions «  $y(k+j|k)$  », pour  $j=1, \dots, H_p$ , sont réalisées en utilisant le modèle du système, mais aussi des commandes futures «  $u(k+i)$  », pour «  $i=0, \dots, N_p-1$  », à déterminer et appliquer au système.
2. La séquence de commande est déterminée en minimisant un critère de performances qui permet d'assurer la poursuite de la consigne désirée. Le critère est une fonction quadratique des erreurs entre les sorties prédites et la trajectoire de référence. L'effort de commande est généralement inclus dans le critère à minimiser.
3. La solution déterminée par optimisation sera ensuite appliquée au système réel, mais seule sa valeur à l'instant présent «  $k$  » est réellement utilisée. A l'instant suivant «  $k+1$  », la procédure complète est répétée.

La commande MPC (Model Prédicative Control) présente un certain nombre d'avantages par rapport aux autres méthodes, parmi lesquels on trouve :

- ✓ Elle peut être utilisée pour commander une grande variété de processus, ceux qui sont avec des dynamiques simples à ceux plus complexes, par exemple, les systèmes à retard, ou instable.
- ✓ Le réglage de ses paramètres relativement facile la rend accessible aux personnes avec des connaissances limitées en automatique.
- ✓ Le cas multi-variable se traite facilement.
- ✓ Son caractère prédictif permet de compenser les retards et les temps morts.
- ✓ Le traitement de contraintes imposées sur le système à commander peut être inclus dans l'obtention de la loi de commande.
- ✓ Elle est très performante lorsque les consignes ou trajectoires à suivre sont connues à l'avance (ce qui est le cas dans plusieurs processus industriels comme les machines numériques et les robots).

La détermination de la loi de commande prédictive se fait par résolution, d'un problème de commande optimale à horizon fini comme il est illustré dans la figure suivante. A partir d'une trajectoire de référence à suivre connue à l'avance, en faisant à chaque période d'échantillonnage les étapes suivantes :

1. Calculer les prédictions des variables de sortie  $y$  sur un horizon de prédiction sur la sortie  $N$ .
2. Minimiser un critère à horizon fini en fonction de : erreurs de prédictions futures, écarts entre la sortie prédite du système et la consigne future.
3. Obtenir une séquence de commandes futures sur un horizon de commande inférieure ou égale à  $N$ .
4. Appliquer uniquement la première valeur de cette séquence sur le système.
5. Répéter ces étapes à la période d'échantillonnage suivante, selon le principe de l'horizon fuyant.

L'ensemble est résumé sur la figure suivante :

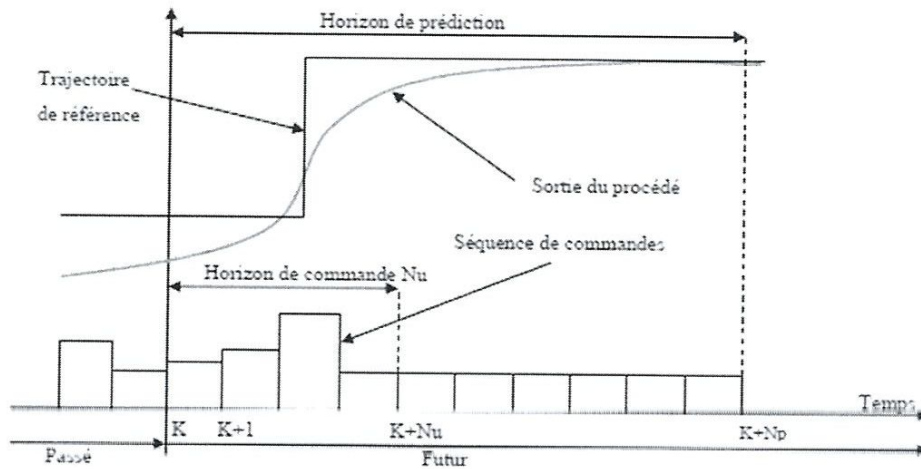


Figure IV.2 : Stratégie de la commande prédictive. [43] [45].

### Remarque :

Dans le cas général d'un système sous contraintes, la minimisation du critère prédictif nécessite la résolution effective d'un problème d'optimisation en ligne. Seule la commande prédictive des systèmes linéaires invariants dans le temps, restreinte au cas sans contraintes, ne nécessite pas la résolution effective de ce problème d'optimisation en ligne, car le correcteur est à son tour linéaire invariant et sa description analytique peut être obtenue hors-ligne. Malheureusement, le type du système à commander envisagé dans ce travail, non-linéaire et sous contraintes, implique qu'il faut s'orienter vers des techniques prédictives non-linéaires nécessitant la mise en œuvre d'une stratégie d'optimisation qui prend en compte les contraintes imposées sur le système, comme envisagé ci-dessous. [45].

## IV. Éléments de la Commande Prédicative

Les difficultés liées à l'implémentation d'une commande prédictive non linéaire ont conduit au développement d'une stratégie de commande à optimisation sur un horizon fini. Cette nouvelle commande porte différentes dénominations (commande optimale non linéaire à horizon fini, commande non linéaire par horizon glissant ou commande prédictive non linéaire). Nous retenons pour la suite comme dénomination la commande prédictive non linéaire (**figure IV.4**) qui implique les trois aspects suivants [45][52]:

### 1. Modèle de prédiction :

Un modèle du système pour prédire l'évolution future des sorties sur l'horizon de prédiction  $N_p$ .

$$\hat{y} = [\hat{y}(k) \hat{y}(k+1) \dots \hat{y}(k+N_p)]$$

### 2. Méthode d'optimisation:

Pour calculer une séquence de commandes sur l'horizon de commande  $N_u$

$$\theta = [u^*(k) u^*(k+1) \dots u^*(k+N_u)]$$

Le critère d'optimisation  $J$  en satisfaisant les contraintes imposées par l'utilisateur, sachant que :

$$u^*(k+i) = u^*(k+N_u) \quad \text{pour} \quad N_u \leq i \leq N_p$$

### 3. Principe de l'horizon glissant :

Qui consiste à déplacer l'horizon  $k \rightarrow k+1$  à chaque période d'échantillonnage après l'application de la première commande  $u^*(k)$  de la séquence optimale ainsi obtenue.

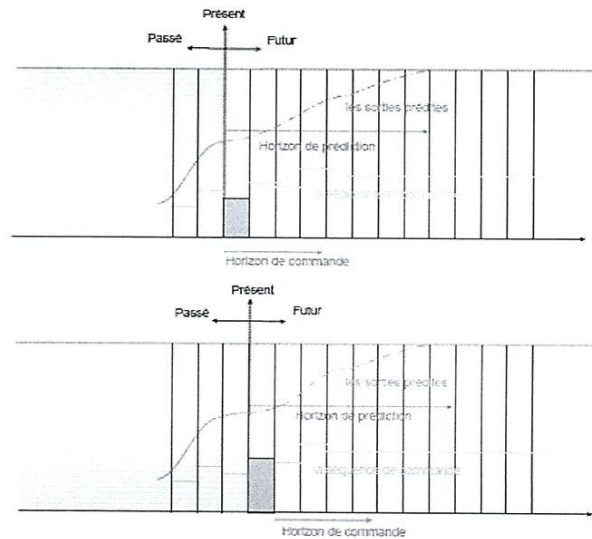
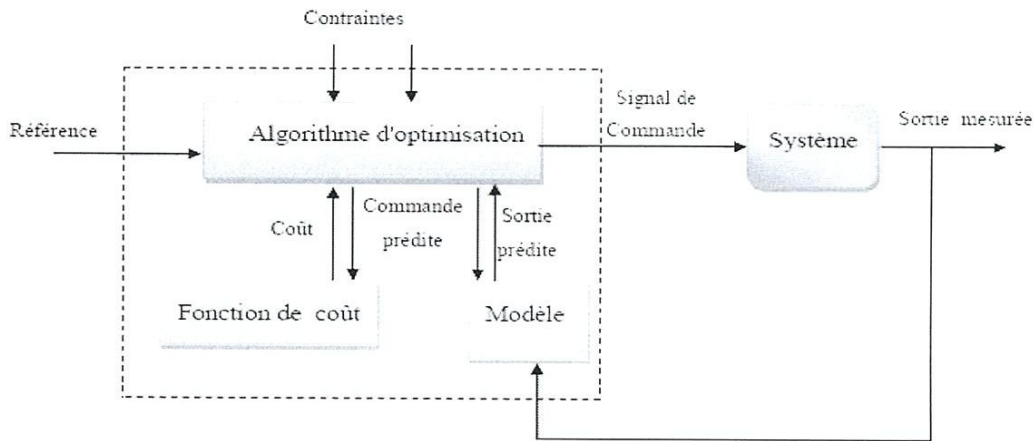


Fig. IV.3 – Le principe de l'horizon glissant.[43]

**Remarque :**

Généralement, une des raisons principales du succès de la commande prédictive sur les procédés relativement lents est le temps suffisamment long pour pouvoir résoudre le problème d'optimisation associé avant la fin de la période d'échantillonnage  $[k; k + 1]$  (le temps réel). Par contre si le système à commander est relativement rapide où le critère associé au problème d'optimisation est non convexe, la période d'échantillonnage est trop courte pour permettre le calcul de la séquence de commandes recherchée.[52]

Dans la **figure IV.4** on montre la structure basique, de la stratégie de commande prédictive.



**Figure IV.4 : Structure de base d'une commande prédictive[43]**

Pour l'implémentation de la stratégie prédictive, la structure de base de la **figure IV.4** est mise en œuvre. Un modèle sert à prédire les futures sorties du système, grâce aux valeurs courantes et passées de la commande et aux commandes optimales futures. Ces dernières sont calculées par une méthode d'optimisation, qui prend en compte la fonction de coût (qui dépend aussi des consignes futures), et éventuellement des contraintes. Donc, Le modèle du système à commander joue un rôle central dans la commande prédictive. Le modèle choisi doit être capable de prendre en compte la dynamique du processus pour prédire précisément les sorties futures, les éléments de la commande prédictive qui doit intervenir lors de la conception sont traités dans les paragraphes suivants.[43].

## V. Fonction objectif

Dans le cas général, la commande prédictive consiste à minimiser une fonctionnelle Jappelée critère de performance, fonction de coût ou fonction objectif :

$$J_Q(u, y, w) = \int_T F(u(t), y(t), w(t)) dT$$



Ce critère dépend des commandes appliquées (l'entrée du système)  $u$ , des grandeurs de sortie du système  $y$  et du comportement désiré  $w$ . Toutes ces grandeurs évoluent en fonction du temps.

Pour un système continu,  $T$  est un intervalle continu  $[t, t + T]$  où  $T$  représente le temps futur de prédiction. L'ensemble  $Q$  regroupe les contraintes sur la sortie et la commande imposées le long de l'horizon. Ces contraintes sont liées à la dynamique du système et, d'autre part, des contraintes fonctionnelles agissant sur les entrées et les sorties du système.

Dans ce cas où, on utilise un prédicteur non linéaire, il n'existe pas de solution analytique, la résolution du problème de commande prédictive est obtenue, par un algorithme d'optimisation numérique implémenté sur un ordinateur, donc, le problème est ramené à un problème d'optimisation en dimension finie.

L'intervalle d'optimisation est une succession d'éléments temporels pour lequel les objectifs traduisent des comportements désirés ou seulement en segments successifs du temps, la fonction objective devient alors sous forme discrète :[52]

$$J_{QK} = \sum_{QK} (\cdot) \Delta Q_K$$

En discrétisant ce critère, deux valeurs s'introduisent naturellement dans la commande prédictive :

- la longueur des suites d'échantillons de commande, c'est-à-dire l'horizon de commande  $N_u$
- La longueur sur laquelle est évaluée le critère de performance, c'est-à-dire l'horizon de prédiction  $N_p$ .

Les divers algorithmes MPC proposent différentes fonctions de coût pour obtenir la loi de commande. L'objectif principal consiste à faire en sorte que la sortie future pour l'horizon de prédiction considéré s'approche de la meilleure façon possible de la trajectoire de référence  $\{w(k)\}$  tout, en même temps, pénalisant l'effort de commande  $\{u(k)\}$  nécessaire. Une expression générale de fonction objectif [15] adaptée à cette tâche est donnée par:

$$J(u, y, w) = \sum_{i=N_1}^{N_p} [y(k + i/k) - w(k + i/k)]^2 + \sum_{i=1}^{N_u} \lambda [\Delta u(k + i - 1/k)]^2$$

**Remarque :**

Dans quelques méthodes de la commande prédictive le deuxième terme, relatif à l'effort de commande, n'est pas pris en compte. Donc, le problème de la commande prédictive est la détermination de la séquence des commandes qui permet de minimiser le critère de performance choisi tout en assurant une vérification des contraintes, Une séquence de  $Nu$  Commande est appliquée de l'instant présent  $k$  jusqu'à la fin de l'horizon de commande, c'est-à-dire à  $k + Nu$ .

Ensuite, les commandes appliquées jusqu'à la fin de l'horizon de prédiction  $k + Np$  sont prises égales au dernier élément de la séquence. Cela signifie qu'il doit réaliser une estimation des prédictions des valeurs de la sortie  $y$  aux instants d'échantillonnage futurs en fonction des valeurs futures de l'entrée  $u$ , c'est l'étape de la modélisation.

On appelle  $w$  la grandeur de consigne dont la valeur est supposée connue non seulement à l'instant  $k$  présent, mais également pendant les  $Np$  instants d'échantillonnages suivantes, avec

- $w(k + i)$  consigne appliquée à l'instant  $k + i$ .
- $(k+i)$  sortie prédite à l'instant  $k+i$ .
- $Nu \leq Np$  et  $\Delta(k + j) = 0, \forall i \geq Nu$ .
- $Nu$  est l'horizon de commande.
- $N1$  est l'horizon d'initialisation.
- $Np$  est l'horizon de prédiction.
- $\lambda$  est le facteur de pondération de la commande.
- $\Delta$  est l'opérateur de différence  $\Delta u(k) = u(k) - u(k - 1)$ .
- Le coefficient  $\lambda$  permet de donner plus ou moins de poids à la commande par rapport à la sortie, de façon à assurer la convergence lorsque le système de départ présente un risque d'instabilité [15] [52].

**VI. Modélisation**

Les différentes stratégies du MPC emploient différents modèles pour représenter la relation entre la sortie et l'entrée du système. Donnons une vision rapide de ces types de modélisation qui peut se faire selon deux méthodes [52].

**A. Modèle de connaissance**

Il s'agit ici de tenir en compte des phénomènes physiques mis en jeu. On fait alors intervenir des bilans d'énergie, de masse, etc. Le modèle est dans ce cas rarement simple en

termes d'entrée-sortie. Il est principalement non linéaire, décrit par un ensemble d'équations différentielles avec seulement la variable temps comme variable indépendante. Ce modèle est décrit par des équations aux dérivées partielles.

La complexité du modèle dépend alors des exigences de description souhaitées mais surtout du niveau de précision exigé pour le comportement désiré du système.

L'importance des divers phénomènes peut se quantifier et le modèle obtenu permet de simuler le procédé avec d'autres caractéristiques physiques et dimensionnelles. D'autre part, il est évident que plus le modèle est fidèle au procédé, au sens physique du terme, meilleure sera la prédiction de l'évaluation du comportement du procédé. Cependant la méthode nécessite une connaissance précise dans le domaine concerné.[16][45]

### **B. Modèle de comportement global entrée-sortie :**

A partir d'un modèle de type boîte noire, choisi a priori, il s'agit ici d'effectuer une estimation de ses paramètres. Ceux-ci sont déterminés en fonction de données expérimentales d'entrée-sortie. L'avantage de l'approche peut s'avérer plus simple et plus rapide que dans le cas précédent. Par ailleurs, il peut être très difficile, de mettre en équation le comportement de nombreux systèmes. Le modèle n'a a priori aucune signification physique, surtout s'il est de nature complexe. D'autre part, et contrairement à la première méthode, on peut plus difficilement simuler le comportement d'un procédé ayant d'autres caractéristiques physiques et dimensionnelles.

### **Remarque :**

Le choix de la méthode se fait bien sûr en fonction de la précision des objectifs à atteindre et des informations disponibles. D'un point de vue pratique, la méthode d'identification reste encore la plus utilisée, car c'est la plus simple et la plus rapide de mise en œuvre. Cependant, les problèmes posés étant de plus en plus complexes et non linéaires, l'utilisation d'une représentation non linéaire tend à s'étendre.

### **C. Modèle de prédiction du processus**

Le modèle du système joue donc un rôle central dans la commande prédictive. Le modèle choisi doit être capable de rendre compte de la dynamique du processus pour prédire précisément les sorties futures et aussi doit être simple à implémenter et à comprendre.

La méthodologie prédictive requiert la définition d'un prédicteur à  $Np$  pas en avant qui permette d'anticiper le comportement du processus dans le futur sur un horizon fini.

Pour cela, à partir de la forme du modèle, on détermine la sortie estimée à l'instant  $k+i$ , connaissant la sortie à l'instant  $k$ . [52]

## VII. Types des contraintes

Les différentes méthodologies de la commande MPC permettent d'anticiper la violation des restrictions compte tenu de leur caractère prédictif. [52]

### 1. Restrictions sur l'amplitude du signal de commande :

Les restrictions sur l'amplitude du signal de la commande, assez fréquentes en pratique (pour prendre en compte, par exemple, des effets de saturation des actionneurs), peuvent s'exprimer au moyen de l'inégalité suivante:

$$u_{min} \leq u(.) \leq u_{max} \quad \text{IV.1}$$

Ces contraintes sont à satisfaire sur tout l'horizon  $Nu$  d'optimisation :

$$u_{min} \leq u(k) \leq u_{max} \quad \text{IV.2}$$

Où:  $u(k) = [u(k) \ u(k+1) \ \dots \ u(k+Nu-1)]^T$  le vecteur de dimension  $Nu$

### 2. Restrictions sur la vitesse de variation du signal de commande :

Les restrictions sur l'augmentation du signal de commande prennent une forme très simple, et peuvent être exprimées au moyen de l'inégalité:

$$\Delta u_{min} \leq u(k+1) - u(k) \leq \Delta u_{max} \quad \text{IV.3}$$

Ou

$$\Delta u_{min} \leq \Delta u(k) \leq \Delta u_{max} \quad \text{IV.4}$$

Sachant que

$$\Delta u(k) = u(k+1) - u(k)$$

### 3. Restrictions sur l'amplitude de la sortie :

Il est très fréquent de trouver comme spécification désirée dans les processus commandés que leur sortie se trouve dans une plage autour d'une trajectoire désirée, par exemple, dans les cas de poursuite d'un certain profil avec une certaine tolérance. Ce type de condition peut être introduit pour le système de commande le forçant à ce que la sortie

du système soit à tout moment comprise dans la bande constituée par la trajectoire indiquée plus ou moins la tolérance ceci se traduit par une inégalité de la forme:

$$y_{min} \leq y(k) \leq y_{max} \quad \text{IV.5}$$

#### 4. Restrictions sur la vitesse de variation du signal de sortie :

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

$$\Delta y_{min} \leq \Delta y(k) \leq \Delta y_{max} \quad \text{IV.6}$$

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

### VIII. Commande prédictive à base de modèle

La commande prédictive à base de modèle est une technique de commande avancée largement étudiée aussi bien dans le milieu industriel que dans le milieu académique. La commande MPC repose sur un modèle explicite du procédé pour prévoir le comportement futur de la sortie. Cette technique de prédiction permet de résoudre des problèmes de commande optimale en ligne, où l'erreur de poursuite, à savoir la différence entre la sortie prévue et la référence désirée, est réduite au minimum sur un horizon futur. Les performances sont évaluées au moyen d'une fonction de coût et la technique permet de prendre en compte des contraintes imposées sur les variables du procédé. Elle diffère d'autres techniques de commande par le fait que le problème d'optimisation est résolu en ligne, tandis que les stratégies classiques sont conçues hors ligne.[43]

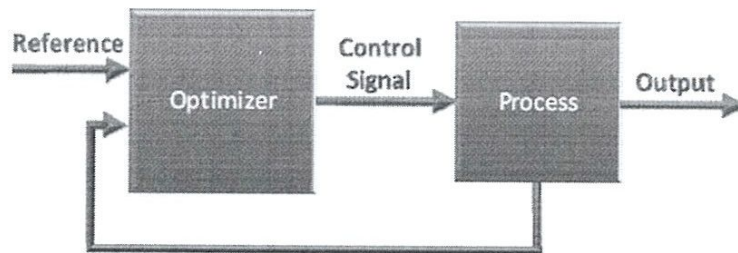


Figure IV.5 : structure de base pour la commande prédictive à base de modèle [36]

### IX. Commande prédictive linéaire

#### 1. Modèle du système

Il existe différentes formes de modèle utilisé dans une commande prédictive, qu'ils doivent être toujours de nature discrète puisque la commande prédictive est une commande numérique.

On considère un modèle d'état :

$$\mathbf{x}(k+1) = \mathbf{A}\mathbf{x}(k) + \mathbf{B}\mathbf{u}(k) \quad \text{IV. 7}$$

$$\mathbf{y}(k) = \mathbf{C}_y\mathbf{x}(k) \quad \text{IV. 8}$$

$$\mathbf{z}(k) = \mathbf{C}_z\mathbf{x}(k) \quad \text{IV. 9}$$

Où «  $\mathbf{x}$  » le vecteur d'état à l'instant «  $k$  », «  $\mathbf{u}$  » le vecteur de commande à l'instant «  $k$  », «  $\mathbf{y}$  » le vecteur des sorties mesurées, «  $\mathbf{z}$  » le vecteur des sorties à contrôler, «  $\mathbf{A}$ ,  $\mathbf{B}$ ,  $\mathbf{C}_y$ ,  $\mathbf{C}_z$  » des matrices de dimension correspondante. [43] [45]

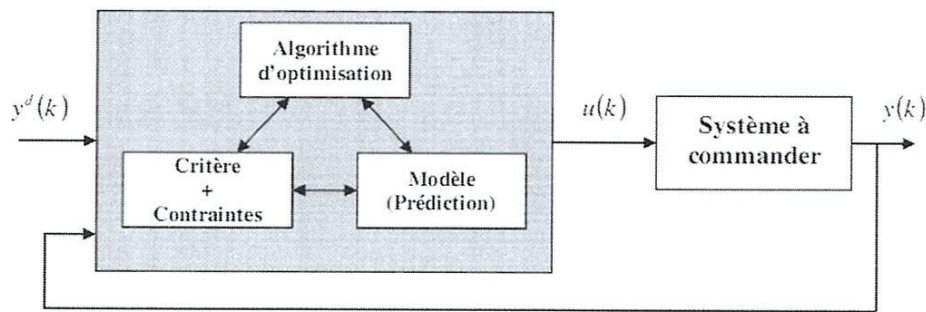


Figure IV.6 Stratégie de commande prédictive. [45]

Les sorties contrôlées peuvent en principe dépendre de «  $\mathbf{u}(k)$  » :

$$\mathbf{z}(k) = \mathbf{C}_z\mathbf{x}(k) + \mathbf{D}_z\mathbf{u}(k) \quad \mathbf{D}_z \neq \mathbf{0} \quad \text{IV. 10}$$

Ce qui compliquerait le calcul de la commande légèrement. Cette complication peut être évitée, sans rien perdre, en définissant un nouveau vecteur de sorties contrôlées :

$$\begin{aligned} \tilde{\mathbf{z}}(k) \\ = \mathbf{z}(k) - \mathbf{D}_z\mathbf{u}(k) \end{aligned} \quad \text{V. 11}$$

qui dépend seulement de  $\mathbf{x}(k)$  :  $\tilde{\mathbf{z}}(k) = \mathbf{C}_z\mathbf{x}(k)$

Dans tout ce qui suit nous supposons que ce qui est souvent le cas «  $\mathbf{y}(k) - \mathbf{z}(k)$  », nous utilisons «  $\mathbf{C}$  » pour noter «  $\mathbf{C}_y$ ,  $\mathbf{C}_z$  », et «  $\mathbf{m}$  » pour noter «  $\mathbf{m}_y$ ,  $\mathbf{m}_z$  ». [45]

## 2. Prédiction

Dans la commande prédictive, un modèle du système n'est pas utilisé pour la conception de la loi de commande, mais il est utilisé pour la prédiction des sorties futures du système. Ces prédictions seront utilisées par la suite pour la détermination de la séquence de la variable de commande en résolvant un problème d'optimisation.

$$\begin{aligned} \mathbf{y}(k) = & -a\mathbf{y}(k-1) \\ & + b\Delta\mathbf{u}(k-1) \end{aligned} \quad \text{IV.12}$$

Les deux premières prédictions futures de la sortie sont données comme suit :

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{y}}(k+1|k) \\ \hat{\mathbf{y}}(k+2|k) \end{bmatrix} = & \begin{bmatrix} -a \\ a^2 \end{bmatrix} \mathbf{y}(k) \\ & + \begin{bmatrix} h & 0 \\ -ab & b \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\mathbf{u}(k) \\ \Delta\mathbf{u}(k+1) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad \text{IV.13}$$

Les autres prédictions sont déterminées de la même manière en utilisant le modèle V.21. Ainsi, les prédictions peuvent être décomposées en général en deux parties :

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{y}}(k+j|k) = & \hat{\mathbf{y}}_{\text{libre}}(k+j) \\ & + \hat{\mathbf{y}}_{\text{forcée}}(k+j) \end{aligned} \quad \text{IV.14}$$

La réponse libre «  $\hat{\mathbf{y}}_{\text{libre}}(k+j)$  » correspond à la prédiction de la sortie lorsque la commande est maintenue constante à sa valeur actuelle «  $\mathbf{u}(k)$  » le long de l'horizon de prédiction

«  $\mathbf{H}_p$  ». Par contre la réponse forcée, «  $\hat{\mathbf{y}}_{\text{forcée}}(k+j)$  », correspond à la prédiction de la sortie due aux actions futures «  $\mathbf{u}(k+j)$  »,  $j=1, \dots, N_p$ .

Le calcul des sorties prédites se fait par itération du modèle (IV.7)-(IV.9) :

$$\hat{\mathbf{x}}(k+1|k) = A\mathbf{x}(k) + B\hat{\mathbf{u}}(k|k) \quad \text{IV.15}$$

$$\hat{\mathbf{x}}(k+2|k) = A\hat{\mathbf{x}}(k+1|k) + B\hat{\mathbf{u}}(k+1|k) \quad \text{IV.16}$$

$$= A^2\mathbf{x}(k) + AB\hat{\mathbf{u}}(k|k) + B\hat{\mathbf{u}}(k+1|k) \quad \text{IV.17}$$

$$\vdots$$

$$\hat{\mathbf{x}}(k+H_p|k) = A\hat{\mathbf{x}}(k+H_p-1|k) + B\hat{\mathbf{u}}(k+H_p-1|k) \quad \text{IV.18}$$

$$= A^{H_p}\mathbf{x}(k) + A^{H_p-1}B\hat{\mathbf{u}}(k|k) + \dots + B\hat{\mathbf{u}}(k+H_p-1|k) \quad \text{IV.19}$$

Rappelons que «  $\Delta \hat{u}(k+i|k) = \hat{u}(k+i|k) - \hat{u}(k+i-1|k)$  » et que les entrées peuvent changer seulement aux instants «  $k, k+1, \dots, k+H_u-1$  » et reste constantes après :

$\hat{u}(k+i|k) = \hat{u}(k+H_u-1)$  pour  $H_u \leq i \leq H_p-1$ . Alors :

$$\hat{u}(k|k) = \Delta \hat{u}(k|k) + u(k-1) \quad IV.20$$

$$\hat{u}(k+1|k) = \Delta \hat{u}(k+1|k) + \Delta \hat{u}(k|k) + u(k-1) \quad IV.21$$

$$\vdots$$

$$\hat{u}(k+H_u-1|k) = \Delta \hat{u}(k+H_u-1|k) + \dots + \Delta \hat{u}(k|k) + u(k-1) \quad IV.22$$

Ainsi nous obtenons

$$\hat{x}(k+1|k) = Ax(k) + B[\Delta \hat{u}(k|k) + u(k-1)]$$

$$\hat{x}(k+2|k) = A^2x(k) + AB[\Delta \hat{u}(k|k) + u(k-1)] + B \begin{bmatrix} \Delta \hat{u}(k+1|k) + \Delta \hat{u}(k|k) \\ +u(k-1) \end{bmatrix} \quad IV.23$$

$$= A^2x(k) + (A+I)B \Delta \hat{u}(k|k) + B \Delta \hat{u}(k+1|k) + (A+I)Bu(k-1) \quad IV.24$$

$$\vdots$$

$$\hat{x}(k+H_u|k) = A^{H_u}x(k) + (A^{H_u-1} + \dots + A + I)B \Delta \hat{u}(k|k) \\ + \dots + B \Delta \hat{u}(k+H_u-1|k) + (A^{H_u-1} + \dots + A + I)Bu(k-1) \quad IV.25$$

$$\hat{x}(k+H_u+1|k) = A^{H_u+1}x(k) + (A^{H_u} + \dots + A + I)B \Delta \hat{u}(k|k) \\ + \dots + (A+I)B \Delta \hat{u}(k+H_u-1|k) + (A^{H_u-1} + \dots + A + I)Bu(k-1) \quad IV.26$$

$$\vdots$$

$$\hat{x}(k+H_p|k) = A^{H_p}x(k) + (A^{H_p-1} + \dots + A + I)B \Delta \hat{u}(k|k)$$

$$+ \dots + (A^{H_p-H_u} + \dots + A + I)B \Delta \hat{u}(k+H_u-1|k) + (A^{H_p-1} + \dots + A + I)Bu(k-1) \quad IV.27$$

Finalement sous forme matricielle

$$\begin{bmatrix} \hat{x}(k+1|k) \\ \vdots \\ \hat{x}(k+H_u|k) \\ \hat{x}(k+H_u+1|k) \\ \vdots \\ \hat{x}(k+H_p|k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A \\ \vdots \\ A^{H_u} \\ A^{H_u+1} \\ \vdots \\ A^{H_p} \end{bmatrix} x(k) + \begin{bmatrix} B \\ \vdots \\ \sum_{i=0}^{H_u-1} A^i B \\ \sum_{i=0}^{H_u} A^i B \\ \vdots \\ \sum_{i=0}^{H_p-1} A^i B \end{bmatrix} u(k-1)$$



$$+ \begin{bmatrix} B & \dots & \mathbf{0} \\ AB + B & \dots & \mathbf{0} \\ \vdots & & \\ H_u - 1 & & \\ \sum_{i=0}^{H_u-1} A^i B & & \vdots \\ & \ddots & B \\ H_u & & AB + B \\ \sum_{i=0}^{H_u} A^i B & \vdots & \vdots \\ & \ddots & H_p - H_u \\ & & \sum_{i=0}^{H_p - H_u} A^i B \\ \vdots & \dots & \\ H_p - 1 & & \\ \sum_{i=0}^{H_p-1} A^i B & & \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \hat{u}(k|k) \\ \vdots \\ \Delta \hat{u}(k + H_u - 1|k) \end{bmatrix}$$

Les prédictions de « z » sont données par

$$\begin{bmatrix} \hat{z}(k + 1|k) \\ \vdots \\ \hat{z}(k + H_p|k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_z & \mathbf{0} & \dots & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & C_z & \dots & \mathbf{0} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \dots & C_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{x}(k + 1|k) \\ \vdots \\ \hat{x}(k + H_p|k) \end{bmatrix} \tag{IV.28}$$

**a. Loi de commande :**

Les actions de commande, «  $\mathbf{u}(k+i)$  », sont calculées en minimisant le critère (IV.28). Ainsi, on commence d’abord par la détermination des prédictions en utilisant le modèle du système. Ces dernières seront forcément fonction des actions de commande «  $\mathbf{u}(k+i)$  ». Ainsi en substituant ces prédictions dans le critère «  $\mathbf{J}$  » à minimiser, et résolvant le système d’équations algébriques obtenu en imposant le gradient «  $\nabla \mathbf{J}$  » par rapport aux actions de commande «  $\mathbf{u}(k+i)$  » égale à zéro, c’est-à-dire [49] :

$$\nabla_{(u(k), u(k+1), \dots, u(k+H_u))} J(u(k), u(k + 1), \dots, u(k + H_u)) = \begin{bmatrix} \frac{\partial J(u(k), u(k + 1), \dots, u(k + H_u))}{\partial u(k)} \\ \frac{\partial J(u(k), u(k + 1), \dots, u(k + H_u))}{\partial u(k + 1)} \\ \vdots \\ \frac{\partial J(u(k), u(k + 1), \dots, u(k + H_u))}{\partial u(k + H_u)} \end{bmatrix} = \mathbf{0} \tag{IV.29}$$

Annuler le gradient du critère «  $\mathbf{J}$  » est une procédure d’optimisation.

Lorsqu’une méthode numérique est utilisée, l’obtention de la solution du problème d’optimisation «  $\min_{(u(k), u(k+1), \dots, u(k+H_u))} J(u(k), u(k + 1), \dots, u(k + H_u))$  » n’est pas

nécessairement garantie surtout si le problème d'optimisation est non linéaire, et la difficulté s'accroît davantage en présence des contraintes sur la commande ou/et sur la sortie commandée. De plus, assurer la convergence en un temps inférieur à «  $T_s$  » représente une autre contrainte à prendre en considération. [43]

### b. Critère de performance

Généralement, le but recherché est d'assurer la poursuite de consigne désirée «  $y^d(k+j)$  » avec un minimum d'effort «  $u(k+j-1)$  ». Ainsi, le critère utilisé le plus souvent prend la forme quadratique car différentiable

$$J = \sum_{j=N_r}^{H_p} [y^d(k+j) - \hat{y}(k+j|k)]^T Q_j [y^d(k+j) - \hat{y}(k+j|k)] + \sum_{j=0}^{H_u-1} u(k+j-1)^T R_j u(k+j-1) \quad \text{IV.30}$$

Où les matrices «  $Q_j$  et  $R_j$  » sont symétriques et définies positives. Leur choix caractérise l'importance relative que nous souhaitons donner aux diverses composantes du critère à minimiser.

Le choix de la période d'échantillonnage peut être lié de façon étroite à la synthèse du correcteur prédictif est celui de la longueur «  $N_s$  » du modèle de convolution. Si on définit le temps de réponse «  $t_r$  » comme le temps à partir duquel la réponse du système a atteint 99% de la valeur finale, on doit vérifier :  $N_s * T_s = t_r$  [43]

### 3. Problème sans contraintes

Nous pouvons mettre la fonction coût (V.40) sous la forme

$$J(k) = \|z(k) - T(k)\|_{\bar{R}}^2 \quad \text{IV.31}$$

Où

$$z(k) = \begin{bmatrix} \hat{z}(k + H_w|k) \\ \vdots \\ \hat{z}(k + H_p|k) \end{bmatrix} T(k) = \begin{bmatrix} \hat{r}(k + H_w|k) \\ \vdots \\ \hat{r}(k + H_p|k) \end{bmatrix} \Delta U(k) = \begin{bmatrix} \Delta \hat{u}(k|k) \\ \vdots \\ \Delta \hat{u}(k + H_u - 1|k) \end{bmatrix}$$

Les matrices de pondération «  $\bar{Q}$  et  $\bar{R}$  » sont données par :

$$\bar{Q} = \begin{bmatrix} Q(H_w) & \mathbf{0} & \dots & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & Q(H_w + 1) & \dots & \mathbf{0} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \dots & Q(H_p) \end{bmatrix} \quad \bar{R} = \begin{bmatrix} R(0) & \mathbf{0} & \dots & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & R(1) & \dots & \mathbf{0} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \dots & R(H_u - 1) \end{bmatrix}$$

À partir de (V.43) et (V.44), «  $\mathbf{z}(\mathbf{k})$  » a la forme suivante :

$$\mathbf{z}(\mathbf{k}) = \Psi \mathbf{x}(\mathbf{k}) + \mathbf{Y} \mathbf{u}(\mathbf{k} - 1) + \Theta \Delta \mathbf{U}(\mathbf{k}) \quad \text{IV.32}$$

$$\text{Définissons } \boldsymbol{\varepsilon}(\mathbf{k}) = \mathbf{T}(\mathbf{k}) - \Psi \mathbf{x}(\mathbf{k}) - \mathbf{Y} \mathbf{u}(\mathbf{k} - 1) \quad \text{IV.33}$$

Alors

$$J(\mathbf{k}) = \|\Theta \Delta \mathbf{U}(\mathbf{k}) - \boldsymbol{\varepsilon}(\mathbf{k})\|_{\bar{Q}}^2 + \|\Delta \mathbf{U}(\mathbf{k})\|_{\bar{R}}^2 \quad \text{IV.34}$$

$$= [\Delta \mathbf{U}(\mathbf{k})^T \Theta^T - \boldsymbol{\varepsilon}(\mathbf{k})^T] \bar{Q} [\Theta \Delta \mathbf{U}(\mathbf{k}) - \boldsymbol{\varepsilon}(\mathbf{k})] + \Delta \mathbf{U}(\mathbf{k})^T \bar{R} \Delta \mathbf{U}(\mathbf{k}) \quad \text{IV.35}$$

$$\boldsymbol{\varepsilon}(\mathbf{k})^T \bar{Q} \boldsymbol{\varepsilon}(\mathbf{k}) - 2 \Delta \mathbf{U}(\mathbf{k})^T \Theta^T \bar{Q} \boldsymbol{\varepsilon}(\mathbf{k}) + \Delta \mathbf{U}(\mathbf{k})^T (\Theta^T \bar{Q} \Theta + \bar{R}) \Delta \mathbf{U}(\mathbf{k}) \quad \text{IV.36}$$

Qui a la forme

$$J(\mathbf{k}) = \text{const} - \Delta \mathbf{U}(\mathbf{k})^T \mathbf{G} + \Delta \mathbf{U}(\mathbf{k})^T \mathbf{H} \Delta \mathbf{U}(\mathbf{k}) \quad \text{IV.37}$$

$$\mathbf{G} = 2 \Theta^T \bar{Q} \boldsymbol{\varepsilon}(\mathbf{k}) \quad \text{IV.38}$$

$$\mathbf{H} = \Theta^T \bar{Q} \Theta + \bar{R} \quad \text{IV.39}$$

On voit que «  $\mathbf{G}$  » et «  $\mathbf{H}$  » ne dépendent pas de «  $\Delta \mathbf{U}(\mathbf{k})$  ». Comme «  $\bar{R} > 0$  et  $\bar{Q} > 0$  » et alors «  $\mathbf{H} > \mathbf{0}$  » ce qui garantit la convexité de «  $\mathbf{J}(\mathbf{k})$  ». Dans ce cas la condition pour que «  $\Delta \mathbf{U}(\mathbf{k})$  » soit un optimum global de «  $\mathbf{J}(\mathbf{k})$  » est que le gradient s'annule à ce point. De l'équation (IV.30)

$$\nabla_{\Delta \mathbf{U}(\mathbf{k})} J(\mathbf{k}) = -\mathbf{G} + 2\mathbf{H} \Delta \mathbf{U}(\mathbf{k}) \quad \text{IV.40}$$

Alors la séquence des variations de commande futures optimales est :

$$\Delta \mathbf{U}(\mathbf{k})_{opt} = \frac{1}{2} \mathbf{H}^{-1} \mathbf{G} \quad \text{IV.41}$$

Seulement la partie correspondant au premier pas de la séquence optimale est appliquée au système

$$\Delta \mathbf{u}(\mathbf{k})_{opt} = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_l, \underbrace{\mathbf{0}_l, \dots, \mathbf{0}_l}_{(H_u-1) \text{ fois}} \end{bmatrix} \Delta U(\mathbf{k})_{opt} \quad \text{IV.42}$$

$$\mathbf{u}(\mathbf{k})_{opt} = \Delta \mathbf{u}(\mathbf{k})_{opt} + \mathbf{u}(\mathbf{k} - 1) \quad \text{IV.43}$$

$$\text{Ou } \mathbf{U}(\mathbf{k}) = [\hat{\mathbf{u}}(\mathbf{k}|\mathbf{k})^t, \dots, \hat{\mathbf{u}}(\mathbf{k} + H_u - 1|\mathbf{k})^t]^t$$

#### 4. Commande à modèle interne :

On appelle habituellement une structure de commande à modèle interne « **C.M.I** », tout schéma de commande incluant un modèle explicite du procédé.

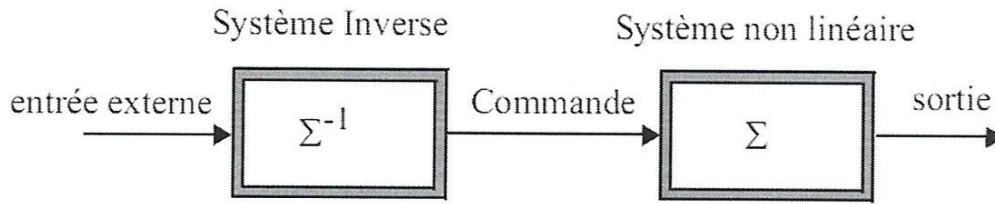
D'une manière générale, la « **C.M.I** » reprend le principe de base de la commande en boucle ouverte ce qui représente un intérêt majeur pour la stabilité. De plus, la « **C.M.I** » possède les avantages de la commande en boucle fermée pour le rejet de perturbations et les erreurs de modélisation. [43]

##### a. Synthèse de la loi de commande par inversion du système

Intuitivement, un système placé en cascade avec son inverse délivre une relation d'identité entre la sortie du système et l'entrée de son inverse.

Le problème de suivi de trajectoire réside dans la détermination d'une entrée (commande) capable de forcer la sortie d'un système à suivre une trajectoire de référence admissible.

Afin de résoudre ce problème nous supposons qu'il existe un système inverse capable, en présence de la trajectoire désirée, de fournir une entrée (commande) qui, appliquée au système, conduit à une convergence de sa sortie vers la trajectoire de référence. Dans ce cas, la synthèse d'un contrôleur est ramenée à un problème de construction d'un système inverse. [45]



**Figure IV.7: inversion en boucle ouverte [43]**

L'idée d'utiliser l'inverse d'un système pour résoudre le problème de suivi de trajectoire n'est pas nouvelle. Elle est utilisée pour synthétiser des contrôleurs pour des systèmes linéaires.

Si l'on utilise une représentation d'état des systèmes dynamiques, une inversion directe ne peut pas être envisagée, car la sortie de ces systèmes ne dépend pas explicitement de l'entrée (commande). Par contre, cette inversion est possible si une représentation entrée-sortie est adoptée.

### b. Commande à modèle interne linéaire

Le principe de base de la commande à modèle interne est illustré à la figure **IV.8**. La commande «  $u$  » issue du contrôleur «  $G_c$  » est appliquée simultanément au procédé «  $G_p$  » et à son modèle «  $G_m$  ». La comparaison des sorties «  $y_p$  » et «  $y_m$  » génère un signal d'erreur qui est utilisé pour modifier l'entrée du correcteur, afin de permettre à la commande de mieux piloter le procédé.

Si le modèle est une parfaite représentation du procédé, alors le signal d'erreur est égal à la perturbation. Dans ce cas, la structure de commande est équivalente à un schéma de commande en boucle ouverte. Malheureusement, en pratique, le procédé et son modèle sont rarement identiques. Le signal de retour représente alors l'influence des perturbations et des erreurs de modélisation.

De la figure **IV.8**, on peut écrire:

$$y_p = \frac{G_c G_p}{1 + G_c(G_p - G_m)} y_d + \frac{G_c G_m}{1 + G_c(G_p - G_m)} d \quad \text{IV.44}$$

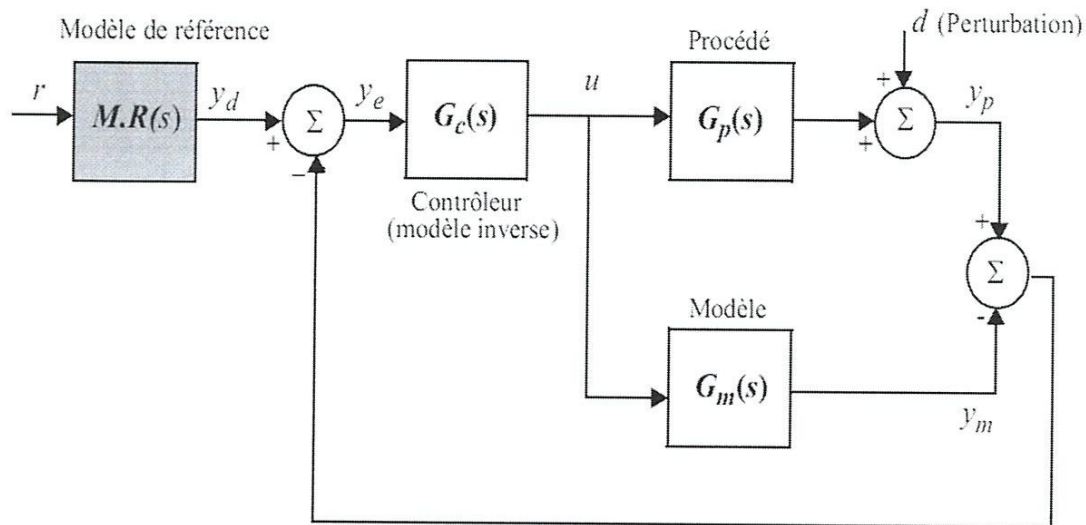


Figure IV.8 : Structure de commande à modèle interne linéaire [45]

Il apparaît clairement que, sous réserve de stabilité du procédé, si le contrôleur est choisi comme l'inverse du modèle alors la boucle « C.M.I » réalise un transfert parfait entre la trajectoire de référence «  $y_d$  » et la sortie «  $y_p$  » du procédé, ceci indépendamment du procédé «  $G_p$  ». Le contrôleur ainsi synthétisé réalise donc une poursuite parfaite malgré la perturbation «  $d$  ». Cependant, si l'erreur modèle-procédé est importante, elle risque de déstabiliser la boucle de commande d'où l'utilité de filtrer le signal de retour en vue d'assurer une certaine robustesse vis-à-vis des erreurs de modélisation. Ce filtre de robustesse est généralement synthétisé en s'appuyant sur le critère de Nyquist.

### c. Commande à modèle interne non linéaire (C.M.I.NL)

Par application de la théorie des opérateurs non linéaires la « C.M.I » linéaire peut être utilisée dans un contexte non linéaire. La méthode proposée consiste à remplacer le modèle linéaire utilisé dans la structure de commande par un modèle non linéaire du procédé, déterminé préalablement à partir de connaissances physiques sur le procédé.

La seule distinction avec la « C.M.I » linéaire réside alors dans l'expression non linéaire des fonctions «  $G_p$ ,  $G_m$  et  $G_c$  ».

D'une manière générale, la « C.M.I » non linéaire est confrontée au problème d'inversion du modèle non linéaire. L'inversion du modèle non linéaire étant incontournable, il est proposé d'utiliser des algorithmes numériques tels que la méthode de Newton et la méthode des substitutions successives. Si ces méthodes sont intéressantes, elles sont très gourmandes en temps de calcul, limitant ainsi leur applicabilité. [45]

Une démarche naturelle consiste à linéariser le modèle non linéaire autour d'un point de fonctionnement et à se ramener alors à une « **C.M.I** » linéaire. Cette approche se prête bien à des problèmes de régulation avec un fonctionnement relativement restreint autour du point de fonctionnement. Dans le cas contraire, la « **C.M.I** » linéaire donne des résultats médiocres et ne peut être utilisée.

Comme pour le cas linéaire, un filtre de robustesse peut être introduit dans la boucle de retour afin d'éviter une déstabilisation de la structure de commande en présence d'erreurs de modélisation et/ou de perturbations importantes. La méthode de synthèse de ce filtre n'est plus le critère de Nyquist mais le théorème du petit gain. Ainsi, le filtre de robustesse  $F$  est choisi tel que la condition suivante soit vérifiée:

$$g(F)g(C)g(G - M) < 1 \quad \text{IV. 45}$$

Où «  $g$  » représente le gain associé aux différents éléments.

## X. Stabilité de la commande prédictive

Même si le problème de la commande prédictive est résolu parfaitement à chaque instant de décision, son utilisation ne conduit pas nécessairement à un système stable en boucle fermée. Le problème de la stabilité qui pourrait surgir lorsque le principe de l'horizon fuyant est utilisé sans précaution particulière a été soulevé très tôt par Kalman en 1960. En effet, Kalman a fait observer que, même pour les systèmes linéaires : « L'optimalité n'implique pas la stabilité ». [45]

## XI. Algorithme

Après la reformulation du problème d'optimisation de la commande prédictive, les étapes de calcul du MPC restent les mêmes:

1. A chaque instant  $k$ , en disposant d'un modèle de connaissance de la sortie du système, on fait la prédiction de la sortie pour un certain horizon  $Np$ , les sorties prédites sont dénotées  $(k + i/k)$  où  $k = 1, 2, \dots, Np$ .
2. La prédiction de la sortie, est utilisée pour calculer le vecteur des futurs signaux de commande  $\{(k + i/k), i = 0, 1, \dots, Nu - 1\}$  à travers l'optimisation d'une fonction objectif  $J_{tot}$ .
3. Le premier élément  $\{(k)\}$  du vecteur du signal de commande optimale  $\{(k + i/k), i = 0, 1, \dots, - 1\}$  issu du problème précédent est appliqué au système et le reste

est rejeté car à l'instant suivant, la nouvelle sortie  $\{y(k + 1)\}$  est disponible et en conséquence l'étape 1 est répétée selon le concept de l'horizon fuyant (glissant).

## XII. Choix des horizons

Comme décrit précédemment, la difficulté du temps continu a été contournée par une discrétisation du temps et de l'argument commande sur un temps fini. Cela a introduit les horizons de prédiction ( $Np$ ) et de commande ( $Nu$ ). Le problème connu en commande prédictive depuis ses origines est leur détermination optimale.

Dans le cas de modèles linéaires, des méthodes existent pour bien fixer ces paramètres puisqu'on peut plus facilement établir les réponses de tels systèmes dans le cas de poursuite de consignes dont les dynamiques sont du même ordre que celles du système linéaire à commander [17].

Dans le cas général, cela reste un problème ouvert puisqu'un horizon optimal dépend de la dynamique de la consigne à poursuivre, mais aussi de l'influence des contraintes sur le comportement du procédé [19].

### a. Choix de l'horizon de prédiction $Np$ :

Le choix de l'horizon de prédiction  $Np$  joue un rôle important tant par la quantité d'informations fournie à l'algorithme, que du point de vue de la faisabilité numérique du problème d'optimisation. Sa détermination est basée sur des considérations physiques ayant trait au comportement du modèle en boucle ouverte, à l'objectif à atteindre ainsi que dans la prise en compte des contraintes. Cependant, s'il n'existe pas encore de méthode permettant de choisir l'horizon de prédiction optimal vis-à-vis du problème posé, le choix d'un horizon de prédiction variable dans le temps peut être mieux qu'avec un horizon  $Np$  constant [19].

D'autre part, pendant les horizons de prédiction, il faut pouvoir prédire le comportement futur du système en y incluant les écarts possibles avec le modèle dus ou non à la commande. Donc, un compromis est à trouver pour ce paramètre entre une grande période de prédiction assurant la maîtrise sur un temps plus long et un petit horizon garantissant de meilleures prédictions du fait de l'information plus adaptée concernant l'écart futur entre le procédé et son modèle.



**b. Choix de l'horizon de commande  $N_u$ :**

En ce qui concerne le choix de l'horizon de commande  $N_u$ , une valeur élevée permet a priori, en ayant plus de degrés de liberté, d'atteindre des objectifs plus difficiles. Cependant, le choix de  $N_u = 1$  est reconnu comme étant suffisant dans la plupart des cas.

**c. Choix du facteur de pondération de la commande  $\lambda$** 

On peut interpréter le facteur de pondération  $\lambda$  comme 'l'équilibre de la balance, En effet, si  $\lambda=0$ , on minimise uniquement dans le critère quadratique, la différence entre la consigne et la sortie prédite. Il peut donc en résulter une commande très forte pouvant faire diverger le processus réel. D'autre part, si  $\lambda$  est très élevé, on pondère alors excessivement la commande qui n'est plus assez 'dynamique' pour mieux suivre la consigne.

**XIII. Conclusion**

Dans ce chapitre, on a décrit la méthodologie de la commande prédictive. On a fait une brève présentation des caractéristiques les plus importantes que présentent les principales méthodes de commande prédictive. On a décrit les principaux éléments qui apparaissent dans ces méthodologies, c'est-à-dire, le modèle de prédiction et la fonction objective. On a mentionné les principes éléments en abordant les contraintes les plus posées dans la pratique.

Tout d'abord, la problématique se traduit en un problème d'optimisation sous contraintes initialement posé en dimension infinie. Une discrétisation du temps et une autre concernant l'argument de commande ont alors permis de poser ce problème en dimension finie. Cela a également permis d'introduire les paramètres de réglage essentiels de la commande prédictive.

# Chapitre V

Application Aux Moteur D'Un Turboréacteur

## I. Introduction

La commande du moteur joue un rôle crucial dans le fonctionnement continu de turboréacteurs à double flux qui sont des systèmes non linéaires complexes. Comme les moteurs ont évolué à la hausse des capacités, il est essentiel de mettre à jour la stratégie de contrôle. Dans ce travail, le contrôleur de base industriel (Base line PID) est remplacé par un (MPC), une technique de contrôle de modèle basé sur la gestion dynamique des contraintes complexes. Ceci permet l'incorporation de défauts qui se produisent pendant le fonctionnement du moteur du turboréacteur dans la conception de la commande. Une commande MPC multi-modèle est ainsi appliquée à un turboréacteur à double flux non linéaire en présence de défauts de composants en mettant l'accent sur le contrôle de deux grandeurs importantes : la vitesse du ventilateur (Fan Speed) et la poussée (Trust).

## II. Simulations linéaires

### 1. Linéarisation

Un modèle d'état discret linéaire invariant dans le temps du moteur C-MAPSS40k est utilisé comme modèle de référence pour la MPC. Afin de démontrer les performances limitées de la MPC sur une demande variable dans le temps en termes de variation de *l'angle du niveau de puissance* (PLA), le moteur C-MAPSS40k non linéaire (voir annexe B) est linéarisé aux conditions d'exploitation (conditions nominales). En d'autres termes à ces conditions, le moteur violerait ses limites en l'absence des limiteurs.

Dans la simulation, il est utilisé le modèle linéaire décrit par V.1 et l'équation V.2, où  $A_c$ ,  $B_c$ ,  $C_c$  et  $D_c$  sont de dimensions appropriées.

$$\dot{x}(t) = A_c x(t) + B_c u(t) \quad \text{V.1}$$

$$y(t) = C_c x(t) + D_c u(t) \quad \text{V.2}$$

Les équations linéaires continues de l'espace d'état qui en résultent sont discrétisées avec un échantillonneur bloqueur d'ordre zéro avec une période d'échantillonnage de 0,015sec pour obtenir une représentation discrète de l'espace d'état de la forme :

$$x_{k+1} = A_d x_k + B_d u_k \quad \text{V.3}$$

$$y_k = C_d x_k + D_d u_k \quad \text{V.4}$$

Où  $x \in R^n$  et  $u \in R^m$  sont les vecteurs d'état et d'entrée, avec  $A_d$ ,  $B_d$ ,  $C_d$  et  $D_d$  sont des matrices de dimensions appropriées. La vitesse du ventilateur  $N_f$  et la vitesse de base  $N_c$  forment le vecteur d'état  $x$  alors que le taux de carburant  $W_f$  constitue le vecteur d'entrée (de commande)  $u$ .

## 2. Réalisation du MPC

Pour un système d'espace d'états discrets de la sortie au moment de l'instant  $k$  est indépendant de l'entrée à l'instant  $k$  instantanée. L'entrée peut être décrite comme.

$$u_k = u_{k-1} + \Delta u_k \quad \text{V.5}$$

Par l'utilisation de l'équation (V.5) dans les deux équations (V.3), (V.4) on trouve le système discret :

$$\begin{bmatrix} x_{k+1} \\ u_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_d & B_d \\ 0 & I_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_k \\ u_{k-1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_d \\ I_m \end{bmatrix} \Delta u_k \quad \text{V.6}$$

$$y_k = \begin{bmatrix} C_d & D_d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_k \\ u_{k-1} \end{bmatrix} \quad \text{V.7}$$

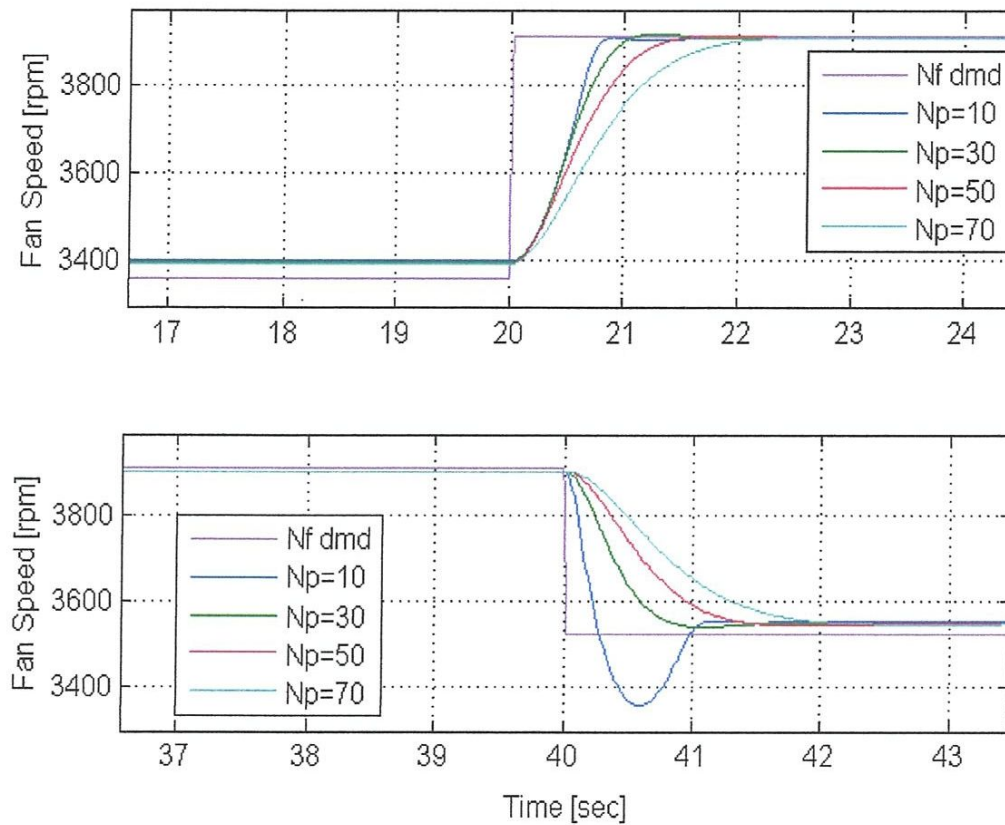
Que l'on peut réécrire comme suit

$$\bar{x}_{k+1} = A_g \bar{x}_k + B_g \Delta u_k \quad \text{V.8}$$

$$y_k = C_g \bar{x}_k \quad \text{V.9}$$

Où  $A_g$ ,  $B_g$  et  $C_g$  sont des matrices augmentées. Par conséquent, à partir de l'équation (V.8);  $u(k)$  est la variable de commande devant être optimisée par le MPC.

Les sorties sont dans l'ordre  $N_f, N_c, W_f, T25, T50, PS3, P50$ , poussée nette, LPC\_SM et SM\_HPC. Comme mentionné précédemment, les performances du MPC dépendent en grande partie des contrôles et des horizons de prédiction  $N_u$  et  $N_p$ , et des matrices de pondération  $Q$  et  $R$ .



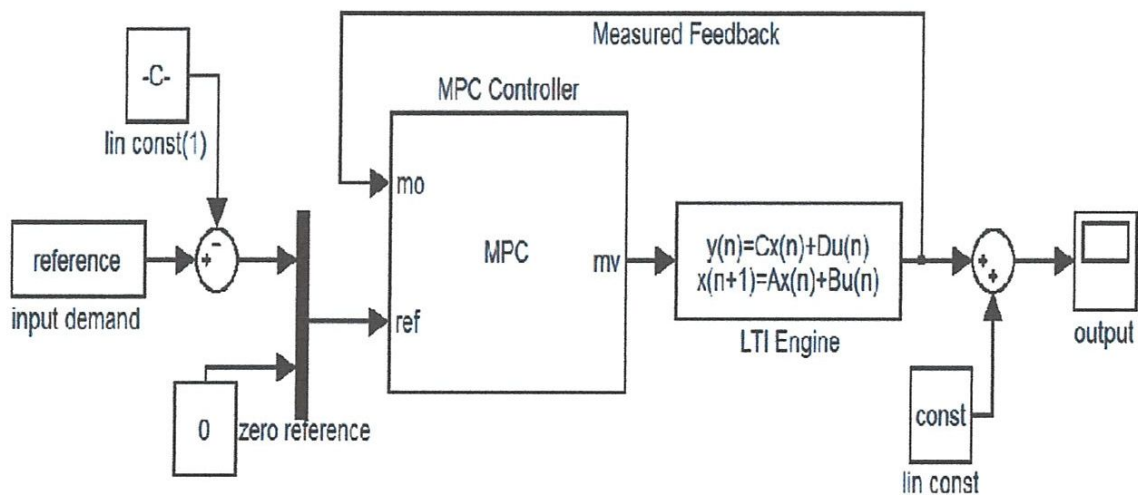
**Figure V.1 : Effet de différents horizons de prédiction avec  $N_u = 1$**

La figure V.1 montre l'effet de différents horizons de prédiction sur le comportement du MPC pour une valeur fixe de  $N_u=1$ . Comme l'augmentation de  $N_p$  augmente le temps de montée, il en résulte l'élimination des dépassements lors de transitoires.

Pour le reste de simulations effectuées dans l'environnement MATLAB / Simulink, les horizons sont choisis comme  $N_u = 1$  et  $N_p = 50$ . Les matrices de pondération sont choisis diagonales définies positives et de telle sorte que la performance MPC est soutenue dans la présence de défauts (robustesse).

Enfin, les contraintes sévères envisagées pour le MPC sont les limites imposées sur le moteur C- MAPSS40k à savoir :

- $N_f$  max: 4200 rpm
- $N_c$  max: 12200 rpm
- $Ps3$  max: 433 psi (2.985 MPa)
- $Ps3$  min: 49 psi (0.337 MPa) pour des conditions de simulation
- $T50$  max: 1500° R (833° K)

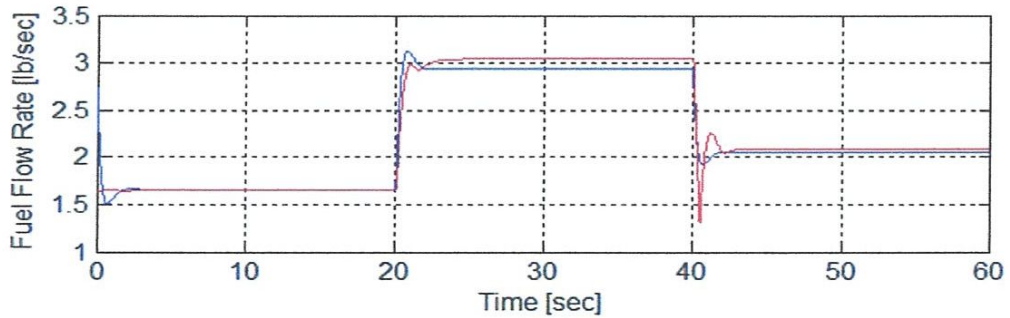
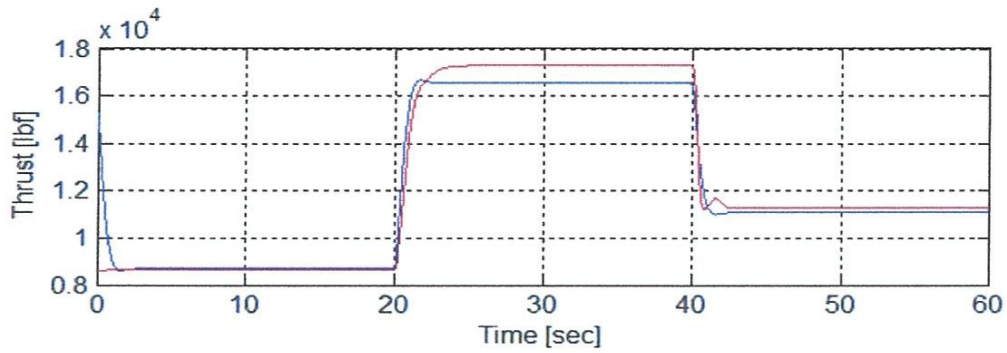
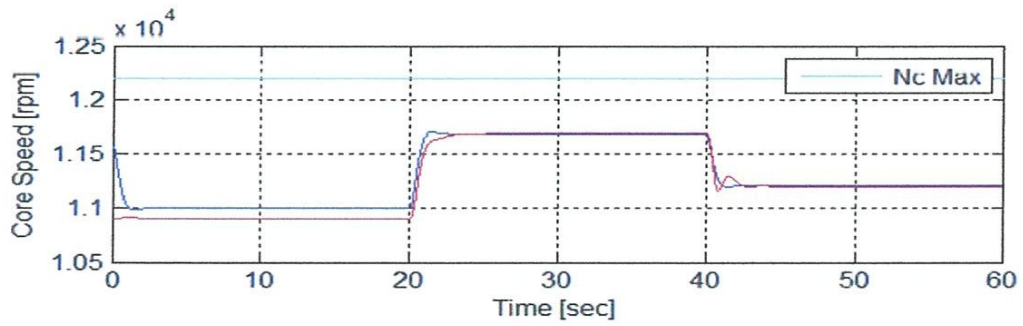
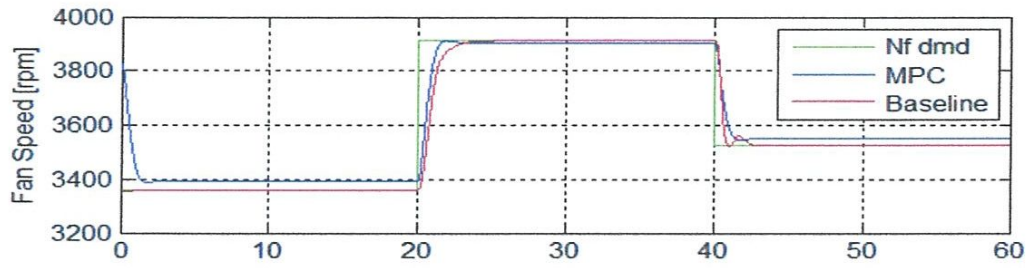


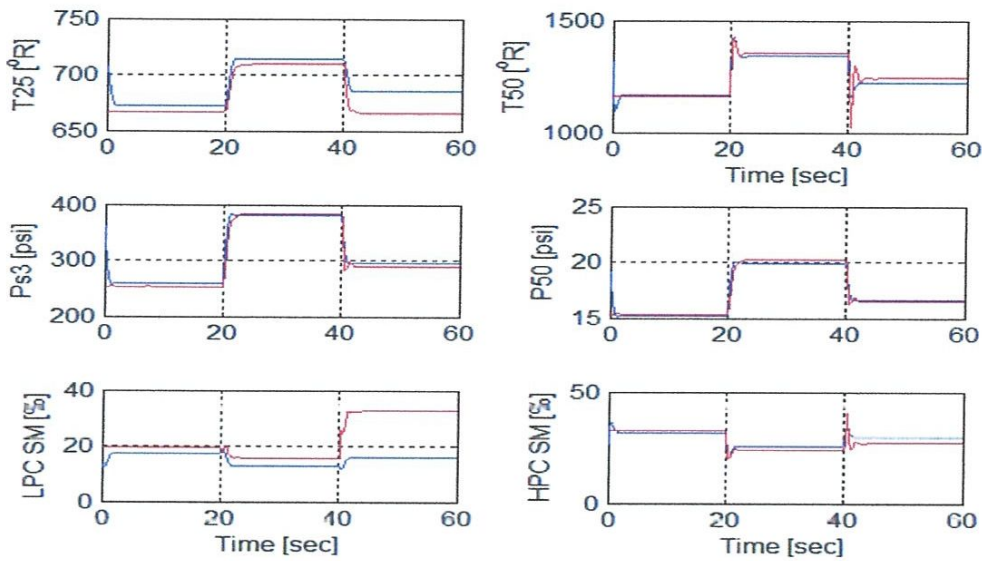
**Figure V.2: Schéma-bloc de Simulation du MPC dans MATLAB / Simulink pour le contrôle de la variable  $N_f$  (Fan Speed).**

Pour un cas nominal qui exploite le toolbox MPC. Le schéma-bloc Simulink est représenté sur la figure V.2. Pour les simulations effectuées, les conditions de vol utilisées sont:

- Altitude: 10,000 ft (3048 m)
- Mach: 0.8
- PLA dmd: 58° – 68° - 63°
- Durée: 60 sec

**A. Contrôle de La Vitesse du ventilateur**





**Figure V.3: Comparaison entre MPC et PID (Baseline) pour des conditions nominales**

Une simulation de 60 sec pour les conditions choisies. Il est à noter au passage que les variables de rétroaction dans la figure V.2 comprenant les variables d'état du moteur du turboréacteur C-MAPSS40k et la sortie  $P_{S3}$  sont mesurables.

La vitesse de référence du ventilateur ( $N_f$  dmd) est utilisée comme consigne principale par le MPC (soit une approche de contrôle du moteur traditionnelle permettant de contrôler uniquement la vitesse du ventilateur et assurer d'autres paramètres du moteur en étant dans les limites de bonnes performances).

De plus, puisqu'il s'agit d'une simulation de la poursuite de la demande de la vitesse du ventilateur seulement, il est suffisant de fournir la référence de la vitesse du ventilateur tout en fixant la référence pour le reste des sorties à zéro.

En absence de défauts, il est montré dans la figure V.3 que les performances du PID et du MPC sont en accord. Bien sûr, le temps de montée du MPC peut se faire plus rapidement en optimisant les horizons cependant, au coût de consigne de dépassement et de violation des limites d'accélération de base.

Comme il est remarqué dans la figure. V.3, le pic du taux de débit de carburant (Fuel Flow Rate) pendant la décélération n'est pas présent dans le MPC. D'autres paramètres du moteur tels que la température et la pression des différentes Stations le long du moteur



avec les marges de décrochage de la basse pression et les compresseurs hautes pressions sont comparés entre le régulateur de base PID et le MPC dans la figure. V.3.

### B. Simulation de la tolérance aux défauts :

On utilise l'**approche multi-modèle** où un modèle de référence est basé sur un certain défaut de composant est appliquée sur un moteur ayant le même défaut en supposant un FDI (Fault diagnosis and Isolation) approprié a été effectué au préalable. Dans le cas de notre simulation, il est considéré une dégradation de 20% l'efficacité du ventilateur « Fan Efficiency » ( $FE = -0,2$ ). Pour permettre la tolérance au défaut, il faut utiliser un contrôleur dont le modèle de référence est basé sur le même défaut de grandeur similaire. Ceci est montré dans la Figure V.4. Quand un modèle de référence nominale (NC) est utilisé en présence de défauts (DE) soit (NC-DE) c'est à dire un décalage, les contraintes ne sont pas respectées comme c'est dans le cas de Nc. De même, il existe une perte de performance quand un modèle de référence dégradé (DC) est utilisé dans l'absence de défauts (DC-NE).

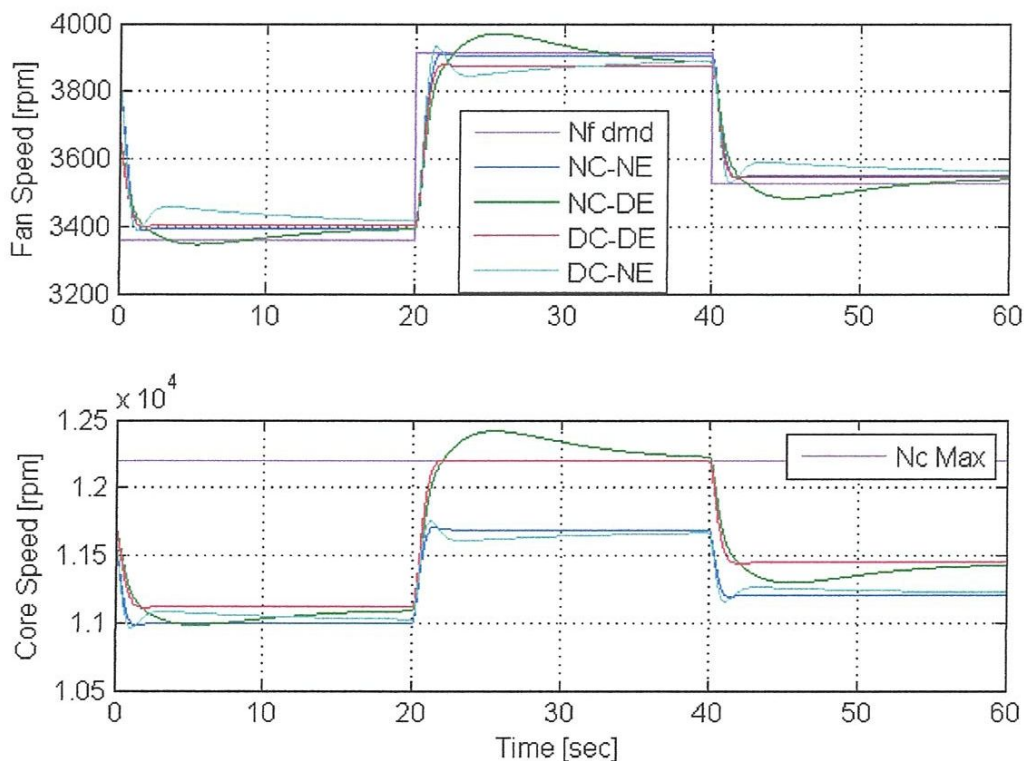


Figure V.4: Tolérance aux défauts du MPC

On suppose que la commutation entre les modèles de référence est prise en charge par les régimes FDI appropriées afin d'atteindre la meilleure performance.

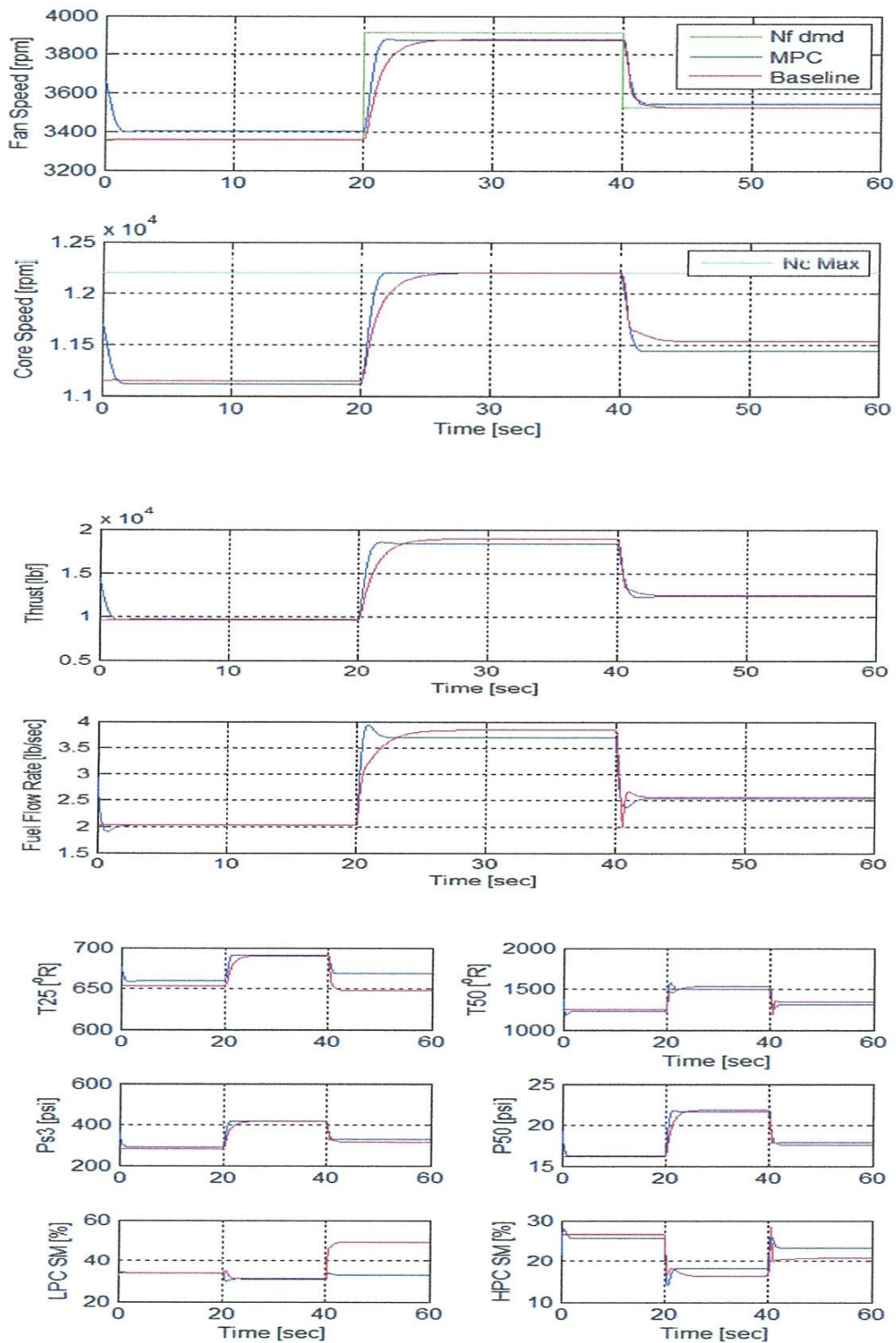


Figure V.5: MPC et PID pour une dégradation de 80% de ( $FE = -0,2$ )

Les courbes de la figure V.4 montrent les simulations pour un moteur pour les conditions de vol de croisière données auparavant avec une dégradation de 20% de l'efficacité du ventilateur (FE). Les effets du défaut sont clairement visibles entre le cas nominal et le cas dégradé identifié par un changement dans les variables du moteur relativement aux courbes de la figure V.3. En outre, la limite de température maximale à la sortie de turbine basse pression est de 1500° R, auquel le contrôleur PID viole légèrement, mais cette contrainte est respectée par le MPC. Ces simulations montrent l'efficacité de MPC dans le traitement des contraintes et défauts du système dynamique.

Les valeurs de R et Q pour la dégradation de 20% de FE Sont .

$$\mathbf{Q} = \text{diag} [ 100 \ 19 \ 1 \ 0 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 ] \quad (\text{V.10})$$

$$\mathbf{R} = \text{diag} [ 10 ] \quad (\text{V.11})$$

L'erreur en régime permanent dans T25 et les marges de décrochage sont principalement dû au fait que le MPC est appliqué à un modèle de moteur LTI où le dispositif de commande en ligne de base est appliquée au moteur linéaire. En outre, la manipulation d'une seule variable,  $W_f$  dans ce cas, pour un vecteur de sortie de dimension supérieure peut conduire à un sacrifice dans quelques sorties. Par conséquent, une approche de contrôle multi variable est préférable, mais cela conduit au calcul beaucoup plus lourd.

### C. Contrôle de La poussée

Le but de ce contrôle est le maintien de la poussée à une valeur désirée dans toutes les conditions. Le schéma-bloc de la simulation de cette loi de commande est

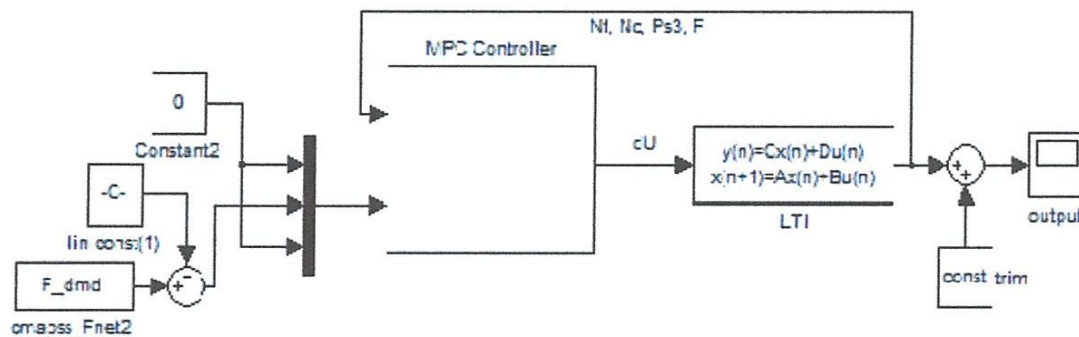


Figure V.6 Schéma-Bloc de Simulation du MPC dans MATLAB / Simulink pour le contrôle de la poussée.

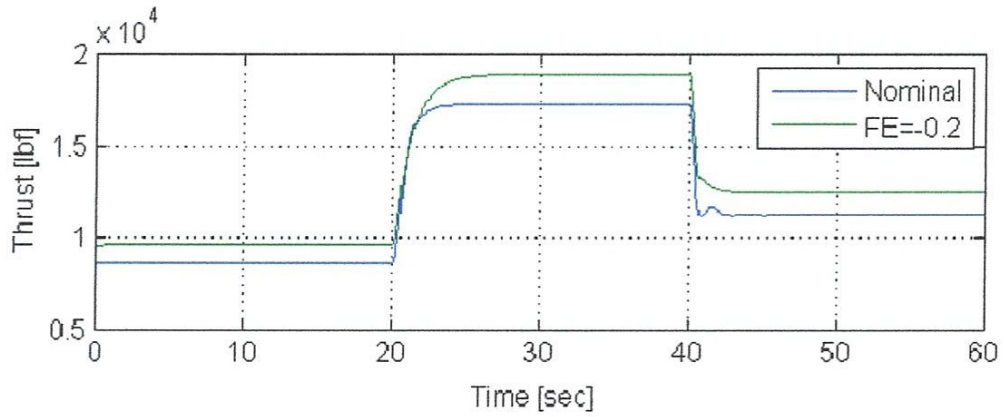


Figure V.7 Variation de la poussée due à des défauts dans C-MAPSS40k en utilisant le contrôle de la vitesse du ventilateur

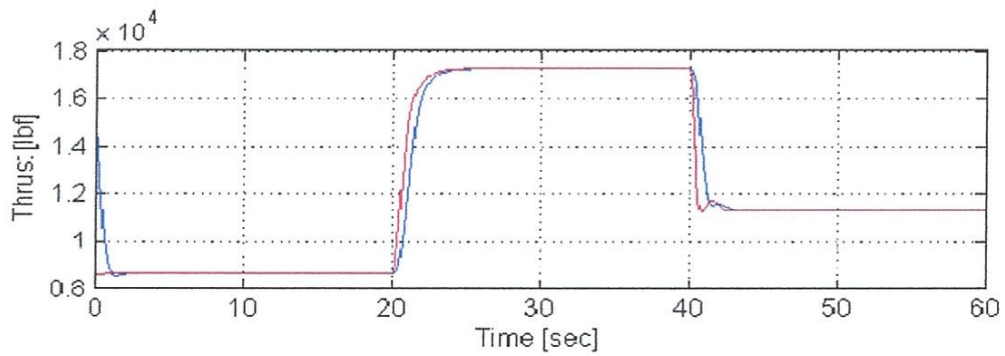
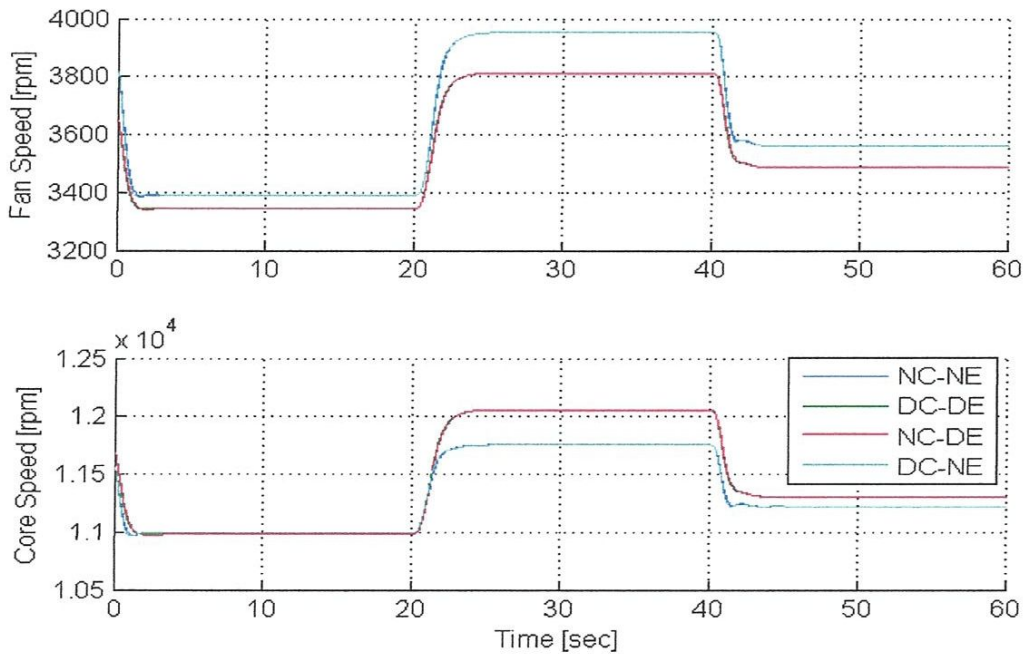
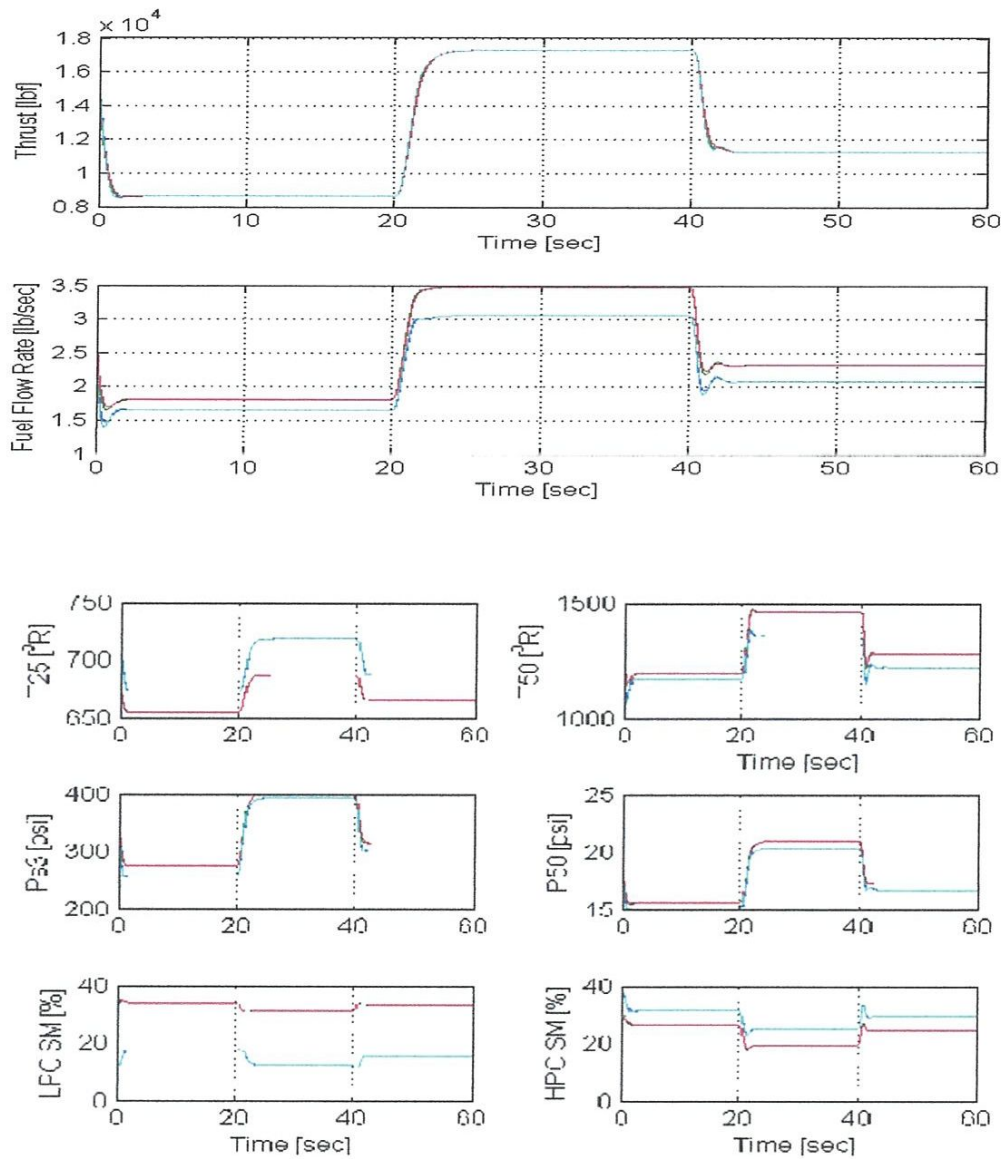


Figure V.8 : Comparaison de poussée entre MPC et PID pour des conditions nominales. Bleu = MPC, rouge = PID





**Figure V.9 : Multi-modèle de contrôle de poussée pour le cas nominal et pour celui de dégradation de 80% de FE**

Et comme la poussée ne peut pas être mesurée directement, on peut y remédier en utilisant un estimateur (observateur) de la poussée produite.

Dans les simulations de commande de poussée suivante, le modèle de simulation est similaire à celui de la Fig. V.2 mais pour le contrôle la poussée produite. En outre, la valeur qui est soustraite de la demande de poussée est la valeur de poussée demandée avec toutes les autres références de sortie mises à zéro. **La poussée estimée est presque identique à la poussée de la production effective.**

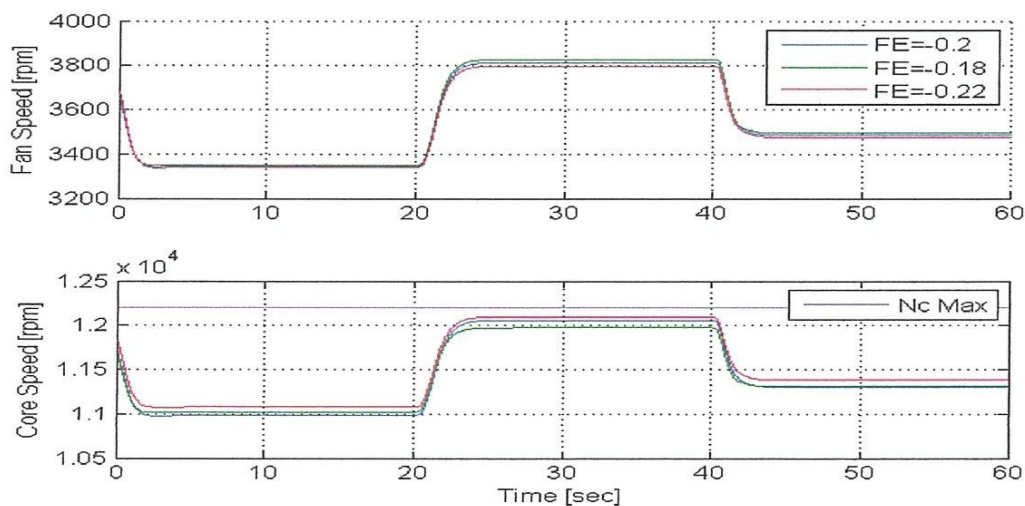
Comme il s'agit d'un système de contrôle de poussée, la référence d'entrée du MPC est une poussée désirée, qui est ici la poussée produite par le moteur C- MAPSS40k non linéaire à la valeur nominale qui peut être considérée comme la demande de poussée nominale. La matrice de pondération d'entrée est la même que pour le contrôle de la vitesse du ventilateur donnée dans l'équation. (V.11). La matrice de pondération de sortie est modifiée comme indiqué dans l'équation. ( V.12 ) avec une plus grande importance sur la poussée.

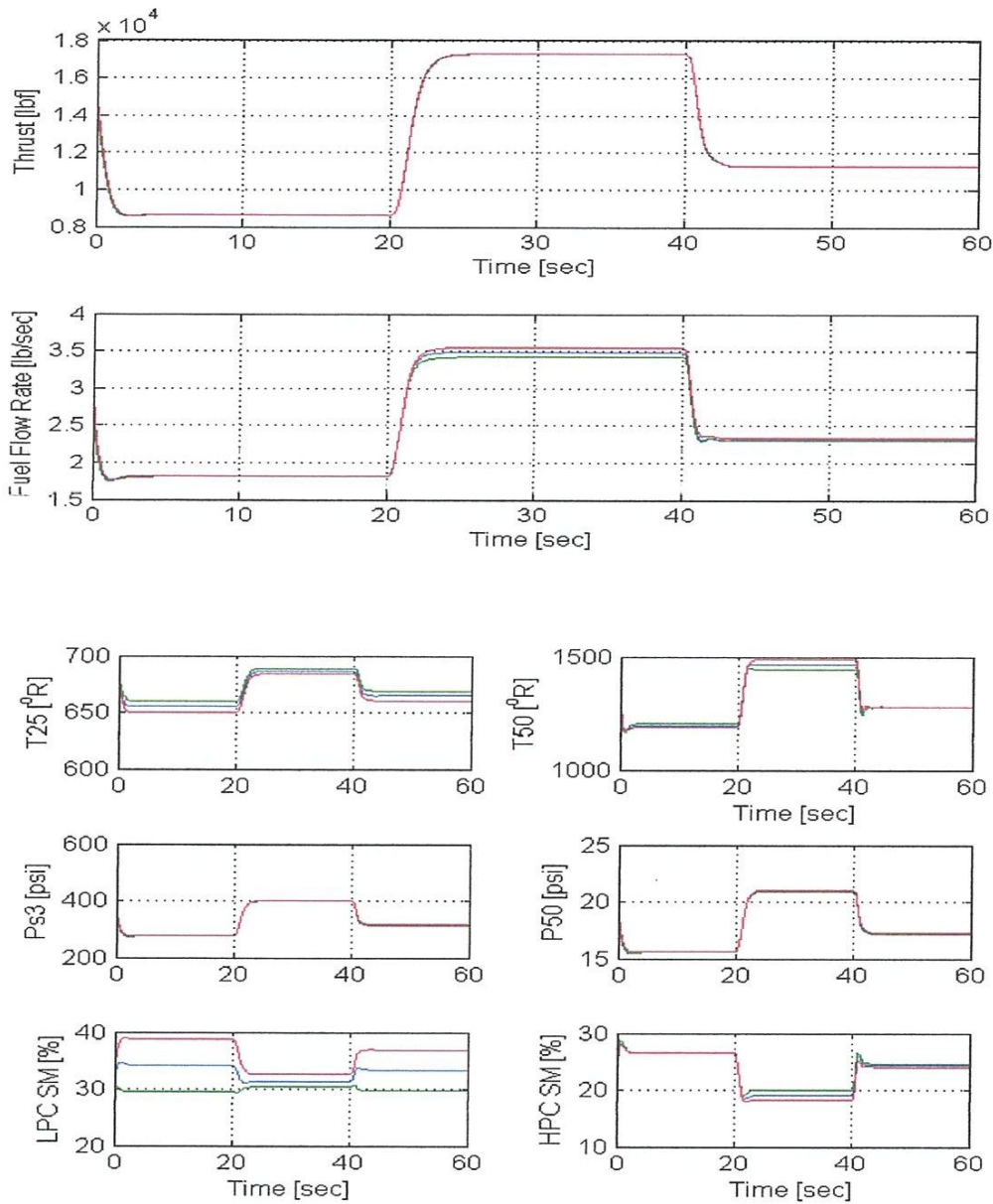
$$\mathbf{Q} = \text{diag}[ 10 \ 19 \ 1 \ 0 \ 1 \ 1 \ 0 \ 100 \ 0 \ 0 ] \quad (\text{V.12})$$

L'approche multi-modèle utilisée dans les simulations de contrôle de la vitesse du ventilateur est utilisé pour le contrôle de la poussée, comme indiqué sur la figure V.8.

Pour les conditions nominales et avec une dégradation de 20% dans l'efficacité du ventilateur ( $FE = -0,2$ ). Fait intéressant, les performances ne dépendent que de l'état de santé actuel du moteur indépendamment du modèle de référence utilisé LTI. Dans tous les cas, la poussée produite reste la même en maintient les contraintes du moteur tandis que le reste des paramètres du moteur change.

Par conséquent, la modélisation des conditions défectueuses peut être évitée sans aucune perte de performances. Cela est également démontré dans la Figure V.9 où le MPC avec un modèle de référence en fonction des conditions de fonctionnement nominales est appliqué au modèle d'un moteur LTI avec une dégradation de 18%, 20% et 22% dans l'efficacité du ventilateur. En outre,  $N_c$  n'atteint jamais ses limites physiques au cours de la commande de poussée lors d'une dégradation de  $FE = -0,2$  comme ce fut le cas lors de la commande du ventilateur.





**Figure V.10: Contrôle de la poussée à l'aide d'un modèle de référence nominale (Nc) avec une dégradation de 78%, 80% et 82% de FE.**

Par conséquent la mise en œuvre de contrôle de poussée évite non seulement la modélisation supplémentaire des conditions défectueuses, mais assure également que la performance réelle désirée (de poussée) est atteinte aux niveaux souhaités en tout temps.

### **III. Conclusion :**

Le problème d'implémentation de la commande FTC a été bien mis en évidence à travers la loi de contrôle utilisée (MPC) et l'application choisie.

Des études en simulation nous ont permis de tester les bonnes performances de la loi de commande proposée relativement au régulateur standard de base fréquemment utilisé, le PID et surtout en présence de défauts.



# CONCLUSION GENERALE

## CONCLUSION GENERALE

Nous avons présenté dans ce mémoire donné des éléments succincts sur la commande tolérante aux défauts, ses objectifs et ses structures.

Les systèmes tolérants aux défauts se déclinent en deux grandes familles avec d'une part une approche passive et d'autre part l'approche active incluant un module de diagnostic. Un grand nombre de travaux traite du domaine de la commande tolérante aux défauts appliqué aux systèmes linéaires ou aux systèmes évoluant dans un domaine restreint. Notre objectif a été de développer des lois de commandes tolérantes aux défauts basées sur des modèles linéaires invariants dans le temps. La technique de commande adoptée, en l'occurrence le MPC est testée sur le moteur d'un turboréacteur.

Nous avons pu savoir, à travers l'étude effectuée, que le système de commande tolérant aux défauts (*FTC*) est capable d'une part de détecter la présence de défauts dans les capteurs et/ou les actionneurs ou composants et d'autre part d'adapter ou reconfigurer adéquatement le signal de commande afin de maintenir les performances prédéfinies en termes de qualité de production, sécurité, etc.

De même, nous avons découvert la façon la plus commune de concevoir un système *FTC* en divisant le problème en deux phases distinctes.

La première phase concerne le problème de détection et d'isolation des défauts (*FDI : Fault Detection and Isolation*). Permet de détecter la présence d'un défaut ou éventuellement complètement l'isoler.

La seconde phase, permet la conception d'une unité de décision qui assure; sur la base des informations fournies par l'unité *FDI* ; la reconfiguration de la commande afin de compenser les effets des défauts et de respecter les contraintes de performances.

Il est établi que le système de commande tolérant aux défauts a pour but de maintenir des performances proches de celles désirées tout en préservant la stabilité, non seulement en l'absence de défauts (dérives) mais également en présence de composants défectueux (pannes).

Si les performances initiales ne peuvent plus être garanties, un système de commande tolérant aux défauts doit assurer au moins des performances dégradées acceptables ou arrêter le système. C'est dans cette logique que la commande proposée a été appliquée et testée.

En effet, à travers l'application choisi, en l'occurrence le modèle du moteur d'un turboréacteur et la loi de commande adoptée (le MPC), on a cumulé un potentiel de connaissance sur la loi de commande FTC et ses conditions d'implémentation.

# BIBLIOGRAPHIE

**BIBLIOGRAPHIE**

- [1]. **KHELASSI Ahmed.** « *Nouvelle Méthodologie de Synthèse de Lois de Commande Tolérante aux Fautes Garantissant la Fiabilité des Systèmes* ».Thèse de doctorat. Université Henri Poincaré, Nancy 1.France. **2011.**
- [2]. **GUENAB Fateh.** « *Contribution aux systèmes tolérants aux défauts : Synthèse d'une méthode de reconfiguration et/ou de restructuration intégrant la fiabilité des composants* ». Thèse de doctorat. Université Henri Poincaré, Nancy 1. France. **2007**
- [3]. **BOULMERDJ Nomane.** « *Commande Tolérante aux Défauts Application à la MSAP* ». Mémoire d'Ingénieur d'Etat en Automatique. École Nationale Polytechnique. Algérie. **2009**
- [4]. **MENIGHED Kamel.** « *Commandes coopératives embarquées et tolérantes aux défauts* ».doctorat.Université Henri Poincaré, Nancy 1 France. **2010**
- [5]. **BENBAHA Noureddine.** « *Commande robuste tolérance aux défauts: Application à la Machine à Courant Alternatif* ». Mémoire de magister en électrotechnique .Batna. **2009**
- [6].**M. JEROME CIESLAK.** « *Analyse et synthèse d'une architecture coopérative pour la commande tolérante aux défauts application à un système aéronautique*». Thèse de doctorat. Université bordeaux I. France. **2007**
- [7]. **ANDREI Geanina.** « *Contribution à la commande tolérante aux pannes dans la conduite du vol* ». Thèse de doctorat. Institut national polytechnique de TOULOUSE. France. **2010**
- [8]. **ABERKANE Samir.** « *Systèmes Tolérants aux Défauts : Analyse et Synthèse Stochastiques* ». Thèse de doctorat. Université Henri Poincaré, Nancy 1. France. **2007**
- [9].**GONZ'ALEZ-CONTRERAS Brian Manuel.** « *Contribution à la Tolérance aux Défauts des Systèmes Linéaires : Synthèse de Méthodes d'Accommodation Fondée sur l'Information du Second Ordre* ».Thèse de doctorat. Université Henri Poincaré. France. **2009**
- [10].**MUFEED M. MAHMOUD, Jin Jiang, Youmin ZHANG** « *Active Fault Tolerant Control Systems Stochastic Analysis and Synthesis* » Livre. Lecture Notes in Control and Information Sciences. Springer. **2003**
- [11].**KRIVANEK Vaclav.** « *Une combinaison de méthodes de diagnostic pour d'ingénierie renforcement de la résilience troubles du système* ».Thèse de Doctorat. **2009**

- [12].RODRIGUES Mickaël. « *Diagnostic et commande active tolérante aux défauts appliqués aux systèmes décrits par des multi-modèles linéaires* ». Thèse de doctorat. Université Henri Poincaré, Nancy 1. France. 2009
- [13].IKNI Samir. « *Diagnostic de Pannes et Commande Tolérante Aux Fautes D'un Robot Manipulateur Télé-Opéré* ». Mémoire de magistère en Electronique. Batna 2011
- [14].AIOUANI Hakima. BOUDJATIT Dounia. « *Commande hybride tolérante aux défauts. Application au simulateur d'hélicoptère TRMS* ». Mémoire d'Ingénieur d'Etat en Automatique. Ecolenationalepolytechnique.Algérie.2009
- [15].RUPP Daniel « *Fault-Tolerant Control and Fault Detection for Unmanned Aerial Vehicles* ».Diploma Thesis. Swiss Federal Institute of Technology.Zürich.2005
- [16]. MARTINI Adnan. "Modélisation et Commande de vol d'un hélicoptère drone soumis à une rafale de vent". Thèse de doctorat. Université de METZ. École doctorale énergie, mécanique, matériaux. France. 2006.
- [17]. A.BOISSON."L'aérodynamique du vol de l'avion". Livre. Dunod.1969.
- [18]. GUILLAUME J.J. DUCARD."Fault-tolerant Flight Control and Guidance Systems Practical Methods for Small Unmanned Aerial Vehicles". Livre. Advances in Industrial Control Springer. 2009.
- [19]. FRAGKOULIS Dimitrios. « *Détection et localisation des défauts provenant des actionneurs et des capteurs: application sur un système non linéaire* ». Thèse de doctorat. Ecole Doctorale Systèmes de Toulouse. France. 2008
- [20]. ORJUELA Rodolfo. « *Contribution à l'estimation d'état et au diagnostic des systèmes représentés par des multi modèles* ». Thèse de Doctorat. Institut National Polytechnique de Lorraine. France. 2009
- [21]. KANEV Stoyan. « *Robust Fault-Tolerant Control* ». Thèse Ph.D. Université de TWENTE• THE NETHERLANDS. 1991
- [22]. HOCINE Abdelfettah. « *Estimation d'état et diagnostic de systèmes à commutation par filtrage multi-modèle* ». Thèse de Doctorat. Institut National Polytechnique de Lorraine. France. 2006
- [23]. PFLIMLIN Jean Michel. « *Commande d'un mini drone à hélice carénée : De la stabilisation dans le vent à la navigation autonome* ».Thèse de doctorat. Ecole Doctorale Systèmes de Toulouse. France. 2007
-

- [24]. MOUSSA ALI Abdouramane. « *Diagnostic sans modèle a priori* ». Thèse de doctorat. Université Henri Poincaré. France. 2011
- [25]. ARLAT Jean, CROUZET Yves, DESWARTE Yves, FABRE Jean-Charles, LAPRIE Jean-Claude, POWELL David. « *Tolérance aux fautes* ». Article 1: La dimension technologique des systèmes d'information - Section 2 : L'architecture et les systèmes (M. Banâtre, Ed). 2006
- [26]. DUMONT Pierre-Emmanuel. « *Tolérance active aux fautes des systèmes d'instrumentation* ».Thèse de doctorat. Université des Sciences et Technologies de Lille .2006
- [27]. AITOUCHE Abdelwahab. « *Tolérance aux fautes* ». Séminaire.Hautes Etudes d'Ingénieur, Lille.2004
- [28].HADID Beya et MANSOURI Mossaab.« *Modélisation et diagnostic des systèmes dynamiques par MSPCA, application à un générateur de vapeur* ». Mémoire d'Ingénieur d'Etat en Automatique. École nationale polytechnique. 2010
- [29]. BENZAOUI Wafa. « *Diagnostic de la machine asynchrone à base d'observateurs*». Mémoire d'Ingénieur d'Etat en Automatique. École nationale polytechnique.2007
- [30]. OUDGHIRI Mohammed. « *Commande multi-modèles tolérante aux défauts : Application au contrôle de la dynamique d'un véhicule automobile* ».Thèse de doctorat. Université de PICARDIE JULES VERNE. Ecole doctorale en sciences et sante. 2009
- [31]. JAMOULI Hicham. « *Génération de résidus directionnels pour le diagnostic des systèmes linéaires stochastiques et la commande tolérante aux défauts* ». Thèse de doctorat. Université Henri Poincaré, Nancy .France.2004
- [32]. ARAR Khalil, TADJINE Samir.« *Modélisation et Diagnostic des systèmes par l'Analyse en Composantes Principales Multi-Echelle MSPCA* ».Mémoire d'ingénieur. Annaba. Algérie. 2007.
- [33]. GRAHAM R. Drozeski « *A Fault-Tolerant Control Architecture for Unmanned Aerial Vehicles* ». School of Electrical and Computer Engineering.Georgia Institute of Technology.2005
- [34]. BENBAHA Noureddine. « *Commande robuste tolérance aux défauts: Application à la Machine à Courant Alternatif* ». Mémoire d'Ingénieur d'Etat en Automatique. École nationale polytechnique. 2009

- [35]. DELLECI Mohamed Saïm, TOUAHMI Mohamed Tahar Yaniss. « *Diagnostic et commande tolérante aux défauts des convertisseurs multicellulaires : approche hybride* ». Mémoire d'Ingénieur d'Etat en Automatique. École nationale polytechnique. 2008
- [36]. PATTON Ron J. « *Fault-Tolerant Control Systems: The 1997 situation* ». Article. The University of Hull, School of Engineering, Hull HU67RX, UK.
- [37]. BOUSSAID Boumedyen. « *Contribution à la tolérance active aux défauts des systèmes dynamiques par gestion des référence* ». Thèse de Doctorat de l'École Nationale d'Ingénieurs de Gabès et de l'Université Henri Poincaré, Nancy 1. France. 2011
- [38]. HALLOUZI Redouane. « *Multiple-Model Based Diagnosis for Adaptive Fault-Tolerant Control* ». Thèse de doctorat. MAROKKO. 2008
- [39]. SUBIAS Audine. « *Contribution au diagnostic des systèmes complexes* ». Mémoire d'Ingénieur d'Etat en Automatique. École nationale polytechnique. 2007
- [40]. DELLECI Mohamed Saïm, TOUAHMI Mohamed Tahar Yaniss. « *Diagnostic et commande tolérante aux défauts des convertisseurs multicellulaires : approche hybride* ». Mémoire d'Ingénieur d'Etat en Automatique. École nationale polytechnique. 2008
- [41] THOMA. M, ALLGÖWER F, MORARI M “*Fault Tolerant Control Design for Hybrid Systems*”. Livre. Springer. 2010
- [42]. L.H. CHIANG, E.L. RUSSELL and R.D. BRAATZ. « *fault Detection and diagnosis in Industrial Systems* ». 1975
- [43]. IDIRI Ghania. « *Commande prédictive des systèmes non linéaire dynamiques* ». Mémoire de magistère. Automatique. Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou. 2011
- [44]. Zahi SABAH. « *Diagnostic à base de modèle : application à un moteur diesel suralimenté à injection directe* ». 2006
- [45]. TENIOU Samir. « *Analyse de la Commande Prédictive Floue : Algorithmes et Méthodologies de Solution* ». Magistère en électronique. Université Mentouri Constantine. 2009
- [46]. VELA VALDES Luis Gerardo « *Etude et élaboration d'une approche fonctionnelle pour la localisation de défauts en diagnostic - application à la simulation d'un moteur à courant continu* ». Doctorat de l'université Henri Poincaré, Nancy 1 Spécialité Automatique 1998.
-



- [47]. **RAGOT José et MAQUIN Didier.** « *Estimation d'état et diagnostic de systèmes décrits par des multi modèles* ». Institut National Polytechnique de Lorraine. Article
- [48]. **KERRIGAN C, MACIEJOWSKI J.M.** “*Fault-tolerant control of a ship propulsion system using model predictive controle*”. Department of Engineering University of Cambridge Trumpington Street. Cambridge CB2 1PZ.United Kingdom.
- [49]. **FARAH Faris HACHID Faïçal**« *Synthèse et implémentation pratique de lois de commandes non linéaires : application à un simulateur d'hélicoptère* »Ingénieur d'Etat en Automatique *Juin 2005*
- [50]. **ICHALAL Dalil, MARX Benoît, MAQUIN Didier and RAGOT José.** “*Fault tolerant control for nonlinear systems subject to different types of sensor faults*”. Informatique Biologie Intégrative et Systèmes Complexes (IBISC) Université d'Evry 1st Papyrus Workshop Porticcio, France, October 6-7, **2011**
- [51]. **BLANKE1 Mogens, STAROSWIECKI Marcel and EVA WU N.** « *Concepts and methods in fault-tolerant control*” Tutorial at American Control Conference, June **2001**
- [52]. **Abdallah Bezzini,** « *Commande Prédicative Non Linéaire en Utilisant Les Systèmes Neuro-Flous et les Algorithmes Génétiques* »Magistère en Automatique. Université Mohamed Khider – Biskra. **2013**
- [53].Un Demi-Siècle D'Aéronautique en France. **Les moteurs.** Ouvrage coordonné par Michel Lasserre.
- [54]. **Jean-Claude Thevenin** AAF- Juin 20043ème Edition. Le turboréacteur, moteur des avion à réaction.

# ANNEXES

---

## **I. Liste des variantes de la commande prédictive :**

Toutes les variantes de stratégies de commande prédictive sont aujourd'hui regroupées sous le terme générique **MPC**, La liste ci-dessous propose un aperçu des plus « classiques » :

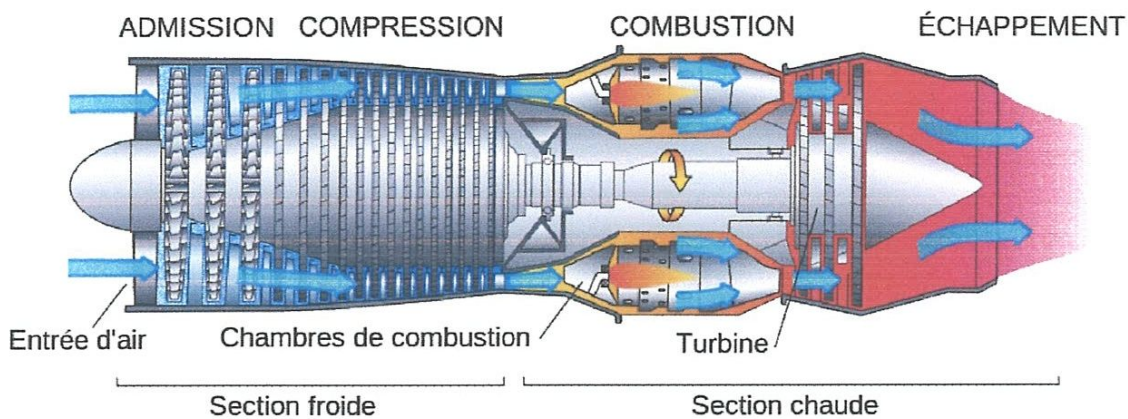
- **MPHC** (Model Predictive Heuristic Control), connue ensuite sous le nom de **MAC**(Model Algorithmic Control) Cette approche, appliquée aux systèmes industriels multi variables, basée sur des prédictions sur un horizon temporel long, impose des trajectoires de référence pour les sorties et minimise la variance de l'erreur.
- **DMC** (Dynamic Matrix Control) proposée par Shell utilise l'incrément de commande à la place de la commande dans le critère de performance pour un horizon fini de prédiction; cet algorithme est appliqué à des systèmes multivariés linéaires sans contraintes; l'erreur de poursuite est minimisée en spécifiant le comportement futur des sorties ; les commandes optimales sont calculées par la méthode des moindres carrés.
- **EHAC** (Extended Horizon Adaptive Control), stratégie de commande prédictive pour les systèmes monovariés, utilise des modèles E/S pour maintenir la sortie future (calculée via la résolution d'une équation diophantienne) le plus près possible de la consigne pendant une période donnée au-delà du retard pur du système.
- **EPSAC** (Extended Prediction Self-Adapted Control) introduit une commande constante pour un système non-linéaire (en linéarisant le système) et utilise un prédicteur sous-optimal à la place de la résolution de l'équation diophantienne.
- **GPC** (Generalized Predictive Control) Cette méthode la plus connue, basée sur un modèle de type CARIMA, introduit un horizon de prédiction sur la commande, agit conformément au principe de l'horizon fuyant et peut être appliquée aux systèmes à non minimum de phase, aux systèmes instables en boucle ouverte, aux systèmes avec retards purs variables.

- **PFC** (Predictive Functional Control) est, un algorithme prédictif simple, utilisé surtout pour des systèmes SISO industriels rapides, en permettant le réglage direct des paramètres (par exemple la constante de temps) associées au temps de montée; pour garder la simplicité, un manque de rigueur en performance et surtout dans la garantie des contraintes est associé à cet algorithme.
- **CRHPC** (Constrained Receding Horizon Predictive Control) propose de prendre en compte des contraintes terminales sous forme « égalité » sur la sortie sur un horizon fini au-delà de l'horizon de prédiction.
- **MPC** (Model Predictive Control) formulée dans l'espace d'état par utilisation du formalisme de la représentation d'état pour faciliter l'analyse de la stabilité et de la robustesse.

## I. Présentations des turboréacteurs

Le **turboréacteur** est un système de propulsion essentiellement utilisé pour les avions. Un turboréacteur fonctionne sur le principe d'action-réaction. La variation de vitesse de l'air entre l'entrée et la sortie du réacteur crée une quantité de mouvement (dénommée **poussée**) vers l'arrière du moteur qui, par réaction, d'où le terme de moteur à réaction engendre le déplacement de l'avion. [53]

Le turboréacteur fonctionne sur le principe des **turbines à gaz** (voir Figure B.1). A l'admission, l'air est aspiré par la soufflante (aussi appelé fan) puis comprimé via un compresseur. Du kérosène est ensuite injecté puis mélangé avec l'air au niveau de la chambre de combustion puis enflammé, ce qui permet de fortement dilater les gaz. Ces derniers s'échappent du turboréacteur par la tuyère qui, en raison de sa section convergente, augmente la vitesse de l'air (suivant l'effet venturi). L'air passe au préalable par une turbine permettant d'entraîner le compresseur et les accessoires nécessaires au fonctionnement du réacteur ; le mouvement est auto-entretenu tant qu'il y a injection de carburant.



**Figure B.1** Schéma en coupe d'un turboréacteur illustrant son principe de fonctionnement [54]

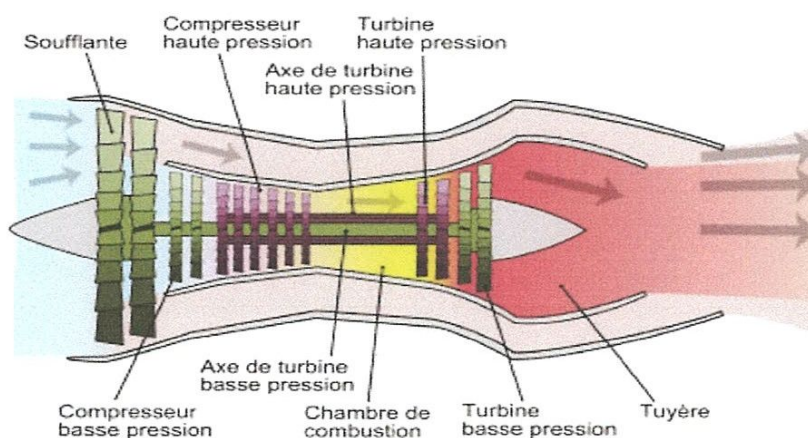
Le **turboréacteur** est une **turbomachine** produisant une poussée par réaction, Les premiers avions à réaction construits en série furent des chasseurs qui furent utilisées pendant la seconde guerre mondiale. Après guerre les turboréacteurs et turbo propulseurs se généralisèrent, aussi bien dans l'aviation militaire que civile.

Les turboréacteurs aujourd'hui sont des machines d'une extrême complexité. Le développement d'un nouveau moteur demande des moyens humains, technologiques et financiers considérables que seules quelques rares entreprises possèdent dans le monde. Si le rendement et

la fiabilité de ces moteurs se sont considérablement améliorés depuis leur naissance, est très importante et représente en général, pour un avion civil, le tiers total de l'appareil. [53][54]

Un turboréacteur peut être mono-, double- ou triple-corps. On appelle **corps** un **ensemble compresseur-turbine** accouplés sur un même arbre et tournant donc à la même vitesse. Pour accroître l'efficacité du turboréacteur, le compresseur est désormais divisé en deux parties successives cinématiquement indépendantes : une à basse pression et une à haute pression, couplées respectivement à une turbine basse et haute pression. On parle alors de turboréacteurs double corps ou double attelage (voir Figure B.2).

Les turboréacteurs font aussi appel à la technologie double-flux (voir Figure B.2). Contrairement aux réacteurs simple-flux qui sont bruyants et atteignent leur meilleur rendement pour des vitesses au delà de Mach 1, les réacteurs double-flux sont bien plus économiques. Le premier étage du compresseur basse pression des moteurs double-flux est la soufflante (ou « **fan** » en anglais). Les dimensions de la soufflante sont bien plus importantes que les étages suivants pour aspirer de grandes quantités d'air. Celle-ci comprime un flux qui va être divisé en deux parties : le flux primaire et le flux secondaire. Le flux primaire (ou flux chaud) est celui qui traverse l'ensemble des étages de compression et haute pression. Le flux secondaire (ou flux froid) contourne le moteur. L'essentiel de la poussée (80%) est fournit par le flux secondaire.



**Figure B.2 – Représentation simplifiée d'un turboréacteur civil double corps et Double flux.[53]**

Une turbomachine est composée de plusieurs éléments principaux. De l'avant vers l'arrière, ce sont :

- A. Le compresseur
- B. La chambre de combustion,
- C. Les turbines
- D. la Tuyère

## **A. Les compresseurs**

L'air extérieur est d'abord aspiré dans le compresseur, qui peut être de deux sortes, centrifuge ou axial. Les compresseurs axiaux, que l'air traverse en ligne à peu près droite, sont faits d'une succession de roues à aubes. Celles-ci se présentent comme des tambours dont la périphérie est plantée d'une multitude d'aubes parfois guère plus grandes qu'un ticket de métro. Ces roues tournent à grande vitesse et sont appelées rotors. Entre ces rotors sur l'axe du réacteur sont attachées des couronnes d'aubes fixes appelées stators, elles ont pour but de redresser l'écoulement d'air dévié par son passage dans les rotors. Chaque couple rotor et stator du compresseur constitue un « étage de compression ». [54]

Il existe plusieurs sortes de compresseurs axiaux : le compresseur à simple corps où le compresseur ne forme qu'un bloc ; le compresseur à double corps où le compresseur est partagé en deux groupes : groupe basse pression à l'avant et haute pression en arrière du précédent. Il existe enfin des compresseurs à triple corps sur certains réacteurs à double flux. La multiplication des corps de compresseur est destinée à apporter plus de souplesse au fonctionnement des turboréacteurs.

La compression de l'air augmente sa température et les compresseurs doivent supporter des écarts de température élevés. L'air extérieur qui entre dans le réacteur de 12 000 m d'altitude est à environ  $-50^{\circ}\text{C}$ , lorsqu'il sort du compresseur, sa température est environ  $300$  à  $500^{\circ}\text{C}$ . Les aubes de compresseur sont donc fabriquées dans des alliages spéciaux en fonderie ou par matriçage avec un soin qui surprend, car la moindre petite impureté dans le métal peut provoquer une rupture sous les colossaux efforts subis lors de la rotation. La demi-douzaine d'opérations de matriçage nécessaires pour transformer une barre de titane en aube ne dure que quelques minutes. Pourtant, il faut six mois pour fabriquer une par une la quarantaine d'aubes en titane d'une soufflante de réacteur à double flux, à cause des longues opérations de contrôle et de traitement de surface du métal.

## **B. La chambre de combustion**

Placée en aval du compresseur, la chambre de combustion peut avoir plusieurs aspects : tubulaire lorsqu'elle est constituée d'un ensemble de tubes disposés en couronne au milieu du réacteur, ou annulaire. Les chambres de combustion sont généralement annulaires. Elles entourent les moteurs comme un anneau creux, entre le compresseur et la turbine, les arbres de liaison passant en son centre. La chambre annulaire est, en principe, plus efficace qu'une chambre tubulaire ; elle est en tout cas plus légère et plus simple. Le carburant utilisé dans les

turbomachines est le kérosène, un produit pétrolier moins raffiné que le gasoil. Il est amené à la chambre de combustion par des pompes sous forte pression, puis vaporisé par les brûleurs. Chaque brûleur est conçu avec un très grand soin pour diffuser le carburant en gouttes aussi fines que possible. Plus les gouttes sont petites, plus la combustion est bonne, plus la consommation est réduite et plus la longueur de la chambre de combustion est petite. Si les gouttelettes sont trop grosses, il faut une fraction de seconde supplémentaire pour les consumer. Cela signifie qu'il faut allonger la chambre de quelques centimètres, donc allonger les arbres de la turbine, donc augmenter la masse du moteur avec peut-être d'autres inconvénients. Les gouttelettes qui ne sont pas brûlées peuvent encore endommager les aubes de la turbine en aval de la chambre de combustion. Les chambres de combustion d'aujourd'hui ne mesurent que quelques décimètres de long et quelques centimètres de haut. Néanmoins, cela suffit à chauffer jusqu'à 2000°C l'air qui sort du compresseur.[54]

Pour améliorer la combustion, le flux d'air comprimé qui se déverse dans la chambre de combustion est également ralenti au moyen de chicanes, bien que sa vitesse reste encore de l'ordre de quelques dizaines de mètres par seconde. Ces chicanes ont aussi pour rôle de brasser le gaz brûlant pour homogénéiser sa température et éviter les points chauds qui endommageraient les aubes de la turbine.

En quittant la chambre de combustion, les gaz chauds sont accélérés en passant dans l'étranglement ou convergent du diffuseur qui débouche sur un rang de stators, puis sur la turbine.

## **C. La Turbine**

La turbine a pour fonction de transformer l'énergie de pression des gaz en sortie de la chambre de combustion en énergie cinétique, puis en énergie mécanique afin d'entraîner le FAN ou soufflante, le compresseur et les différents équipements de servitude. L'énergie restante à la sortie de la turbine participe à la poussée du réacteur.[54]

### **i. Principe de la turbine**

La détente des gaz dans la turbine est obtenue par l'accélération du fluide dans un convergent et une partie de l'énergie cinétique récupérée est transformée en travail moteur.( la relation entre la vitesse, la pression et la masse volumique du fluide).[53]



## ii. Descriptif et Fonctionnement de la turbine

En général les turbines rencontrées sur turboréacteur sont de type axial; l'écoulement est donc parallèle à l'axe du moteur. L'étage de détente d'une turbine se compose d'une grille d'aubes fixes appelée [**Distributeur**] et d'une grille d'aubes mobiles appelée [**Roue**]. Lorsque la puissance à prélever dépasse les possibilités d'un seul étage, on utilise des turbines à plusieurs étages.

### a) Rôle du distributeur

Les gaz à la sortie de la chambre de combustion pénètrent dans le distributeur qui les dévie d'un angle  $\alpha$  dans la direction tangentielle de la [Roue]. Il transforme leur énergie de pression en énergie cinétique par effet convergent. L'accélération de l'écoulement ainsi obtenue s'accompagne d'une diminution de pression et de température.

### b) Rôle de la Roue

Les gaz à la sortie du distributeur pénètrent dans la [Roue] mobile avec un angle d'incidence qui entraîne une distribution inégale des pressions sur l'intrados et l'extrados des aubes. La pression exercée par le fluide sur l'intrados est supérieure à celle exercée sur l'extrados et cela crée une résultante aérodynamique qui met la [Roue] mobile en mouvement réalisant la transformation d'une partie de l'énergie cinétique en énergie mécanique.[53]

Pour augmenter l'énergie mécanique utile il faut :

- Soit augmenter la vitesse du fluide
- Soit augmenter l'angle d'incidence  $\alpha$
- Soit agir sur les deux à la fois

## iii. Différents types de turbines

Dans les turboréacteurs double-corps, la turbine est constituée d'un ou plusieurs étages (stator-rotor) à *haute pression* (HP) et d'un second à *basse pression*. La turbine HP, dont les ailettes sont soumises au flux des gaz de combustion les plus chauds, est la pièce la plus compliquée sur les plans de la tenue des matériaux et de l'aérodynamique. Il existe deux types de turbine, l'une à action et l'autre à réaction.

Dans une turbine à action (solution privilégiée pour les turbopropulseurs et les turbomoteurs), le travail de détente (quasi complet) ne s'effectue que dans le stator. L'énergie cinétique ainsi engendrée sera récupérée sous forme d'énergie mécanique afin d'entraîner le compresseur, le réducteur, l'hélice ou la voilure tournante suivant le cas, ainsi que les accessoires nécessaires au moteur.

Dans une turbine à réaction, la détente s'effectue à la fois dans le stator et dans le rotor. De plus, dans ce type de turbine, seule une "faible" partie de l'énergie des gaz est détendue afin de la récupérer sous forme d'énergie mécanique, étant donné que l'ensemble turbine-compresseur (ajouter à cela la soufflante) est moins "lourd" à entraîner qu'un ensemble avec hélice. Le restant d'énergie sera récupéré au niveau de la tuyère, sous forme d'énergie cinétique, afin de créer la poussée. [53]

#### **D. La Tuyère**

La tuyère succède à la turbine. Les gaz provenant de la chambre de combustion s'y refroidissent et s'y détendent considérablement en accélérant : leur pression et leur température sont transformées en énergie cinétique.

Cette transformation d'énergie produit la poussée utile. Il est donc important qu'elle soit aussi complète que possible. Elle serait parfaite dans un réacteur idéal d'où les gaz seraient éjectés à la température de l'air ambiant, toute leur chaleur ayant été transformée en vitesse dans la tuyère.[54]

La vitesse d'éjection des gaz est proportionnelle à la différence entre leur pression dans le moteur et la pression atmosphérique. Cet écart est d'autant plus grand que l'altitude est élevée, à condition que la pression à l'intérieur du moteur-qui dépend de la température du flux-puisse être maintenue en altitude.

La tuyère la plus simple n'est autre qu'un tuyau d'un diamètre approprié, appelé aussi veine de sortie. Autrefois, de petites variations des dimensions de l'ouverture permettaient d'accorder la tuyère avec le fonctionnement du moteur. En fait, la réduction de l'ouverture de la tuyère provoque un accroissement de la vitesse d'éjection des gaz et donc de la poussée, mais jusqu'à une valeur limite au delà de laquelle la température s'élève à l'intérieur du moteur. Les turbo réacteurs allemands des années 40 et 50 possédaient à cet effet des carénages mobiles en forme de cône à l'intérieur de la tuyère ; les réacteurs modernes n'ont plus de tuyères à section variable, sauf s'ils sont pourvus de la réchauffe.[53] [54]

❖ Lorsque l'air traverse ces divers éléments, sa pression, sa température et sa vitesse varient. Ces variations produisent les forces dont la résultante est la force de propulsion de l'avion.

Jusqu'à ces dernières décennies l'hélice avait le monopole de la propulsion des avions mais les phénomènes soniques en limitant l'utilisation à une vitesse inférieure à 720 km/h, soit 200 m/s, il a fallu innover et la deuxième guerre mondiale a accéléré le développement d'un nouveau système de propulsion sans changer le principe initial fondé sur le principe d'action-réaction en milieu élastique.

Ce nouveau système peut être considéré comme un tube dans lequel l'air entre à la vitesse  $V_0$  et en sort à la vitesse  $V_1$  plus grande que  $V_0$ . De ce point de vue le réacteur ne se distingue pas des hélices sauf par le fait que, lors de la traversée du réacteur, l'air est comprimé et voit donc sa température croître significativement avant d'arriver dans la chambre de combustion. Une deuxième différence avec l'hélice est que l'air est guidé par des parois et cela rend possible l'éjection à des vitesses supersoniques. La dernière différence fondamentale avec l'hélice, qui n'apporte à l'air propulsif une énergie de vitesse que par l'action mécanique de ses pales, tient au fait que dans le réacteur la vitesse d'éjection est obtenue principalement (pour un simple flux) par un accroissement brusque de pression obtenu par la combustion d'un carburant dans l'air propulsif.

Pour une hélice, l'air moteur (lié à la combustion) et l'air propulsif sont dissociés alors que pour un réacteur l'air lié à la combustion et l'air propulsif sont partiellement (double flux) ou totalement confondus (simple flux). Malgré cela la vitesse d'éjection des réacteurs comme celle des hélices possède une limite dite « limite métallurgique » que l'on peut situer dans les années 1980 à 3 500 km/h. [53] [54]

## II. Principe de Fonctionnement du turboréacteur

Un turboréacteur fonctionne comme le propulseur à hélice sur le principe d'action-réaction et fournit une poussée qui résulte :

1. De la différence de quantité de mouvement entre l'air admis et les gaz éjectés par unité de temps.
2. De la différence de pression entre la sortie de la tuyère et l'infini amont.

Cette poussée engendre en réaction le déplacement vers l'avant du moteur (d'où le terme moteur à réaction), donc du véhicule sur lequel il est fixé.

Le turboréacteur produit une poussée par la détente de gaz chauds et à haute pression dans sa tuyère d'éjection. Ces gaz sont produits par une chambre de combustion, un carburant (en général du kérosène) avec de l'air comprimé issu d'un compresseur. Ce dernier aspire l'air extérieur par une manche à air et est en général (mais pas forcément) par une turbine actionnée par les gaz sortants de la chambre de combustion, récupérant ainsi une petite partie de leur énergie. Successivement, on trouve donc en général la manche à air, le compresseur, la chambre de combustion, la turbine et la tuyère d'éjection.[53] [54]

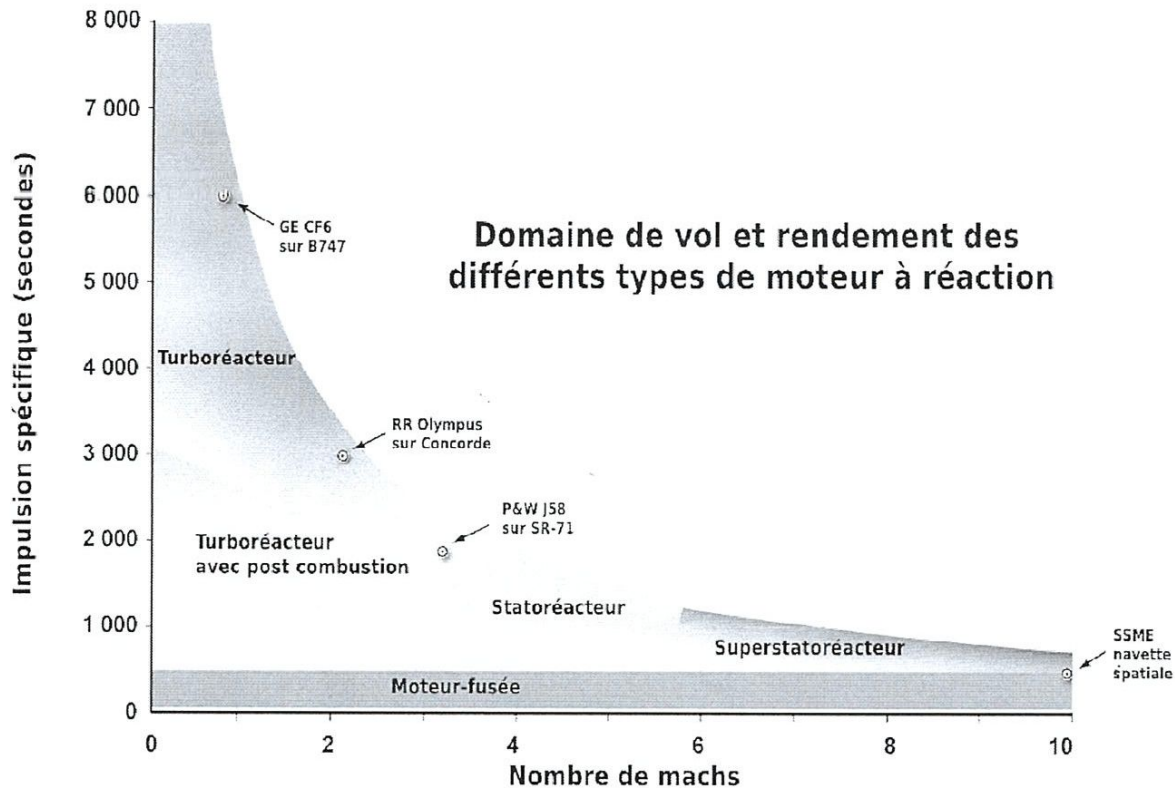


Figure B.3 Domaine de vol (vitesse en mach) et rendement (Impulsion spécifique) des différents types de moteurs à réaction. [54]

### III. Cycle Thermodynamique du Turboréacteur

Le Turboréacteur est un moteur :

- Thermique
- Aérobie
- constitué autour d'une Turbomachine à Gaz

Le cycle Thermodynamique du Turboréacteur comprend 4 stades où l'air subit des modifications physiques ou chimiques :

1. Aspiration
2. Compression
3. Combustion
4. Détente / Ejection

Ces quatre phases du cycle thermodynamique s'effectuent simultanément à des endroits différents par opposition aux quatre temps du moteur à explosion qui se réalisent dans le même cylindre. [53] [54]

Pour assurer la réalisation de ce cycle le Turboréacteur (mono flux) est constitué de deux parties :

- Un ensemble Compresseur-Foyer-Turbine qui transforme l'énergie chimique du carburant en énergie potentielle de gaz comprimés et chauds
- Une tuyère d'éjection qui transforme en vitesse l'énergie de pression fournie par le générateur de gaz

#### **IV. Poussée du Turboréacteur**

Le Turboréacteur comme tous les moteurs à réaction directe est caractérisé par sa Poussée qui résulte principalement de deux causes[54]:

1. La différence de quantité de mouvement entre l'air admis et les gaz éjectés pendant l'unité de temps
2. La force résultant de la différence de pression existant entre la sortie de la tuyère et l'infini amont

La Poussée d'un Turboréacteur est donc :

1. Proportionnelle, en négligeant la masse de carburant injectée, au débit-masse d'air le traversant
2. Une fonction croissante de la vitesse d'éjection des gaz en sortie de tuyère

## V. Rendement propulsif

Dans un turboréacteur l'ensemble compresseur;chambre de combustion;turbine fournit des gaz comprimés et chauds qui libèrent leur énergie dans le but d'assurer la propulsion de l'avion. Il convient de libérer cette énergie avec le maximum d'efficacité en consommant le moins de carburant possible. Il est nécessaire d'optimiser alors le rendement propulsif.

D'une manière générale le rendement propulsif diminue lorsque croît la vitesse d'éjection ce qui nous amène la conclusion que pour les vitesses subsonique il faut ralentir la vitesse d'éjection et augmenter la masse de fluide éjectée afin d'obtenir la poussée nécessaire. Cela étant il a fallu trouver des solutions peu gourmandes en carburant et aujourd'hui la technique du double flux à fort taux de dilution est couramment employée en aviation commerciale.[53]

Le principe général en est le suivant :

- On utilise la température maximale permise par la métallurgie
- On augmente le taux de compression pour valoriser au maximum cette température afin de l'obtenir avec moins de carburant (optimisation du rendement thermique)
- On fait travailler les gaz chauds dans une turbine avant leur éjection pour mettre en vitesse un débit d'air frais qui participe à la propulsion

Autrement dit le fluide servant à la propulsion se scinde en deux flux :

- Le flux primaire ou flux chaud qui a suivi le processus thermodynamique
- Le flux secondaire ou flux froid qui ne reçoit que de l'énergie mécanique

Le rendement propulsif du moteur est augmenté dans des proportions importantes pour des valeurs de dilution voisine de 5 et les vitesses d'éjection sont telles que le flux froid produit 80% de la poussée totale.

## VI. Domaine d'utilisation des turboréacteurs

Les turboréacteurs sont utilisés sur tous les avions civils moyen et gros porteurs, car ils sont les seuls à pouvoir atteindre des vitesses transsoniques (entre mach 0,8 et mach1) de manière économique. Les turbopropulseurs équipent en général des avions moins rapides (autour de 500Km/h) et de plus faible capacité (moins de 80 passagers). Seuls les petits avions de tourisme et les ULM sont encore équipés de moteurs à pistons. Dans l'aviation militaire, l'utilisation du turboréacteur, qui a permis d'atteindre et de dépasser le mur du son, s'est généralisée. Les turbopropulseurs équipent des avions d'entraînement et quelques appareils de transport logistique peu rapides mais capable de se passer de vrais terrains d'aviation.[54]