

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE  
SCIENTIFIQUE

*Université de Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi - Bordj Bou Arreridj*

*Faculté des Sciences et de la technologie*

*Département électromécanique*

# *Mémoire*

*Présenté pour obtenir*

**LE DIPLOME DE MASTER**

**FILIERE : électrotechnique**

**Spécialité : commande électrique**

Par

- **Benzina imad**
- **Talbi issam**

*Intitulé*

*Surveillance d'un moteur à courant continu à base de redondance analytique*

*Soutenu le : 03 juillet 2022*

*Devant le Jury composé de :*

<i>Nom &amp; Prénom</i>	<i>Grade</i>	<i>Qualité</i>	<i>Etablissement</i>
<b>M.REFFAS Abderrahim</b>	<b>MCB</b>	<b>Président</b>	<b>Univ-BBA</b>
<b>M.S.MEDJMADJ Slimane</b>	<b>MCA</b>	<b>Encadreur</b>	<b>Univ-BBA</b>
<b>M.KHENFER Riadh</b>	<b>MCA</b>	<b>Examineur</b>	<b>Univ-BBA</b>
<b>M.SAKHARA saadi</b>	<b>MCB</b>	<b>Examineur</b>	<b>Univ-BBA</b>

Année universitaire 2021/2022

## Dédicace

Merci à mes parents pour leurs encouragements et que Dieu les protège et les bénisse dans leur vie et leur accorde santé et bonheur

A mes frères et sœurs.

A mes collègues et amis

A tous mes chers et mes bien-aimés

## Remerciements

Tout d'abord, nous remercions Dieu Tout-Puissant (ALLAH) qui nous a donné la santé, la volonté, le courage et la patience.

Nous adressons nos remerciements les plus sincères à M. Medjmadj Slimane, qui d'une part a soulevé ce sujet et dont les conseils constants, ses conseils et ses connaissances ont contribué et facilité la réalisation de cet mémoire, je suis honoré que nous ayons été honorés par lui Fraude, et pour sa contribution à notre formation, nous lui vouons un profond respect.

Nous sommes très reconnaissants à tous les professeurs qui ont contribué à notre formation grâce à l'Université, et à ceux qui ont contribué à notre formation en électrotechnique.

N'oublions pas d'exprimer nos plus sincères remerciements à tous ceux qui nous ont soutenus de près ou de loin pour rendre ce mémoire possible.

## SOMMAIRE

Introduction générale.....	1
Chapitre 01 : Généralité sur la surveillance des systèmes industriels	
1.1. Introduction.....	2
1.2. Terminologies et concepts.....	2
1.3. Les différentes étapes de diagnostic.....	4
1.3.1. Détection.....	4
1.3.2. Localisation.....	4
1.3.3. Identification.....	5
1.4. Classification des méthodes de surveillance :.....	5
1.4.1. Méthodes sans modèle analytique.....	6
1.4.2.1. Analyse fréquentielle.....	6
1.4.3.2. Redondance matérielle.....	7
1.4.4.3. Capteur spécifique.....	7
1.4.5.4. Réseaux de neurones artificiels.....	7
1.4.6.5. Reconnaissance de formes.....	8
1.4.2. Méthodes basées sur les modèles analytiques.....	9
1.4.2.1. Espace de parité.....	9
1.4.2.2. Estimation paramétrique.....	10
1.4.2.3. Observateurs .....	10
1.4.2.4. Bond de graphe.....	10
1.4.2.5. Redondance analytique.....	11
1.5. Conclusion .....	11
Chapitre 2 : Description modélisation et simulation du moteur a courant continu	
2.1 .introduction.....	13
2.2. Généralité sur le moteur à courant continu.....	14
2.2.1. Définition.....	14

2.2.2. Constitution d'un moteur à courant continu.....	14
2.2.3. Principe de fonctionnement.....	18
2.3. Différents modes d'excitation .....	20
2.3.1. Moteur à excitation indépendante .....	20
2.3.2. Excitation .....	21
2.3.3. Excitation composée.....	21
2.3.4. Excitation série.....	22
2.4. Modélisation du moteur à courant Continu à excitation série.....	23
2.5. Conclusion.....	27
Chapitre 3 : surveillance d'un moteur à courant continu à base d'une redondance analytique	
3.1. Introduction.....	28
3.2. Surveillance à base de redondance analytique.....	28
3.2.1. Espace de parité.....	30
3.3. Application sur moteur à courant continu.....	31
3.4. Résultats de simulation.....	33
3.4.1. Fonctionnement sans défaut (Sain).....	33
3.4. 2. Fonctionnement avec défaut.....	36
3.5. Conclusion.....	40
Conclusion générale .....	41

## Liste des figures

Figure. 1.1. Ordonnancement des notions.....	4
Figure. 1.2. Les différentes étapes de diagnostic.....	4
Figure.1 .3. Méthodes de diagnostic.....	6
Figure.1. 4. Comprendre les réseaux de neurones.....	8
Figure.1. 5. Principe de fonctionnement des méthodes à base du modèle analytiques.....	9
Figure 1.6. Schéma basée sur l'observateur pour la détection des défauts du moteur à courant continu.....	11
Figure.2.1.Fonctionnement de la machine.....	14
Figure .2.2. Constitution de moteur à courant continu.....	14
Figure .2.3.Carcasse de moteur à courant continu.....	15
Figure.2.4.L'inducteur de moteur à courant continu.....	15
Figure.2.5.rotor de machine a courant continue.....	16
Figure.2.6.Collecteur.....	16
Figure.2. 7 .Pôle principal.....	17
Figure.2.8. Pôle auxiliaire.....	17
Figure 2.9. Excitation séparée.....	20
Figure .2.10. Excitation shunt.....	21
Figure.2.11. Excitation série.....	22
Figure.2.12. Excitation série .....	23
Figure.2.13. Schéma bloc de mcc à Excitation série.....	24
Figure. 2.14. Simulation Excitation série (à vide).....	25
Figure.2. 15. Simulation Excitation série en charge.....	26
Figure .3.1. Redondance analytique.....	29
Figure.3.2.schema bloc des relations de redondance analytique.....	33
Figure .3.3. Evolution des residues en fonctionnement .....	35
Figure.3.4. Défaut capture de vitesse.....	37

Figure.3.5. Défaut capture de courant.....39

## Introduction générale

La commande de sécurité occupe une place importante dans les systèmes industriels automatisés. Malheureusement, cette fiabilité peut être entravée par des dysfonctionnements du système qui sont une conséquence de la complexité de celui-ci, notamment dans le domaine du contrôle. Cela oblige les industriels à se doter de techniques de surveillance efficaces, dotées d'un outil de diagnostic adapté pour détecter, identifier, voir localiser et isoler tout défaut responsable d'un dysfonctionnement des systèmes pour empêcher sa propagation et de limiter les conséquences engendrées par ce défaut et d'améliorer la sécurité des personnels, assurant ainsi une fiabilité et une disponibilité accrues de leurs outils de production. A cet effet et pour assurer la surveillance en ligne de ces procédés des algorithmes destinés au diagnostic des défauts a été développés au cours des trois dernières décennies. La littérature montre une grande diversité des méthodes des différents points de vue. Les méthodes analytiques occupent une place importante, leur utilisation, notamment dans le cadre d'applications critiques (systèmes énergétiques, systèmes de transport, industrie lourde), s'est considérablement développée. Ils font appel à une connaissance du système explicitement formulée par un modèle analytique. Le principe de base repose sur la collecte d'informations, par le biais de capteurs, sur le processus à surveiller. La comparaison entre le comportement réel du procédé et le comportement prédit par le modèle fournit des informations contenues dans un ensemble de conception aux indicateurs de défaut (résidus). L'analyse (temporelle ou fréquentielle) de ces signaux permet de détecter et éventuellement d'interpréter tout comportement anormal du système pour en localiser l'origine. Nous proposons d'exploiter ces techniques, et en particulier celles liées aux modèles linéaires, en les adaptant aux applications du génie électrique. En effet, un système électrotechnique présente deux caractéristiques intéressantes : d'une part, il peut être décomposé en plusieurs sous-systèmes interconnectés et, d'autre part, les modèles de ce sous-système sont linéaires, sinon ils peuvent l'être. La majorité des systèmes industriels et en particulier les systèmes électrotechniques, sont des systèmes régulés en boucle fermée, à cet effet et dans le cadre de ce mémoire on s'intéresse au diagnostic des systèmes en boucle fermée. Mais dans ce cas la détection et la localisation des défauts semblent plus délicates car l'objectif du contrôle est de minimiser voire d'annuler les effets des perturbations et des défauts, les masquant ainsi. Or l'objectif du diagnostic est justement de mettre en évidence ces défauts. .

---

# Généralité sur la surveillance des systèmes industriels

---

## 1.1. Introduction

Dans le passé, les systèmes de production automatisés ont aidé les opérateurs à contrôler le processus pour améliorer la qualité du produit final, la sécurité et l'efficacité du secteur industrielle. L'objet des études de surveillance industrielle couvre plusieurs aspects, entre autres : la continuité de l'exploitation de l'installation industrielle dans les conditions requises de performance et de qualité. La gestion optimale de la maintenance s'inscrit dans cette thématique car le système de supervision est en charge de la mission de diagnostic de panne dans un état plus avancé que l'apparition de pannes partielles ou totales du procédé à surveiller.

En d'autres termes, la surveillance est une solution complète pour la gestion de l'installation industrielle, mais l'intégration de diverses fonctions dans un seul système améliore non seulement la productivité et la qualité, mais contribue également à la compliquer et augmente le risque de panne des équipements et met en danger l'environnement. Sécurité des équipements, les gens et l'environnement.

Ce chapitre comporte une partie théorique qui englobe des définitions de quelques concepts, les différentes étapes à suivre pour la surveillance, ainsi que les différentes méthodes utilisées des systèmes physiques.

## 1.2. Terminologies et concepts

La plus grande difficulté rencontrée pour décrire les concepts et la terminologie utilisés dans le monde de la maintenance vient du fait que ce problème peut être abordé de différentes manières selon l'origine et la formation des intervenants. De plus, les différences sont très subtiles et subjectives.

## Composant

Un composant est un organe technologique représentant une partie du processus industriel (pompe, vanne, conduite, ..) [1].

## Erreur

Une erreur est définie comme l'écart entre une valeur mesurée ou estimée d'une variable et la vraie valeur spécifiée par le modèle d'un capteur jugé théoriquement correcte [2].

## Dégradation

Une dégradation est l'état d'un composant présentant une perte de performances dans une ou plusieurs de ses fonctions pour lesquelles est conçu.

## Défaut

Le terme défaut est généralement défini comme une imperfection physique liée à la conception ou à la mise en œuvre du dispositif. Un défaut peut rester caché pendant un certain temps avant de donner lieu à une défaillance [3]. Il existe trois différences défaut dépendant du temps

*Défaut brusque* : défaut dont l'apparition est brutale, la durée entre le moment où le système fonctionne normale

*Défaut progressif* : défaut dont l'apparition est graduelle Avec le temps. Généralement caractéristique d'usures de composants.

*Défaut intermittent* : défaut que apparaît puis disparaît puis Réapparaît puis disparaît de, et ainsi de suite sans nécessairement d'actions correctrices.

## Défaillance

Une défaillance est une modification indésirable du système se traduisant par une variation d'un ou de plusieurs paramètres par rapport à une valeur de référence. Les défaillances peuvent provenir des actionneurs, des capteurs, des contrôleurs ou du processus lui-même.

## Panne

Un appareil est dit en panne lorsqu'il ne peut pas remplir sa fonction, lorsqu'une panne survient [4]. La diversité des activités de diagnostic fait que les termes pannes et défauts sont assez fréquemment utilisés, de sorte que la différence entre les concepts de panne, défaut et panne est parfois très subtile.

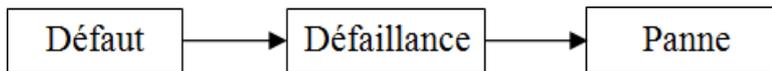


Figure. 1.1. Ordonnancement des notions

### Résidu

Le résidu est un indicateur de faute qui exprime la différence entre les informations disponibles et les informations fournies par le modèle ( qui décrit le fonctionnement du processus) [5].

### Supervision

La supervision consiste à conduire une installation industrielle aux moyens d'écrans de supervision placés aux postes de pilotage, rafraîchis à chaque instant par les informations provenant des automatismes et des capteurs intelligents

## 1.3. Les différentes étapes de diagnostic

Le terme diagnostic correspond à la caractérisation du défaut, pour effectuer ce dernier il faut passer par un certain nombre d'étapes qui s'enchaînent.

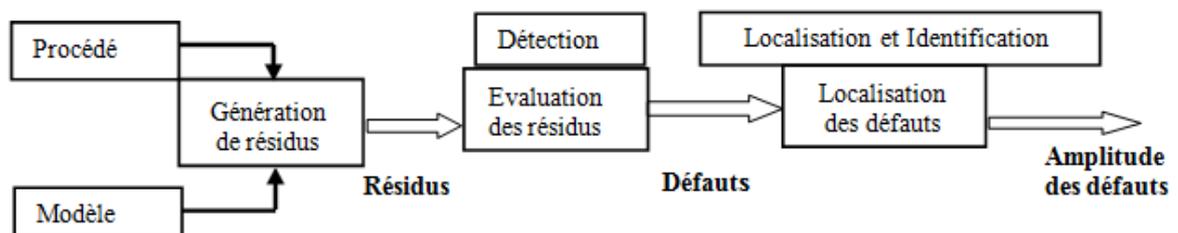


Figure. 1.2. Les différentes étapes de diagnostic

#### 1.3.1. Détection

La fonction principale de cette étape est de déterminer si le système fonctionne normalement. En pratique, le problème est beaucoup plus compliqué, car le système à surveiller et la quantité mesurée sont toujours soumis à des perturbations non mesurables, de sorte que le modèle est généralement imparfait, nous ne pouvons donc pas tirer de conclusions sur la valeur non nulle du résidu. Pour cela, nous utilisons des tests statistiques, ou de manière plus simple grâce à des méthodes de seuillage [6].

#### 1.3.2. Localisation

Effectuez cette étape immédiatement après avoir détecté le défaut. A partir des résidus non nuls détectés statiquement en phase de détection, le défaut doit être localisé, c'est-à-dire que l'élément de défaut est trouvé. On appelle signature de défaut l'effet de ce défaut sur un ou

plusieurs résidus, Si nous avons une signature de défaut, nous pouvons renvoyer la raison (élément défectueux) à partir des effets (résidu non nul).

### 1.3.3. Identification

L'objectif de l'identification est de caractériser plus finement le défaut et déterminer les causes qui ont engendré la défaillance constatée. [7]

## 1.4. Classification des méthodes de surveillance

Dans ce paragraphe, on présente différentes méthodes utilisées en surveillance des systèmes physiques. Le domaine était très vaste, des choix arbitraires ont été faits. Le but n'est donc pas de faire une synthèse exhaustive de l'existant, mais de montrer la richesse des possibilités qui s'offrent au concepteur de système de diagnostic. En effet, différents types d'algorithmes de détection dédiés aux systèmes physiques ont été conçus par les chercheurs de la communauté de l'automatique. Néanmoins, on s'est astreint à balayer le large spectre des techniques actuellement utilisées en surveillance, à savoir [3]:

- 1 Méthodes sans modèle analytique.
- 2 Méthodes basées sur les modèles analytiques.

Actuellement, on s'oriente vers des systèmes de surveillance mettant en œuvres différentes techniques de détection. En effet, chacune d'entre elles est plus ou moins bien adaptée pour appréhender tel ou tel type de défaut. la figure ci-dessous (figure.1.3)

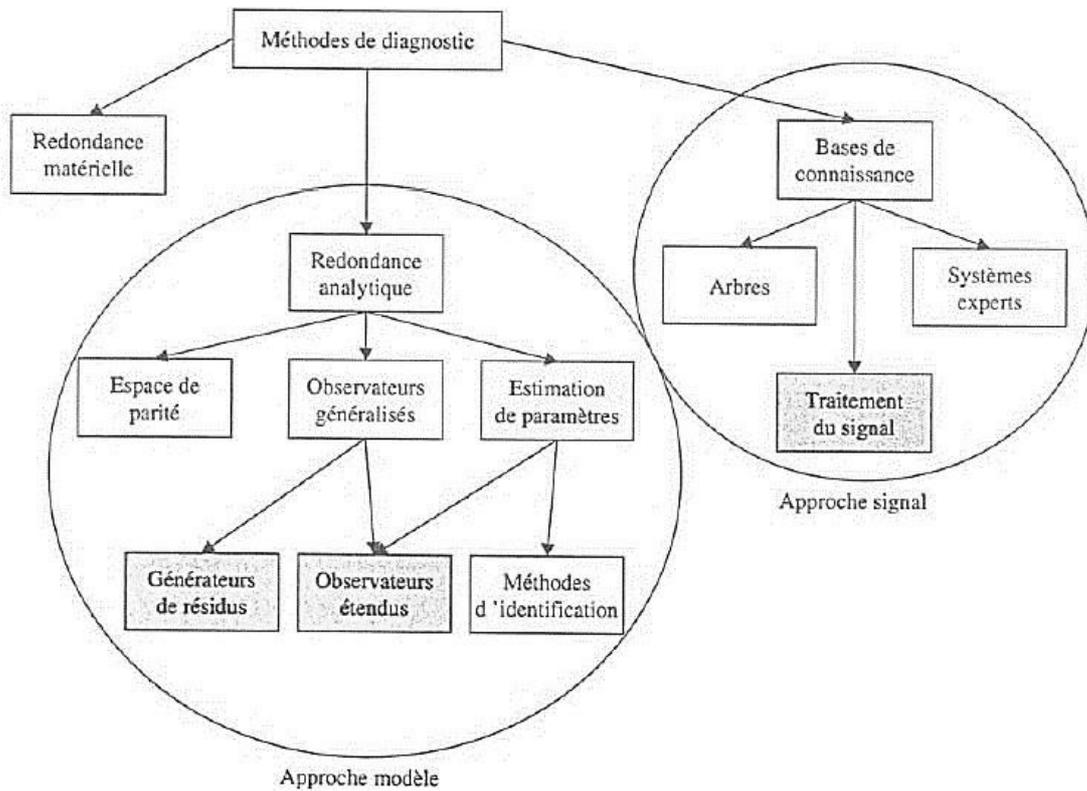


Figure.1 .3. Méthodes de diagnostic

#### 1.4.1. Méthodes sans modèle analytique

Les méthodes sans modèles analytique reposent sur l'approche signal : rechercher dans les signaux mesurés les symptômes de défaut. L'avantage de ces méthodes : la possibilité de n'utiliser que le modèle qualitatif donc aucun besoin des grandeurs numériques des paramètres ni des connaissances profondes sur la structure de système. L'inconvénient de ces méthodes : Il n'est pas aisé de déterminer les valeurs limites inférieures et supérieures des déviations. D'autre part un problème combinatoire peut apparaître lors des procédures d'inférences pour les systèmes complexes.

##### 1.4.1.1. Analyse fréquentielle

La première méthode de traitement du signal est basée sur l'analyse fréquentielle (transformée de Fourier). Il est largement utilisé pour détecter des phénomènes périodiques, par exemple dans l'analyse des vibrations. Le contenu spectral du signal est utilisé pour détecter les défauts du moteur, tels que les barres cassées sur le rotor du moteur asynchrone, la dégradation des roulements, le décalage et les courts-circuits des enroulements. Les recherches actuelles portent principalement sur la méthode d'adaptation à la représentation du signal non

stationnaire : temps fréquence, échelle de temps, qui est due au développement d'applications à vitesse variable.

Les signaux ici sont d'abord analysés dans l'état de fonctionnement normal, puis tout écart par rapport aux propriétés de fréquence du signal est lié à une panne (le problème est que la modification du point de consigne modifie les propriétés de fréquence et ce n'est pas un défaut). L'analyse spectrale des signaux des capteurs permet de déterminer très efficacement l'état de l'installation surveillé. Cette méthode se distingue par une application pratique relativement simple, mais l'inconvénient est qu'elle est quelque peu sensible au bruit de mesure lorsqu'il coïncide avec la région de fréquence pertinente. De plus, un échantillonnage fréquent est nécessaire pour renouveler le signal de départ tout en réduisant la perte de fréquence [8]-[9].

#### 1.4.1.2. Redondance matérielle

Le principe de cette méthode permet d'utiliser plusieurs ressources pour réaliser la même fonction ou la même tâche. Certaines redondances peuvent intervenir dans un processus et modifier son comportement, tandis que d'autres permettent à une ressource donnée d'obtenir la même information de plusieurs manières. La redondance matérielle ou physique est l'utilisation de plusieurs ressources. La précision elle-même dépend du nombre, de la précision et de l'emplacement sur le système. Cette approche est largement utilisée dans l'industrie car sa détection de panne à l'aide de variables d'état ou la fiabilité des équipements de contrôle est directement dépendante de la précision du reconstituteur d'état utilisé. Cette approche est affectée par le poids, la consommation d'énergie, la taille et les coûts d'achat et d'entretien. Il est donc principalement utilisé là où la continuité de service est obligatoire (espace aérien et nucléaire). [10]

#### 1.4.1.3. Capteur spécifique

Il existe des capteurs spéciaux qui peuvent également être utilisés pour nous fournir directement des signaux de détection ou pour comprendre l'état des composants. Ces capteurs spécifiques sont les capteurs les plus utilisés dans les installations industrielles, comme les capteurs de fin de course, l'état de fonctionnement du moteur ou le dépassement de seuils.

#### 1.4.1.4. Réseaux de neurones artificiels

Les réseaux de neurones artificiels (RNA) sont utilisés quand la connaissance sur le système à surveiller n'est pas suffisante et que le développement d'un modèle du procédé est impossible, l'utilisation d'un modèle dit « boîte noire » peut être envisagée. Leur application dans les

domaines de la modélisation, de la commande et du diagnostic a largement été rapportée dans la littérature. L'utilisation des RNA se fait en deux phases d'une manière générale. La première phase, la synthèse du réseau a réalisée et comprend plusieurs étapes : le choix du type de réseau, du type de neurones, du nombre de couches, des méthodes d'apprentissage. L'apprentissage permet alors, sur la base de l'optimisation d'un critère, de reproduire le comportement du système à modéliser. Il consiste en la recherche d'un jeu de paramètres (les poids) et peut s'effectuer de deux manières : supervisée (le réseau utilise les données d'entrée et de sortie du système à modéliser) et non supervisée (seules les données d'entrée du système sont fournies et l'apprentissage s'effectue par comparaison entre exemples) quand les résultats d'apprentissage obtenus par le RNA sont satisfaisants, il peut être utilisé pour la généralisation. Il s'agit ici de la deuxième phase où de nouveaux exemples qui n'ont pas été utilisés pendant l'apprentissage sont présentés au RNA pour juger de sa capacité à prédire les comportements du système modélisé [5], [10].

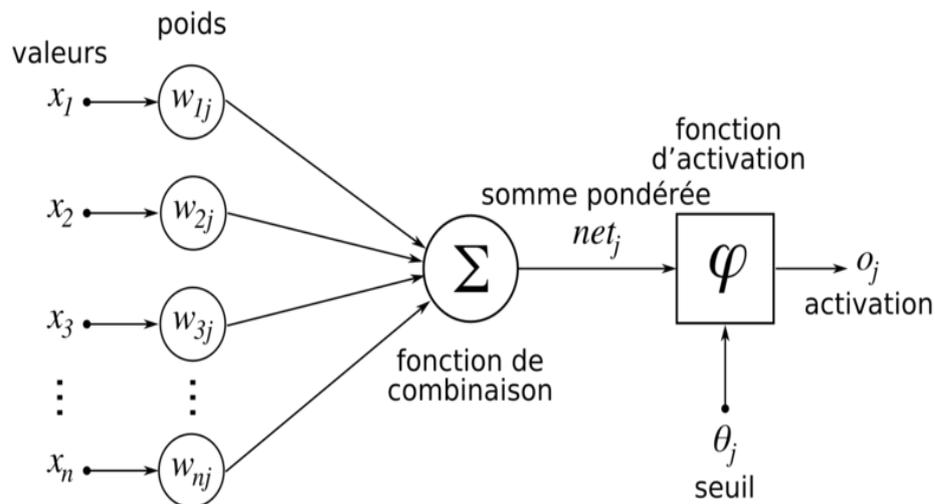


Figure.1. 4. Comprendre les réseaux de neurones

#### 1.4.1.5. Reconnaissance de formes :

Les méthodes de reconnaissance de forme regroupent toutes les méthodes permettant de classer automatiquement des objets par leur similarité avec un objet de référence. Le but de cette opération est de décider quelle forme ressemble le plus à un objet après l'avoir comparée avec lui. Pour résoudre le problème de reconnaissance de forme, nous avons besoin de : Définir précisément la classe qui prendra la décision. Cette étape est spécifique au problème posé car elle porte sur la nature des objets à classer. Sélection corrélative de jeux de caractères pour différencier les vecteurs de forme. Malheureusement, il n'existe aucun moyen systématique de choisir les paramètres les plus appropriés pour résoudre un problème donné. Par conséquent, un choix adéquat des paramètres de forme nécessite une bonne connaissance du

problème à résoudre. On note que le nombre de caractères fixe la dimension de l'espace de représentation. Ceci peut représenter une contrainte sévère dans un contexte de traitement en temps réel des objets à classer. Pour l'affectation d'une forme observée à l'une des classes présentes nous devons élaborer un classificateur. Généralement on établit Ce dernier à l'aide d'un ensemble d'apprentissage constitué de formes pour lesquelles on connaît l'appartenance aux différentes classes [11].

### 1.4.2. Méthodes basées sur les modèles analytiques

La plupart des méthodes de détection et de diagnostic en ligne reposent sur des mesures. Certaines méthodes utilisent plus de connaissances que celles qui peuvent être fournies par les seuls capteurs physiques. Une telle connaissance peut notamment provenir de la connaissance du comportement entrée/sortie du processus ou du processus qui va commander son évolution. Ces connaissances sont généralement exprimées sous la forme de modèles mathématiques. Parmi les différentes méthodes de détection utilisant des modèles mathématiques, nous chercherons principalement des espaces de parité, des observateurs et des estimations de paramètres.

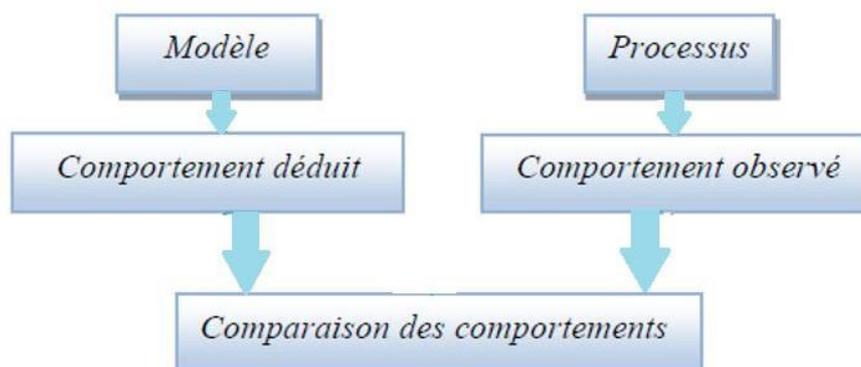


Figure.1. 5. Principe de fonctionnement des méthodes à base du modèle analytiques

#### 1.4.2.1. Espace de parité :

Le terme « parité » a été emprunté au vocabulaire employé pour les systèmes logiques où la génération de bits de parité à partir d'une relation de redondance analytique, permet la détection d'erreur, donc le contrôle de parité se faisait dans les circuits logiques. Le principe de la méthode est la vérification de la consistance existante entre les entrées et les sorties du système surveillé d'où l'idée de base de cette méthode est de vérifier la cohérence entre les relations mathématiques du système et les mesures (Relation de Redondance Analytique).

#### 1.4.2.2. Estimation paramétrique

Les méthodes d'estimation des paramètres supposent que les défauts affectent les paramètres, et pas seulement les variables du système physique, comme dans le cas de l'observateur. Le principe de cette méthode consiste à estimer en continu les paramètres du procédé en utilisant les mesures d'entrées/sorties et en évaluant la distance les séparant d'une valeur de référence pour l'état normal du procédé. Les estimations des paramètres ont l'avantage de fournir des informations sur l'ampleur de l'écart. L'un des principaux inconvénients de cette approche est la nécessité d'avoir un système physique excité en permanence. Dans le cas de processus dangereux, cela pose donc des problèmes dans la pratique. De plus, la relation entre les paramètres mathématiques et physiques n'est pas toujours réversible d'une seule manière, ce qui complique les tâches de diagnostic basées sur les résidus.

#### 1.4.2.3. Observateurs :

La génération de résidus à l'aide d'une estimation d'état implique la reconstruction de l'état, ou plus généralement, la reconstruction de la sortie du processus à l'aide de l'observateur et l'utilisation de l'erreur estimée comme résidu. Cette méthode a été largement développée car elle a abouti à la conception de générateurs de résidus flexibles [12],[5]

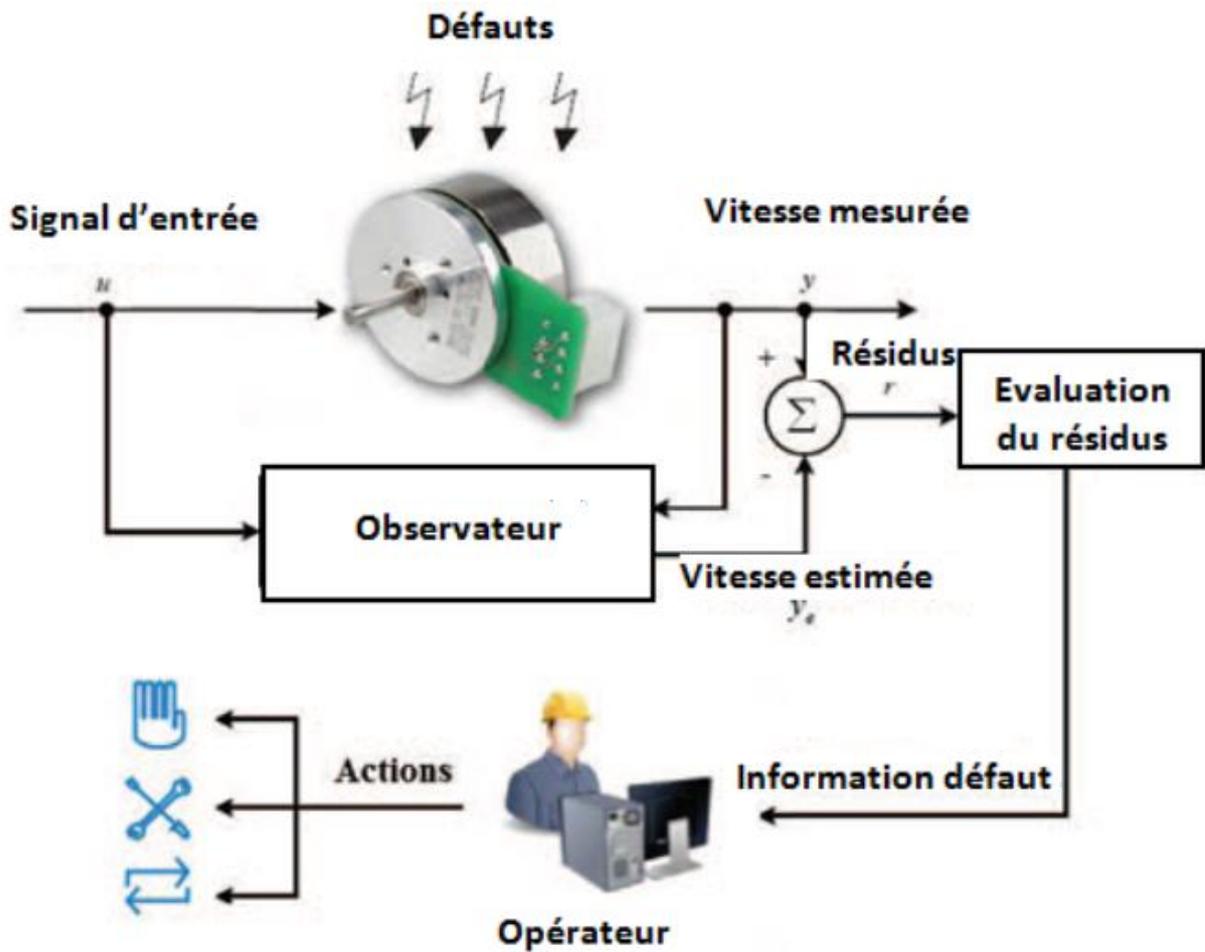


Figure 1.6. Schéma basé sur l'observateur pour la détection des défauts du moteur à courant continu

#### 1.4.2.4. Bond de graphe

La modélisation à ce niveau est physique et consiste à analyser les phénomènes physiques qui seront considérés dans la modélisation (inertie, frottement, etc.) et à reproduire graphiquement l'architecture du système, où tous les domaines physiques émergent à l'aide d'échanges de puissance entre les éléments d'un même langage [8], [9]. A ce niveau, la modélisation s'appuie sur des descriptions énergétiques de phénomènes physiques. Introduire les concepts de base de la physique : dissipation d'énergie, transformation, accumulation, sources, etc. Les variables manipulées ont une sémantique physique forte : (énergie, puissance, effort, débit, etc.). C'est à ce niveau que l'équilibre énergie, matière, quantité de mouvement est pris en compte. [27].

#### 1.4.2.5. Redondance analytique

Une autre solution consiste à utiliser les relations qui existent entre les mesures de grandeurs dépendantes qu'elles soient ou non de même nature.

Cette méthode, appelée redondance analytique, ne peut être mise en œuvre que si l'on dispose d'un modèle statique ou dynamique, linéaire ou non linéaire, déterministe ou stochastique du système ou du sous-système reliant les entrées et les sorties mesurées. La technique de redondance analytique permet une exploitation optimale de toutes les informations acquises dans le cadre d'une configuration d'instrumentation donnée. Elle vient en complément de la redondance matérielle et peut permettre d'en réduire le degré de redondance.

### 1.5. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons introduit les principaux critères de classification des méthodes de diagnostics sont basés sur le type en termes de connaissances, La connaissance et le raisonnement permettent de choisir le modèle le plus adapté à révéler les effets (symptômes) du défaut dans le système. Bien que l'Intelligence Artificielle et la Commande Automatique aient des schémas et des définitions différentes leur principe reste le même, c'est-à-dire la comparaison des observations et des valeurs de référence afin de générer des indicateurs de défauts ou de résidus. Dans la suite de notre travail nous allons basée sur le diagnostic à base d'une redondance analytique pour surveiller le moteur à courant continu.

---

# *Description, modélisation & simulation du moteur à courant continue*

---

## 2.1 Introduction

Un moteur électrique à courant continu (MCC) est un convertisseur électromécanique permettant la conversion bidirectionnelle d'énergie entre une installation électrique parcourue par un courant continu et un dispositif mécanique. Une caractéristique essentielle des moteurs à courant continu est leur remarquable capacité de vitesse variable. Jusqu'à récemment, c'était la machine de choix pour les applications nécessitant un contrôle de la vitesse. De nombreuses applications nécessitent un couple de démarrage élevé. Cependant, les moteurs à courant continu ont intrinsèquement des caractéristiques de couple/vitesse à gradient élevé qui leur permettent de surmonter un couple résistant élevé et d'absorber facilement les surtensions de charge. Le régime moteur s'adapte à sa charge, Dans ce chapitre on s'intéresse de l'étude des caractéristiques du moteur à courant continu à excitation série ainsi que sa modélisation et simulation sous l'environnement MATLAB/ Simulink [16]

## 2.2. Généralité sur le moteur à courant continu:

### 2.2.1. Définition:

La machine à courant continu est une machine électrique. Il s'agit d'un convertisseur électromécanique qui offre la possibilité d'une conversion d'énergie bidirectionnelle entre les installations électriques et les systèmes mécaniques transportant du courant continu. Aussi connu sous le nom de dynamo.

- En fonctionnement moteur, l'énergie électrique est transformée en énergie mécanique.

- En fonctionnement générateur, l'énergie mécanique est transformée en énergie électrique.  
La machine se comporte comme un frein. [17]

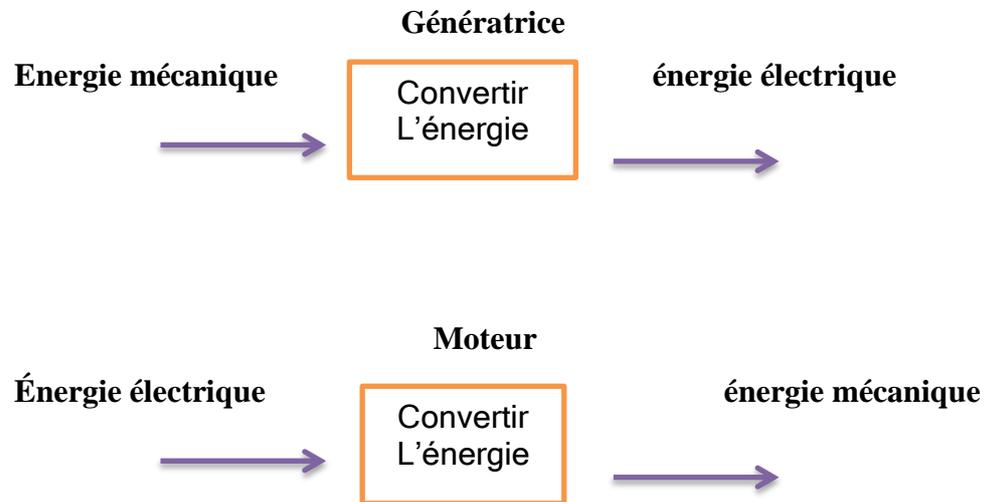


Figure.2.1.Fonctionnement de la machine

### 2.2.2. Constitution d'un moteur à courant continu:

Une machine à courant continu se compose sur parties principales suivantes: l'inducteur (pôles principaux et des pôles auxiliaires) la carcasse, le rotor ou l'induit et collecteur / balais. Comme indiqué dans la figure (2.2)

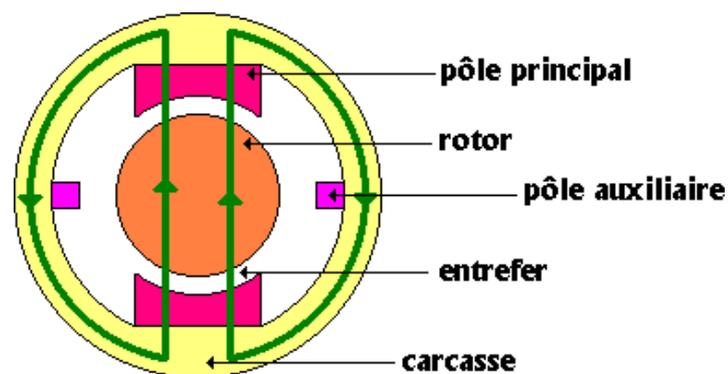


Figure .2.2. Constitution de moteur à courant continu.

## Carcasse

La partie de la machine où les pôles principaux et auxiliaires sont fixés et la machine est reliée à la fondation est appelée la partie de la coque utilisée pour faire passer le flux magnétique généré par les pôles principaux et auxiliaires. Culasse. Le châssis et les pôles (pôle principal et pôle auxiliaire) forment ce que l'on appelle l'inducteur (stator), comme on le voit dans les inducteurs à aimants permanents. [18].



Figure .2.3.Carcasse de moteur à courant continu

## L'inducteur

Alternativement, le stator est à l'origine de la circulation du flux longitudinal fixe généré soit par les bobinages du stator, soit par les aimants permanents. On l'appelle aussi « inducteur » en raison du comportement de la machine en générateur.

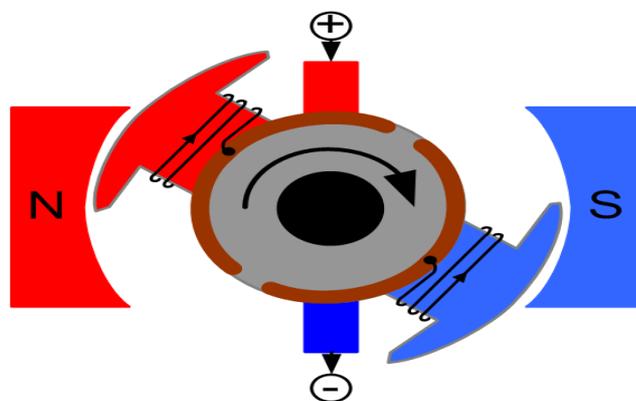


Figure.2.4.L'inducteur de moteur à courant continu.

## L'induit (le rotor)

Ce sont les parties mobiles de la machine qui supportent les conducteurs qui sont exposés au flux magnétique de l'inducteur. Fabriqué en tôle de fer au silicium isolée entre les deux pour limiter la perte d'hystérésis par courants de Foucault. Le fer d'induit a des encoches autour de lui, et ces encoches accueillent les enroulements d'induit à travers lesquels le courant continu circule. L'enroulement d'induit est constitué de sections. Une section est un groupe de virages séparés les uns des autres. L'extrémité de l'enroulement d'induit est connectée au commutateur. La figure (2.5) montre une photo réelle de l'ancre.



**Figure.2.5.**rotor de machine a courant continue

## Le collecteur et les balais

Le balai assure le passage du courant entre l'alimentation et le bobinage d'induit sous forme de contact frottant. La brosse est en graphite et forme une sorte de composant d'usure. Au fur et à mesure que le graphite s'use, il libère de la poussière, facilite la réparation des moteurs à courant continu et est coûteux à entretenir.



**Figure.2.6.**Collecteur.

### Pôles principaux

Le pôle principal (fig.2.7) comprend un noyau 1 en tôles d'acier électromagnétique de 1mm d'épaisseur. Du côté dirigé vers l'induit le noyau a un épanouissement polaire 2 servant à faciliter le passage du flux magnétique par l'entrefer. On place sur le noyau du pôle une bobine de l'enroulement d'excitation 3 par laquelle passe un courant continu. La bobine enroulée sur un fourreau 4 fabriqué soit en tôle d'acier de 1 ou 2mm d'épaisseur sur laquelle est collé une couche de 2 ou 3mm épaisseur, soit en matière plastique ou en papier bakélinisé [19].

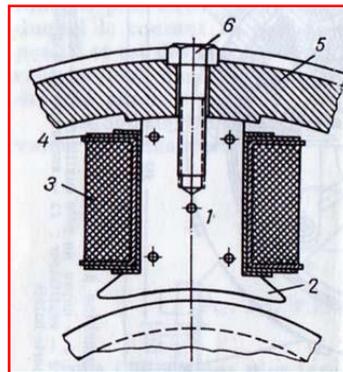


Figure.2. 7 .Pôle principal.

Afin de réduire l'hygroscopicité et d'augmenter la conduction de la chaleur, les bobines sont imprégnées à plusieurs reprises de vernis chauds et sont ensuite séchées au four. Pour un meilleur refroidissement on divise souvent la bobine en deux ou plusieurs parties en hauteur entre lesquelles on laisse des canaux de ventilation de largeur suffisante. Les pôles sont fixés à la cardasse 5 à l'aide de boulons spéciaux 6.

### Pôles auxiliaires

Le pôle auxiliaire comme le pôle principal comprend un noyau 1 qui s'achève par un épanouissement polaire de telle ou autre forme et une bobine 2 enroulée sur le noyau.

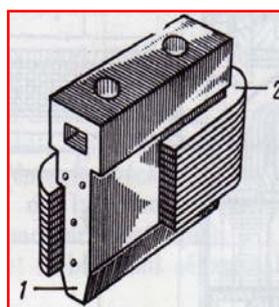


Figure.2.8. Pôle auxiliaire.

Les pôles auxiliaires sont installés exactement au milieu de la distance qui sépare les pôles principaux et sont fixés à la carcasse par des boulons [19].

### 2.3. Principe de fonctionnement :

Une machine à courant continu possède un nombre  $n$  de conducteurs actifs au niveau de l'induit. Le flux utile sous un pôle créé par l'inducteur est exprimé en webers, et  $N$  représente la fréquence de rotation de l'arbre du rotor, en tours par seconde.

Deux cas peuvent se présenter :

1. Soit un conducteur est à la fois traversé par un courant électrique et plongé à l'intérieur d'un champ magnétique, il est alors soumis à une force électromagnétique.
2. Soit un conducteur est à la fois en mouvement de rotation et plongé à l'intérieur d'un champ magnétique, il est alors le siège d'une force électromotrice [20]

#### 2.3.1. Force électromotrice

L'inducteur (ou stator) crée un champ magnétique fixe  $B$ . Ce stator peut être à aimants permanents ou à rotor bobine L'induit (ou rotor) porte des conducteurs parcourus par un courant continu (alimentation du moteur) ; ces spires, soumises à des forces (forces dites « de Laplace »), entraînent la rotation du rotor. Il en résulte une variation du flux du champ magnétique à travers chaque spire ; elle engendre une f.é.m. qui est redressée par l'ensemble {collecteur + balais}. [21]

La valeur moyenne  $E$  de cette f.é.m. est proportionnelle à la vitesse angulaire de rotation du rotor, au flux maximal du champ magnétique créé par l'inducteur à travers une spire ( $\phi = B \cdot S$ ) et à une constante  $K$  qui dépend des caractéristiques de la conception du moteur (nombre de conducteurs, surface de chaque spire, nombre de paires de pôles,...)

$$\left( k = P \cdot \frac{N}{2} \cdot \pi \cdot a \right) \quad (2.1)$$

Avec

**p** : le nombre de paires de pôles

**a** : le nombre de paires de voies d'enroulement

**N** : le nombre de conducteurs (ou de brins - deux par spires)

**$\phi$**  : flux maximum à travers les spires (en Webers - Wb)

**$\Omega$**  : vitesse de rotation (en rad/s)

### 2.3.2. Couple électromagnétique

Pour une spire : les deux brins d'une spire placée dans le champ magnétique **B**, subissent des forces de Laplace  $F_1$  et  $F_2$  formant un couple de force ( $F_1 = F_2$ ) Donc le couple électromagnétique total développé est :

$$(T_{em} = k \cdot \phi \cdot I) [N.m] \quad (2.2)$$

### 2.3.3. Puissance électromagnétique

Si l'induit a une force électromotrice **E** et est traversée un courant **I**, elle recevra une puissance électromagnétique

$$(p_{em} = E \cdot I) \quad (2.3)$$

Selon la loi de conservation de l'énergie, cette puissance est égale à la puissance produite par le couple électromagnétique [10].

$$(p_{em} = T_{em} \cdot \Omega = E \cdot I) [Watts] \quad (2.4)$$

2.3.4. **Le rendement** : est le rapport entre la puissance électrique utile et la puissance mécanique absorbée par l'induit, Du fait de ces différentes pertes, le rendement d'une machine à courant continu varie entre 80 et 95 %.

## 2.4. Différents modes d'excitation

### 2.4.1. Moteur à excitation indépendante

Dans un moteur à excitation séparée, l'inducteur et l'induit sont alimentés par deux sources distinctes. Les cas fréquents où la tension d'excitation est constante sont équivalents à ceux des moteurs à aimants permanents, dont le flux est constant.

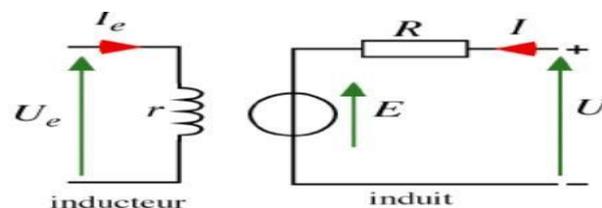


Figure 2.9. Excitation séparée

#### 2.4.1.2. Equations de MCC à excitation séparée

La loi d'Ohm appliquée à la maille définie par l'induit et l'inducteur permet d'écrire :

$$(E = k. \varphi. \omega)$$

$$(U = E + R. I) \tag{2.6}$$

$$(C_e = k. \varphi. I)$$

#### 2.4.1.3. Caractéristiques

1. L'inducteur est alimenté par une source indépendante.
2. Grande souplesse de commande.
2. Large gamme de vitesse.

### 2.4.2. Excitation shunt

Dans un moteur à excitation shunte, l'inducteur et l'induit sont connectés en parallèle et alimentés par une seule source de tension continue. Le modèle câblé de ce moteur est présenté sur la figure suivante

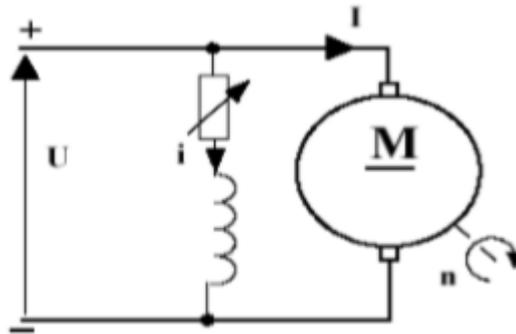


Figure .2.10. Excitation shunt

#### 2.4.2.1. Equations de MCC à excitation shunte

$$(E = k. \varphi. \omega)$$

$$(U = E + R. I) \quad (2.7)$$

$$(C_e = k. \varphi. I)$$

#### 2.4.2.2. Caractéristiques

Couple constant quel que soit la charge et La vitesse n diminue progressivement lorsque la charge augmente.

Remarque : On remarque qu'il n'y a aucune différence entre le mode d'excitation séparée et l'excitation shunt, en vue des équations mathématiques malgré la grande différence au niveau du câblage (raccordement physique).

### 2.5.3. Excitation composée

Dans le mode composé, l'inducteur est divisé en deux parties, l'une connectée en série et l'autre en parallèle.

#### 2.4.3.1Caractéristiques

L'excitation composé du MCC combine les avantages de l'excitation série et du shunte, et élimine le phénomène de l'emballement de l'excitation série

1. Entraînements de grande inertie.
2. Couple très variable avec la vitesse.

#### 2.4.3.2. Domaines d'emploi

Petit moteur à démarrage direct, ventilateur, pompes, machines de laminoirs, volants d'inertie

#### 2.4.4. Excitation série

L'inducteur de ce moteur est en série avec l'induit : le courant d'induit est également le courant d'excitation comme le montre la figure suivante :

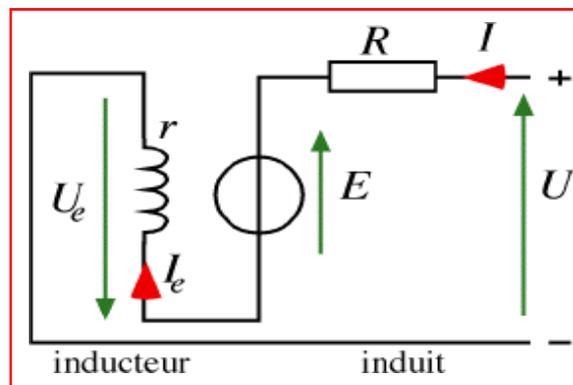


Figure.2.11. Excitation série

#### 2.4.4.1. Equations de MCC à excitation série

La loi d'Ohm appliquée à la maille définie par l'induit et l'inducteur permet d'écrire :

$$(E = k. \varphi. \Omega)$$

$$(U = E + (R + r)I) \quad (2.8)$$

$$(C_e = k. \varphi. I)$$

$r$  : est la résistance de l'inducteur

$R$  : la résistance de l'induit

Leurs caractéristiques sont :

- 1) Démarrage fréquent avec couple élevé ; couple diminuant avec la vitesse.
- 2) Ne jamais faire fonctionner le moteur série à vide car si  $I = 0$  [A], alors  $\Omega$  tend vers l'infini.

3) Toujours mettre le moteur en charge mécanique car si le couple est faible, alors  $\Omega$  tend vers l'infini

## 2.5. Modélisation du moteur à courant Continu à excitation série sur les axes « d, q »

Pour le moteur à excitation série, le circuit d'induit est en série avec l'inducteur alors le même courant parcourt les deux circuits, et la tension est égale à la somme des deux tensions, ce qui nous conduit à écrire :

Le modèle de la figure suivante représente, le modèle du moteur à excitation série sur les axes « d, q » [22].

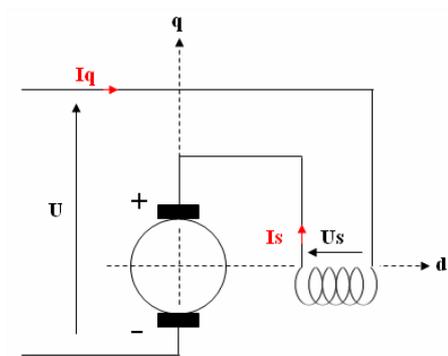


Figure.2.12. Excitation série

$$\begin{cases} U = U_a + U_s \\ I_q = I_s \end{cases} \quad (2.9)$$

### 2.5.1. Equation caractéristique

$$\begin{cases} C_e = M_f d. I_f. I_q \\ U_s = R_s. I_s + L_s \frac{dI_s}{dt} \\ U_a = R_a. I_a + L_a \frac{dI_q}{dt} + \omega_r. M_s d. I_q \\ U = (R_a + R_s + \omega_r. M_s d). I_q + (L_a + L_s). dI_q \end{cases} \quad (2.10)$$

## 2.5.2 .Equations mécaniques

$$J \frac{dW_r}{dt} = (C_e - C_r) \quad (2.11)$$

Nous remplace  $(C_e)$  de l'équation (2.11) (équations électriques) dans l'équation (2.12) (équations mécaniques). on obtient alors :

$$\frac{dW_r}{dt} = M_{sd} \cdot \frac{q}{J} - \frac{C_r}{J} \quad (2.12)$$

## 2.6. Résultats de simulation

D'après les équations mécaniques et les équations électriques obtenues à partir du modèles du moteur à courant continu à excitation série on réalise le schéma bloc de la figure (2.13) représente. Il s'agit dans cette section de faire la simulation du MCC en utilisant logiciel MATLAB auquel est intégré l'outil Simulink Il fournit un environnement graphique et un ensemble de bibliothèques contenant des blocs de modélisation qui permet le design précis la simulation et le de traitement du signal.

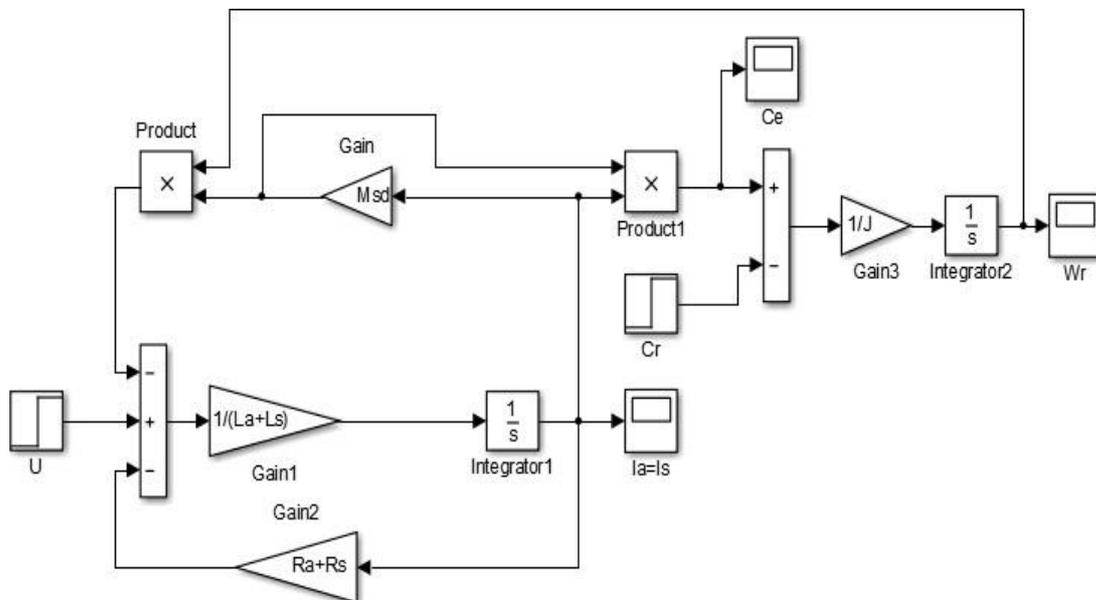
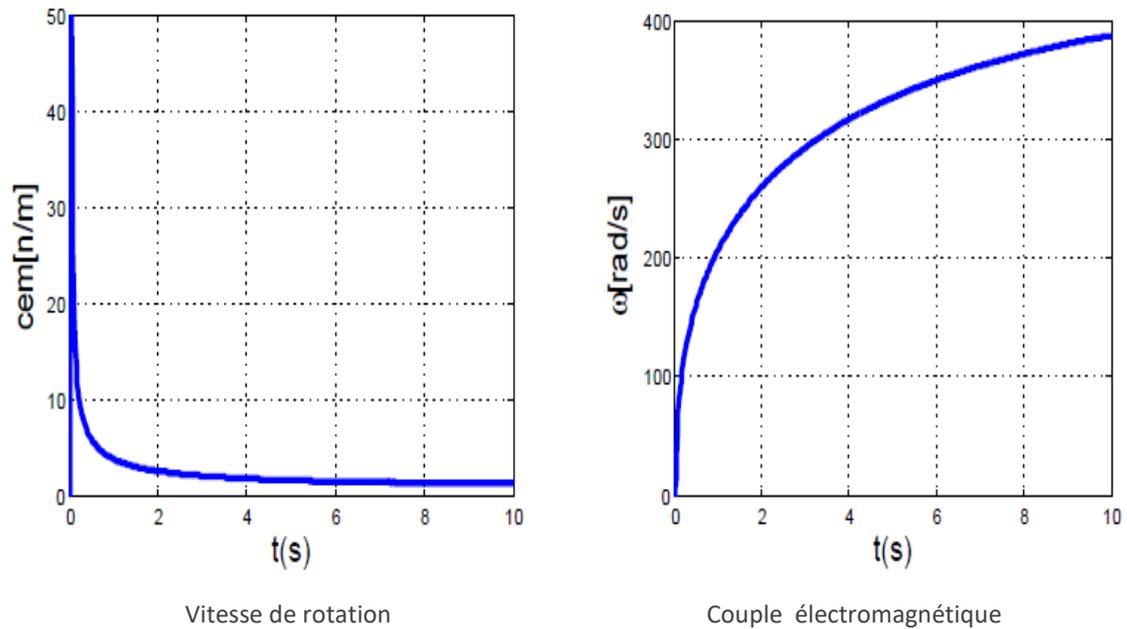


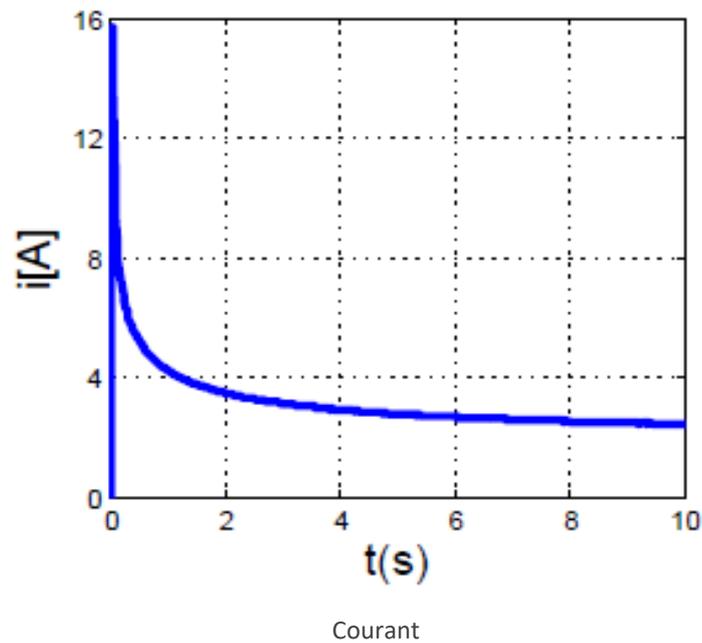
Figure.2.13. Schéma bloc de mcc a Excitation série

On peut maintenant passer à la simulation et à la visualisation des courbes du moteur à courant continu à vide ( $C_r=0$  N.m).



Vitesse de rotation

Couple électromagnétique



Courant

Figure. 2.14. Simulation Excitation série (à vide)

Le moteur démarre avec un couple de démarrage important de l'ordre de 16 N.m, puis le couple passe du régime transitoire au régime établi pour se stabiliser autour de 1N.m, Jusqu'à l'instant 0.5 second

Les résultats de simulation pour le moteur à courant continu à excitation série en charge sont présentés par les figures ci-dessous.

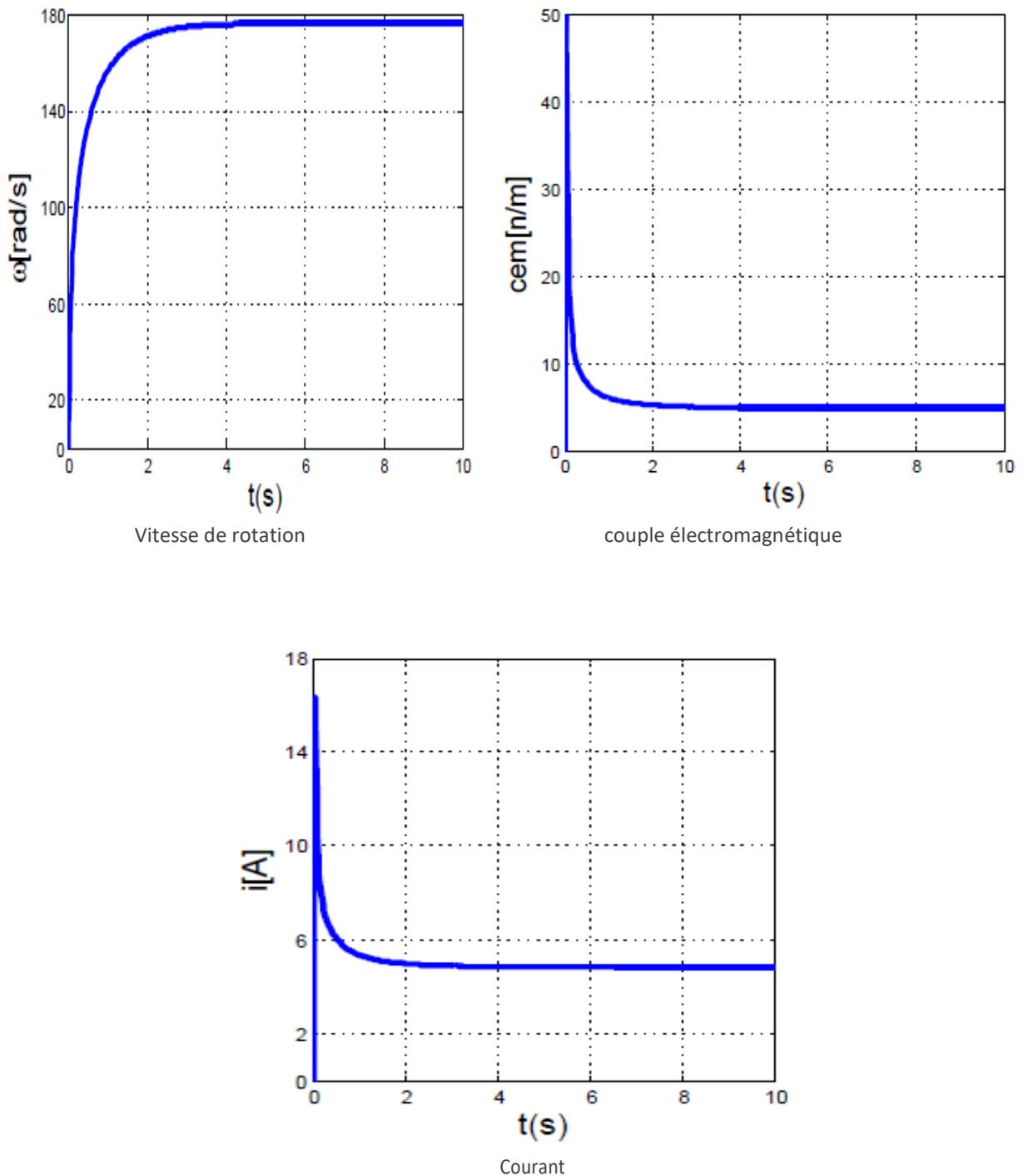


Figure.2. 15. simulation Excitation série en charge

La vitesse à vide a tendance à être instable et infinie pour le fonctionnement à vide, et après l'application du couple résistant nominal, la vitesse augmente de façon exponentielle pour atteindre la vitesse nominale. Elle part de zéro pour se stabiliser autour de la vitesse nominale du moteur. La courbe a une forme exponentielle. Le couple du moteur démarre à zéro, atteint une valeur très élevée et effectue un démarrage très rapide, puis le couple revient à une valeur proche de zéro, et lorsque le moteur est chargé, le couple électromagnétique augmente.

## Conclusion

Les moteurs à courant continu sont idéaux pour de nombreuses applications industrielles. C'est le principal actionneur utilisé dans les applications à vitesse variable depuis de nombreuses années. En effet, il a été prouvé que le contrôle de la vitesse est facilement obtenu en agissant sur la force électromotrice de l'induit du moteur.

Dans ce chapitre, nous avons parlé de la machine à courant continu (moteur), ses éléments, principe de fonctionnement et ses différents types d'excitations. Après nous avons utilisé l'environnement Matlab/Simulink pour réaliser la modélisation et présenté quelque caractéristique du moteur à courant continu à excitation série. A partir de ces résultats de simulation, nous constatons que la modélisation est simple et prend compte des équations mathématiques et cela nous permet à passer à l'étape de la surveillance et qui sera présentée dans le chapitre suivant.

---

# *Surveillance d'un moteur à courant continu à base de la relation de redondance analytique*

---

## 3.1. Introduction

Pour fonctionner correctement, les systèmes de contrôle-commande et de surveillance des processus industriels ont besoin de recevoir, en permanence, des informations représentatives de l'état de ces procédés. Dans la littérature, la détection de défaut est utilisée pour indiquer que quelque chose ne va pas dans le système surveillé et le diagnostic de défaut est utilisé pour déterminer l'emplacement du défaut. La détection et le diagnostic des défauts (FDD) deviennent de plus en plus importants pour la surveillance des processus en raison de la demande croissante de performances plus élevées, ainsi que de la sécurité et de la fiabilité accrues des systèmes dynamiques. Toute défaillance de l'instrumentation conduit à la génération d'informations erronées. Les algorithmes élaborent alors des ordres et des comptes rendus qui ne correspondent pas à l'état réel du procédé, d'où une diminution des performances et de la fiabilité et parfois même, une mise en cause de la sécurité. La validation de mesures qui permet de s'assurer de la cohérence des informations acquises constitue donc une étape essentielle qui doit précéder toute tentative de conduite rationnelle. L'une des techniques permettant de s'assurer de la crédibilité d'une mesure consiste à créer une redondance d'informations ; celle-ci peut être obtenue en utilisant, par exemple, les relations structurellement exactes de bilan matière ou de bilan énergie. Ce type de redondance est qualifié d'analytique ou fonctionnelle, contrairement à la redondance matérielle obtenue en multipliant les capteurs mesurant une même grandeur

## 3.2. Surveillance à base de redondance analytique

L'approche de l'espace de parité, qui est une méthode de surveillance à base de modèle, repose sur le principe de la redondance analytique. Initialement, elle est conçue spécialement pour des systèmes linéaires. Par la suite, une extension de cette méthode aux systèmes non linéaires a été développée dans des conditions particulières. La redondance analytique consiste à utiliser des informations supplémentaires issues de modèles générant des grandeurs homogènes à celles provenant de capteurs. Elle exploite la redondance informationnelle contenue implicitement dans un ensemble de mesures. L'utilisation des techniques de redondance analytique repose sur la disponibilité d'un modèle de connaissance ou de représentation ; elle augmente fortement l'ordre de la redondance et a pour conséquences d'augmenter la fiabilité et la sûreté d'un système de détection, de remplacer un capteur matériel par un "*capteur mathématique*" ou "*capteur informationnel*" et de permettre l'implantation d'un voteur pour un système de redondance matérielle double.

La redondance analytique dont l'utilisation permet la détection et la reconnaissance de défauts de fonctionnement de façon à effectuer des actions correctives appropriées, repose sur des relations de cause à effet, statiques ou dynamiques, qui existent entre les entrées et les sorties observées d'un système. Son champ d'application ne se limite donc pas aux pannes de capteurs mais s'étend aux pannes des actionneurs ou à celles du procédé lui-même.

L'approche utilisant la redondance analytique se décompose généralement en deux phases distinctes. La première concerne la génération de résidus caractéristiques de la panne. Ils représentent les écarts entre le comportement observé du système et le comportement de référence attendu en fonctionnement "normal". Ces résidus sont généralement à moyenne nulle et ont une variance déterminée en l'absence de défauts de fonctionnement. Le problème qui se pose au concepteur du système de diagnostic est de sélectionner les résidus satisfaisant le compromis : sensibilité maximum aux pannes que l'on cherche à détecter - sensibilité minimum aux erreurs de modélisation et aux bruits de mesure

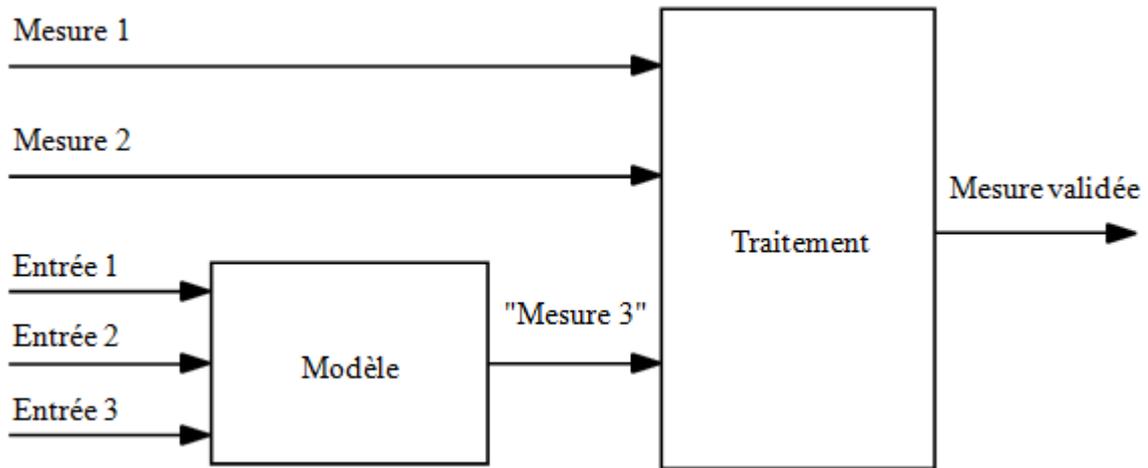


Figure. 3.1. Redondance analytique

### 3.2.1. Espace de parité

L'objet de cette méthode ne concerne pas uniquement la génération des relations de redondance analytique, elle explicite également leur utilisation pour la détection et la localisation des défaillances de capteurs. Cette méthode a été développée initialement dans le cadre de l'étude des centrales inertielles à composants liés appelées "strap-down" utilisées en avionique. Elle a permis de montrer qu'un système trois axes quadruplex (capteurs quadruplés pour des raisons de sécurité) nécessitant douze accéléromètres, peut être réduit à un système n'utilisant que six accéléromètres correctement orientés.

#### 3.2.1.1. Calcul de vecteur parité

Considérons le cas général d'une équation de mesure à l'instant  $k$  :

$$y(k) = cx(k) + \varepsilon(k) + fd(k) \quad (3.1)$$

$$x \in \mathbf{R}^n, y \in \mathbf{R}^m, d \in \mathbf{R}^p, \varepsilon \in \mathbf{R}^m$$

$$C \in \mathbf{R}^{m,n}, F \in \mathbf{R}^{m,p}$$

où  $y(k)$  est le vecteur de mesure,  $x(k)$  le vecteur des variables à mesurer,  $d(k)$  le vecteur des défauts pouvant affecter certains capteurs et  $\varepsilon(k)$  le vecteur des bruits de mesure ;  $C$  : est la matrice caractérisant le système de mesure et  $F$  est la matrice qui traduit la direction des

défauts. Dans la suite, on considère le cas où le nombre de mesures  $m$  est supérieur au nombre de variables  $n$  de façon à se placer dans une situation de redondance (cette condition est suffisante mais non nécessaire).

On souhaite analyser la consistance des mesures et détecter la présence des défauts ; pour cela on cherche à établir des relations entre les mesures qui sont indépendantes des grandeurs inconnues mais qui restent sensibles aux défauts.

On définit le vecteur parité  $p(k)$  projection du vecteur des mesures  $y(k)$  :

$$p(k) = wy(k) \quad (3.2)$$

Où  $W$  est une matrice de projection. Parmi les propriétés de cette matrice, son orthogonalité avec  $C$  entraîne en particulier :

$$p(k) = w\varepsilon(k) + wfd(k) \quad (3.3)$$

On note, que dans le cas idéal l'absence d'erreurs de mesure  $\varepsilon(k)$  et de défauts  $d(k)$  le vecteur parité est nul. Par conséquent, l'équation (3.2) traduit l'ensemble des redondances qui lient les mesures  $y(k)$  :

$$wy(k) = 0 \quad (3.4)$$

On peut noter que l'expression (3.2) permet le calcul numérique du vecteur parité à partir des mesures, c'est la forme de calcul du vecteur parité, alors que l'expression (3.3) explique l'influence des erreurs de mesure et des défauts, c'est sa forme d'évaluation.

De nombreuses méthodes peuvent être employées pour la détermination de cette matrice  $W$ . On peut, par exemple, effectuer une élimination directe par substitution des inconnues. La matrice  $C$ , de rang  $m$ , peut être décomposée sous la forme :

$$c = c_1 \ c_2 \quad (3.5)$$

Où  $C_1$  est régulière. Une matrice orthogonale à  $C$  s'écrit alors simplement :

$$w = (c_2 \ c_1^{-1} - I) \quad (3.6)$$

### 3.4. Application sur moteur à courant continu

Pour expliquer le paragraphe précédent Afin d'illustrer clairement le paragraphe précédent, cet exemple consiste à expliquer par simulation la possibilité de surveillance d'un moteur à

courant continu de type série par la méthode de génération des relations de redondance analytique (espace de parité) Le modèle s'écrit par :

$$\frac{di}{dt} = \frac{1}{L}u - \frac{k}{L}\Omega i - \frac{R}{L}i \quad (3.7)$$

$$\frac{d\Omega}{dt} = \frac{K}{J}i^2 - \frac{F}{J}\Omega \quad (3.8)$$

$\Omega$  est la vitesse de rotation du moteur,  $i$  le courant d'induit,  $J$  moment d'inertie,  $R$  résistance de l'induit,  $L$  l'inductance,  $K$  coefficient de couple  $F$  : moment visqueux,  $u$  la tension d'entrée  
L'équation de la mesure est la suivante :

$$Y_1 = X_1$$

$$Y_2 = X_2$$

Le vecteur d'état est donnée par:

$$X = [X_1 \ X_2]^T = [i \ \Omega]^T \quad (3.9)$$

Les relations de redondance analytique générées sont exprimées par les expressions suivantes [23].

$$RRA1 = \dot{Y}_2 - \frac{K}{J}Y_1^2 + \frac{F}{J}Y_2$$

$$RRA2 = \dot{Y}_2 + \frac{2KR}{JL}Y_1^2 + \frac{2K^2}{JL}Y_1^2Y_2 - \frac{2K}{JL}Y_1u + \frac{FK}{J^2}Y_1^2 - \frac{F^2}{J^2}Y_2$$

$$RRA3 = \dot{Y}_1 - \frac{R^2}{L^2}Y_1 - \frac{2KR}{L^2}Y_1Y_2 + \frac{R}{L^2}u - \frac{K^2}{L^2}Y_1Y_2^2 + \frac{K}{L^2}Y_2u + \frac{K^2}{JL}Y_1^3 - \frac{KF}{JL}Y_1Y_2 - \frac{1}{L}\dot{u} \quad (3.10)$$

$$RRA4 = \dot{Y}_1 + \frac{R}{L}Y_1 + \frac{K}{L}Y_1Y_2 - \frac{1}{L}u$$

### 3.4.1. Résultats de simulation

Pour montrer l'efficacité de la méthode de redondance analytique non linéaire pour la détection et l'isolation des défauts capteurs ou actionneurs, nous allons donner les résultats obtenus avec quatre simulations différentes, à chaque fois nous simulons un défaut et nous observons la réaction des résidus. Une surveillance de notre système de la méthode globale de détection des défauts basée sur la méthode des relations de redondance analytique est illustré à la Figure 3.2 une fois le modèle construit, les résidus sont générés.

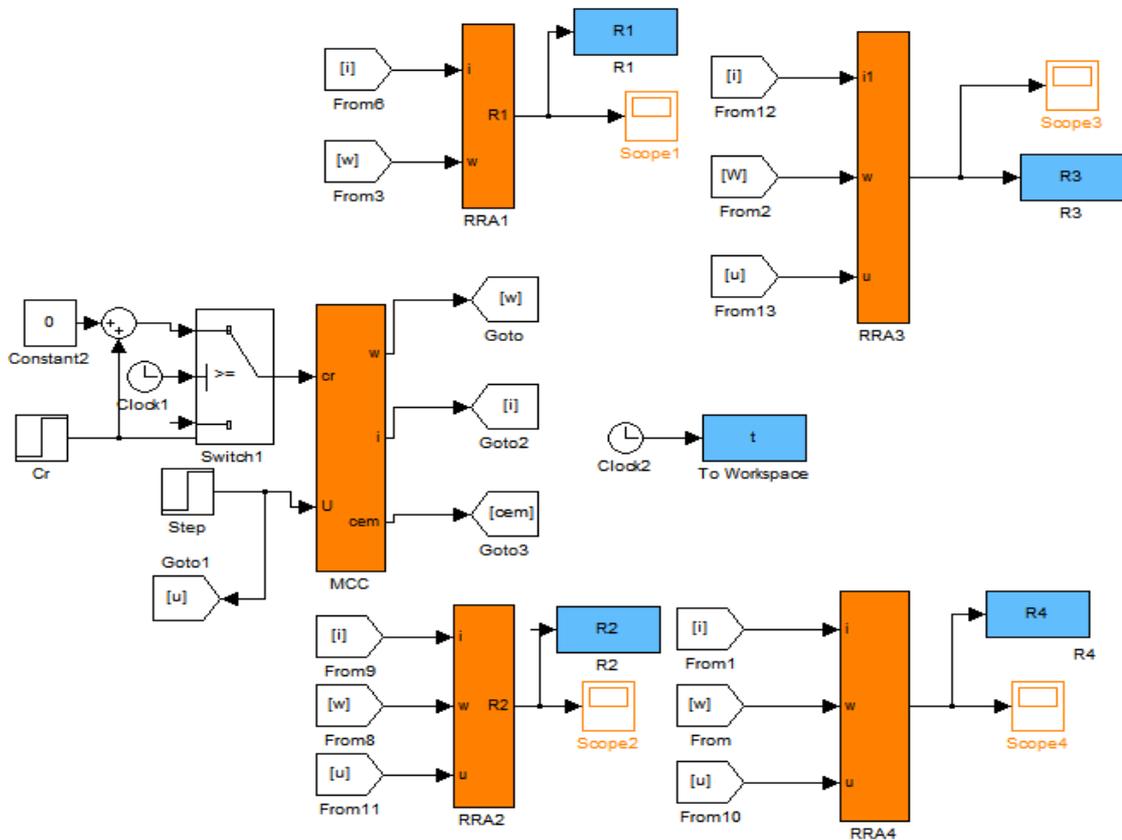
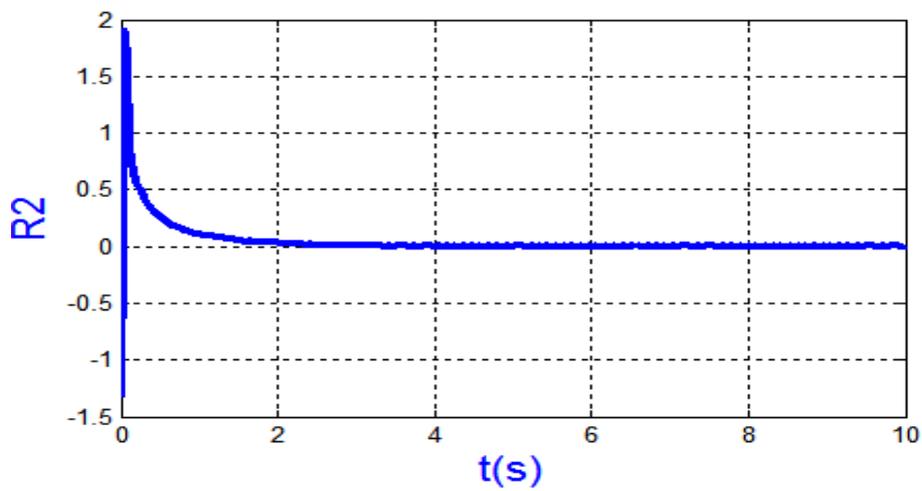
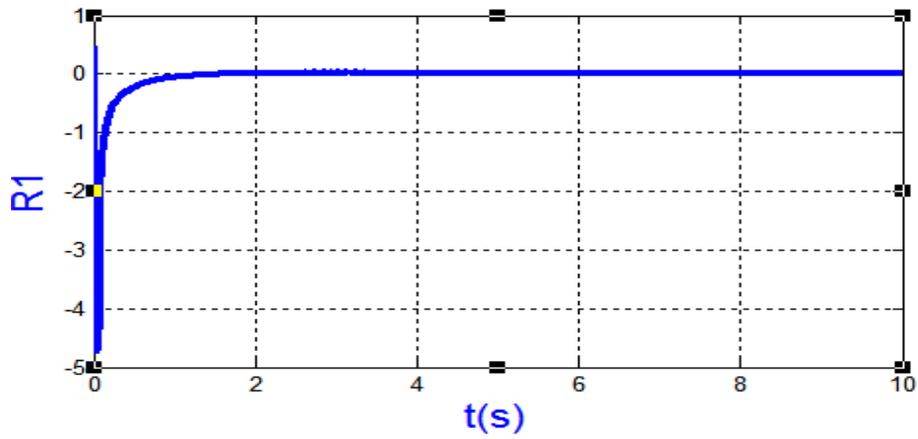


Figure.3.2.schema bloc des relations de redondance analytique

### 3.4.1.1. Fonctionnement sans défaut (Sain)

Dans un premier temps nous allons simuler le moteur à courant continu en fonctionnement normal (sans défaut) pour tester notre technique de surveillance.



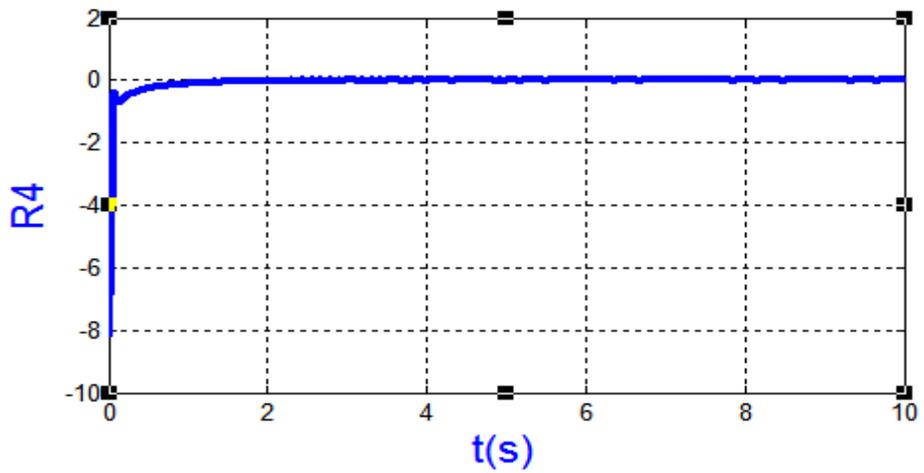
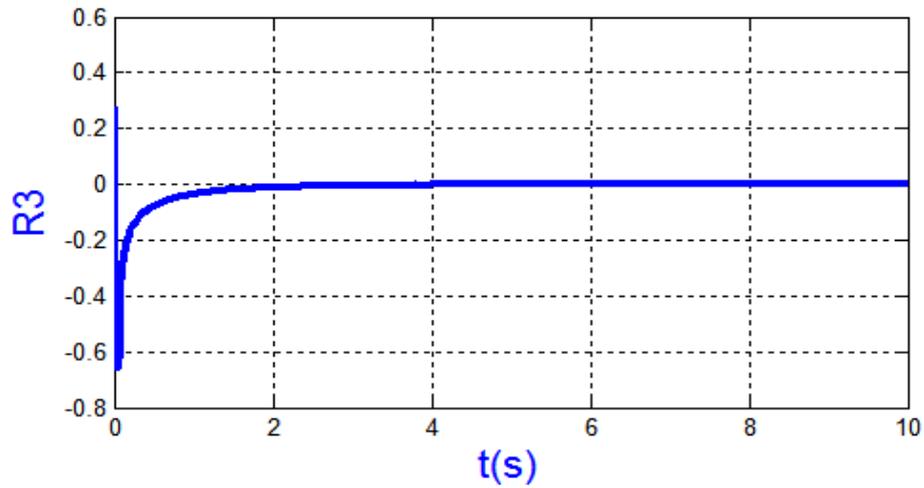


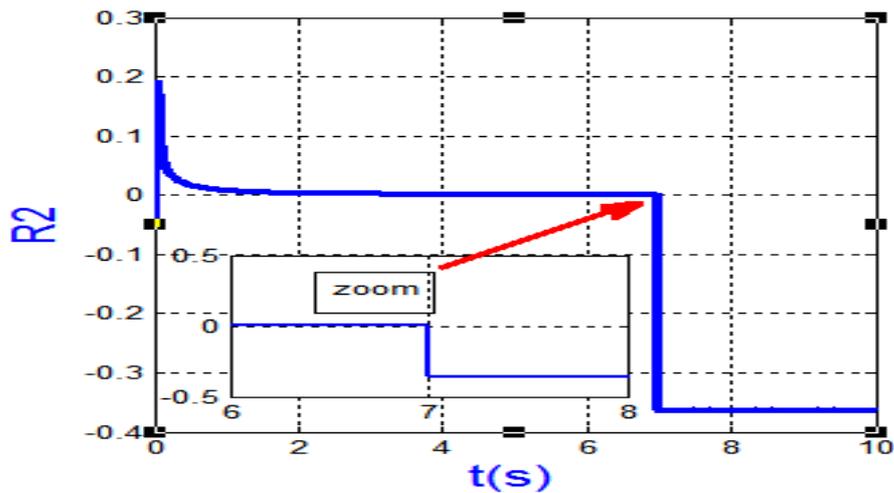
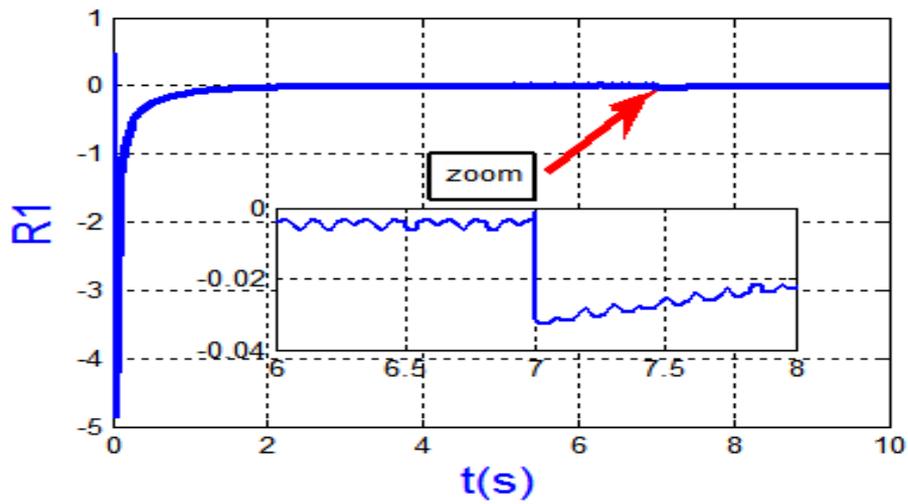
Figure 3.3. Evolution des residues en fonctionnement (sain)

Les résultats de simulation obtenus lorsqu'aucune panne n'est considérée sont représentés par la figure (3.3). On remarque que ces résidus sont presque nuls pendant toute la durée de fonctionnement de notre système

### 3.4.1.2. Fonctionnement avec défaut

#### A. Défaut capteur de vitesse

On réalise deux types de défauts, à chaque fois nous simulons un défaut et nous observons la réaction de chaque résidu. Nous commençons par un défaut sur le capteur de vitesse de rotation  $\Omega$ . après, nous simulons un défaut sur le capteur de courant  $i$  de la machine à courant continu. Pour illustrer l'intérêt de la méthode, on suppose que chaque défaut intervient entre l'intervalle de temps  $t \in [6s \ 8s]$  associé à un fonctionnement normal.



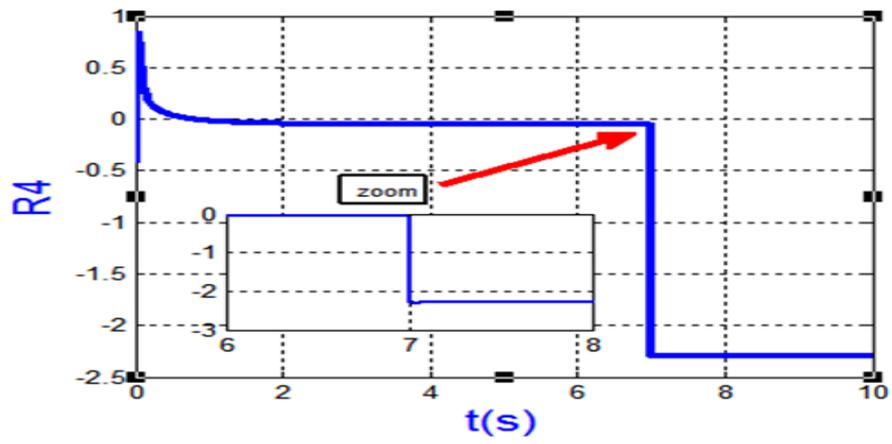
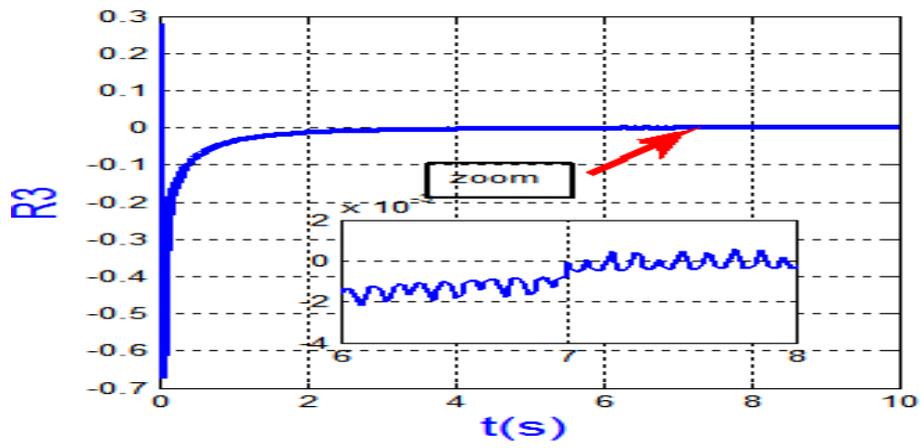
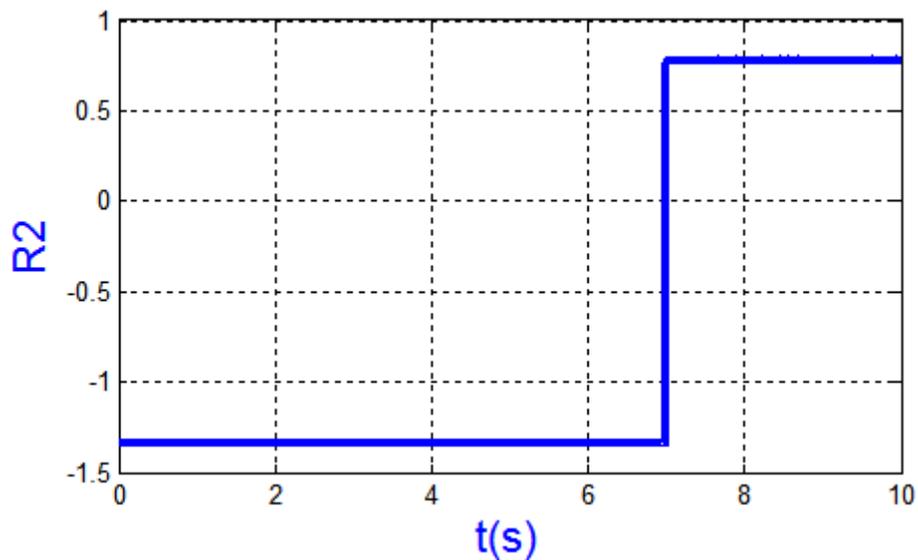
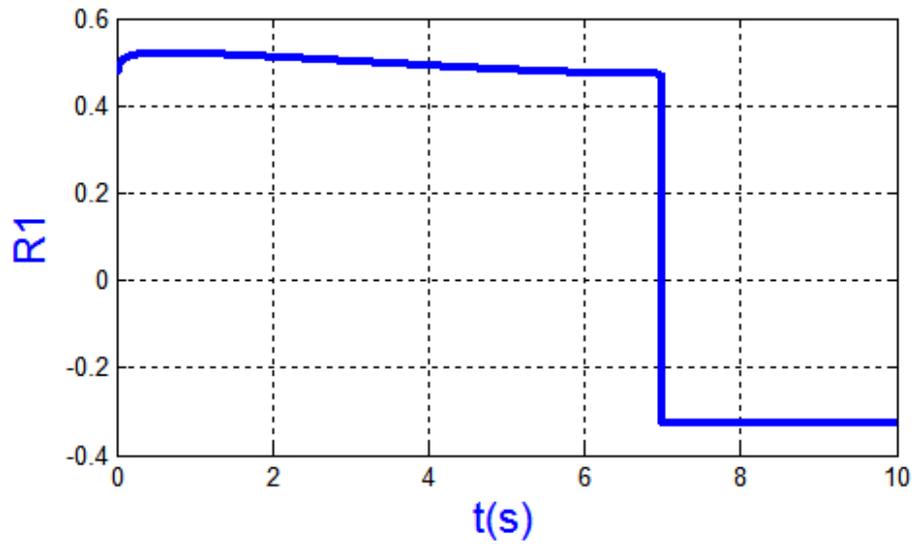


Figure. 3.4. Défaut capture de vitesse

## B. Défaut capteur de courant

Dans ce cas le défaut est de capteur de courant à l'instant  $t = 7\text{s}$ . D'après les résultats de simulations obtenus, on remarque qu'en régime de fonctionnement normal, le résidu est statiquement nul et s'écarte de zéro en présence de défauts de ce capteur électrique de courant.



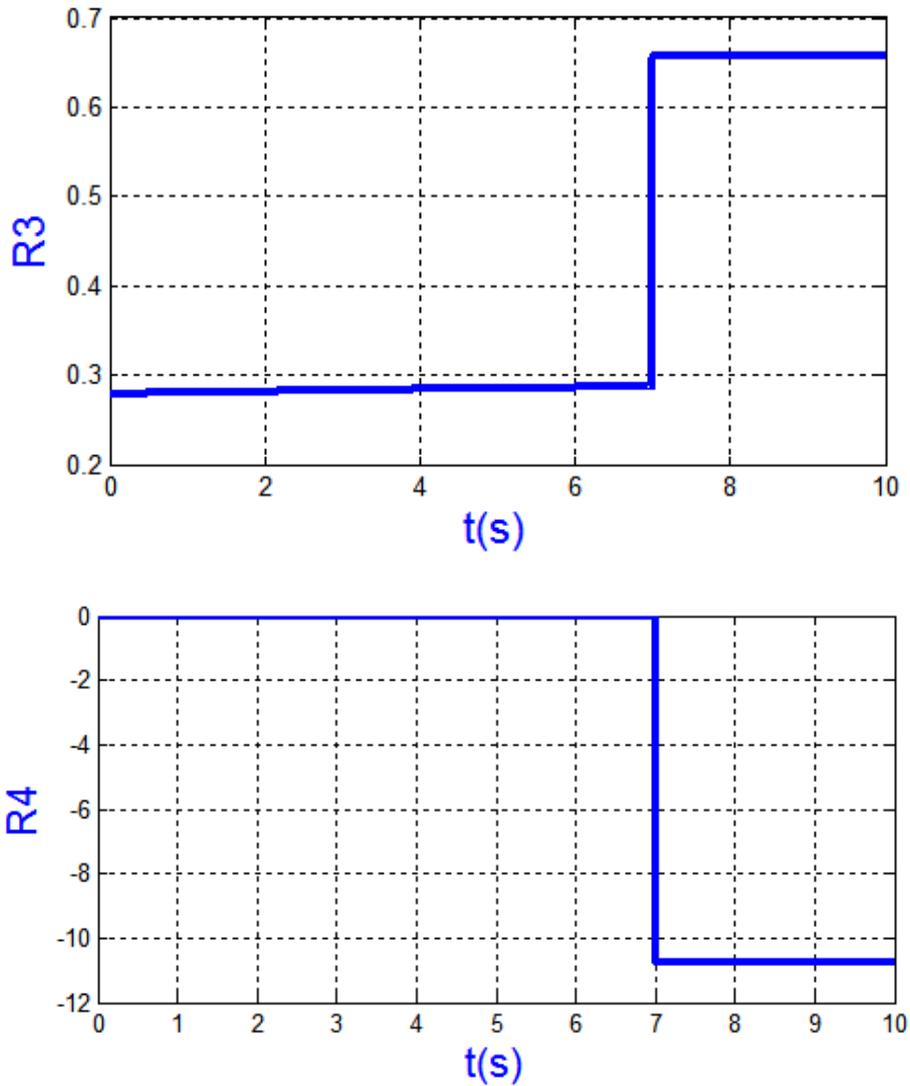


Figure. 3.5. Défaut capture de courant

### 3.5. Conclusion

Dans ce chapitre la méthode utilisant la génération des relations de redondance analytique est appliquée pour la surveillance d'un moteur à courant continu. Le résidu est statiquement nul et s'écarte de zéro et un retour à la normale lorsque le défaut disparaît. Cette détection doit être complétée par la phase de localisation de défauts. Une façon d'améliorer la décision concernant cette phase consiste à générer des résidus qui ne sont sensibles qu'à un sous ensemble particulier de défauts. Ces résidus sont alors dits résidus structurés utilisées pour la localisation de défaut.

## Conclusion générale

Le premier chapitre est consacré à une surveillance des défauts, où l'intérêt de la surveillance dans le domaine industriel est amplement abordé. Ainsi que, les différentes terminologies, utilisées dans ce domaine, ont été proposés. Classification des différentes étapes de diagnostic finalement. Classification des méthodes de surveillance.

Dans le deuxième chapitre nous avons utilisé l'environnement SIMULINK de MATLAB pour réaliser la modélisation du moteur à courant continue pour un seul type d'excitation (série)

Nous avons pu valider les caractéristiques de chaque type d'excitation du moteur à courant continu qu'on a précisé dans le chapitre du moteur à courant continu

A partir de ces résultats, nous constatons que la modélisation elle simple et prend compte des équations mathématiques et cela nous permet à passer à l'étape du surveillance et qui sera présentée dans le chapitre suivant

Ensuite; nous avons focalisé notre travail sur l'étude de l'approche structurelle qui est un outil puissant de la surveillance la redondance analytique

Nous avons développé l'application d'un schéma basé sur la redondance analytique à la détection de défauts et l'avons appliqué à un système électromécanique (moteur à courant continu).

## Liste des references

- [1] K. Sia et al: Bond graph: a suitable tool for component faults diagnosis.  
<http://www.scs.org/archives/authors>.
- [2] Frédéric BUSSON, « les bonds graphes multi énergies pour la Modélisation et la surveillance en génie des Procèdes » thèse doctorat, Université des Sciences et Technologies de Lille, 2002, 209 p.
- [3] R. Toscano : Commande et diagnostic des systèmes dynamiques. Ellipses, Paris, 2005
- [4] G. Zwingelstein : Diagnostic des défaillances. Hermès, Paris, 1995.
- [5] Samir TOUAF. « Diagnostic logique des systèmes complexes et dynamiques dans un contexte multi-agent ». Thèse de doct. 2005.
- [6] Benjamin DECOTTE. « Identifiabilité structurelle de modèles bond graphs ». Thèse de doct. Lille 1, 2002
- [7] SAKHARA Saadi, “Diagnostic des défauts d’un entraînement électrique par la technique ondelette”, Thèse de Doctorat, Université Badji Mokhtar-Annaba, Algérie, 2017
- [8] Antonio Orantes MOLINA. « Méthodologie pour le placement des capteurs à base de méthodes de classification en vue du diagnostic ». Thèse de doct. 2005.
- [9] Walter NUNINGER. « stratégie de diagnostic robuste à l’aide de la redondance analytique ». Thèse de doct. éditeur inconnu, 1997
- [10] Rosario TOSCANO. *Commande et diagnostic des systèmes dynamiques : modélisation, analyse, commande par PID et par retour d’état, diagnostic*. ellipses, 2005.
- [11] Mohand Arab DJEZIRI. « Diagnostic des systèmes incertains par l’approche bond graph ». Thèse de doct. 2007.
- [12] W. Nuninger : Stratégie de diagnostic robuste à l’aide de la redondance analytique. Thèse de Doctorat. Université de Lorraine, 1997
- [13] G. Dauphin Tanguy: Les bond graphs en mécanique. Les Techniques de l’Ingénieur n°S7222.
- [14] G. Dauphin Tanguy: Les bond graphs. Paris, Hermès Science Publication Paris, 2000.
- [15] M. Rivera: Modélisation des systèmes dynamiques à topologie variable. Thèse de Doctorat. Université de Lyo
- [16] [www.elec.jbd.free.fr](http://www.elec.jbd.free.fr), « Machine électromagnétique
- [17] SEBAA Hamza, « Commande d’une machine à courant continu », Mémoire de Master, Université Mohamed Khider de Biskra,
- [18] Alaeddine BOUNAB. « Conception d’une Architecture d’Instrumentation en vue de la Modélisation et de la Surveillance d’un Moteur à Courant Continu ». Thèse de doctorat
- [19] [www.elec.jbd.free.fr](http://www.elec.jbd.free.fr), « Machine électromagnétique », Chapitre 13.
- [20] F. Bernot : Machine à courant continu « constitution et fonctionnement ». Technique de l’ingénieur, D3556 ; D3555.
- [21] R. ABDESSEMED et M. KADJOU DJ, « Modélisation des machines

Électriques », Edition : Presses de l'Université de Batna (Algérie), 1997

[22] F. Bernot : Machine à courant continu « constitution et fonctionnement ». Technique de l'ingénieur, D3556 ; D3555.n1, 2005.

[23] s.medjmadj : Méthodes et outils d'aide à la décision en vue de la commande tolérante aux défauts des entraînements électriques.2015

## Résumé

La surveillance des pannes est aujourd'hui essentielle pour la fiabilité, la disponibilité, la maintenance et les performances des systèmes, ainsi que pour la sûreté ou la sécurité d'un système industriel. En tant que l'une des approches de détection d'erreurs basées sur un modèle analytique, ce travail se concentre sur une approche de détection d'erreurs basée sur un modèle utilisant la redondance analytique.

Nous terminons ce travail par une simulation sur un moteur à courant continu à excitation série, différents types de défauts sont simulés sur le moteur et des expérimentations sont réalisées pour trouver des défauts. Avec les résultats de simulation.

**Mots clés:** Détection de défaut, diagnostic, redondance analytique, moteur à courant continu.

## Abstract

Fault control is essential today for the reliability, availability, maintenance and performance of système, as well as for the safety or security of an industrial system. As one of the analytical model-based error detection approaches, this work focuses on a model-based error detection approach using analytical redundancy.

We end this work with a simulation on a DC motor with series excitation, different types of faults are simulated on the motor and experiments are carried out to find faults. With simulation results

## المخلص

يعد تشخيص الأعطال أمرًا ضروريًا اليوم لموثوقية الأنظمة وتوافرها وصيانتها وأدائها ، فضلاً عن سلامة أو أمن النظام الصناعي. كواحد من مناهج اكتشاف الأخطاء القائمة على النموذج التحليلي، يركز هذا العمل على نهج اكتشاف الخطأ المستند إلى النموذج باستخدام التكرار التحليلي.

بإثارة متسلسلة، ويتم محاكاة أنواع مختلفة من الأعطال على المحرك ويتم إجراء التجارب DC نتهي هذا العمل بمحاكاة على محرك لاكتشاف الأعطال. مع نتائج المحاكاة