

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

BADJI MOKHTAR - ANNABA UNIVERSITY

جامعة باجي مختار - عنابة

UNIVERSITE BADJI MOKHTAR ANNABA



Année 2010

Faculté des Sciences de l'Ingénieur  
Département d'électrotechnique

## MEMOIRE

*Présenté pour l'obtention du diplôme de **Magister***

# T H E M E

## DIAGNOSTIC DE DEFAUTS PAR LOGIQUE FLOUE

*Option : Commande Electrique*

Présenté par : BOURAIYOU Ahmed

Directeur de mémoire : Pr. *DEBBACHE* Nasr eddine

Université de Annaba

Devant le jury :

|            |                     |    |                      |
|------------|---------------------|----|----------------------|
| Président  | : Dr. BAHI Tahar    | MC | Université de Annaba |
| Examineurs | : Dr. LAKEL Rabah   | MC | Université de Annaba |
|            | : Dr. LABAR Hocine  | MC | Université de Annaba |
|            | : Dr. SOLTANI Fatma | MC | Université de Annaba |

*Je dédie ce mémoire*

*A mes chers parents pour tous les sacrifices consentis,  
pour leur soutien durant toute mes années d'études,  
à toute ma famille et à mes amis,*

# Remerciements

Je remercie Allah tout puissant qui m'a donné la force et la volonté pour pouvoir finir ce mémoire de magister.

Je tiens tout d'abord exprimer ma gratitude à mon directeur de mémoire Mr DEBBACHE Nasr eddine pour la confiance qu'il m'accordée, ses encouragements, et ses précieux Conseils, et pour leur effort avec mois dans ce travail.

Je remercie beaucoup monsieur BAHY Tahar , M.C à l'université d'Annaba, d'avoir accepté d'examiner ce travail et d'assurer la présidence de jury.

Je remercie beaucoup monsieur Le docteur LAKEL Rabah M.C à l'université d'Annaba, Le docteur LABAR Hocine, Le docteur SOLTANI Fatma, d'avoir accepté d'examiner le travail.

Un grand merci également à Monsieur Le docteur BAHY Tahar, pros ses précieux conseils et en particulier sa très grand disponibilité.

Je remercie les collègues et amis et plus particulièrement NECAIBIA Amar , FERGANI Nadir, ATOUI Issam BOUTASSETA Nadir, OUBADI Salim, BENJAMAA Khaled, BENAMIRA nadir.

Enfin, je remercie bien sûr mes parents pour m'avoir supporté pendant plusieurs années de recherche.

## Résumé :

Le travail présenté dans ce mémoire concerne l'application de la technique de la logique floue pour le diagnostic du défaut statorique de type court circuit de la machine asynchrone. Dans un premier lieu, sont discutées et caractérisées les spectres de fréquences du courant statorique afin d'analyser et déterminer les composantes de fréquences spécifiques qui indiquent un défaut naissant ou une dégradation possible de l'état de machine. En suite, les modèles de la machine asynchrone saine et en présence de défaut sont développés et simulés. L'application de la technique de la logique floue pour le diagnostic et la surveillance de la machine asynchrone est basée sur l'analyse spectrale du son courant statorique. Les résultats de simulation sont validées par des simulations en Matlab Simulink.

## Abstract :

The work presented in this memory relates to the application the technique of fuzzy logic for the diagnostic one of the stator default of short-circuit type of the asynchronous machine in first time are discussed and characterized with frequency spectrums and this last obtained by stator current and to aim at analyzed to discover the specific components of frequency which indicate an incipient defect or a possible degradation in a state of machine.

In continuation the model of the asynchronous machine healthy and at fault with simulations, finally the simulation of the application of the technique of fuzzy logic containing the spectral analysis and to interpret the frequency spectrum obtained by the current of stator for the diagnostic of fault. The results obtained is great degree of effectiveness, which enables them to be used as tool for monitoring for the asynchronous machines. After, the results of the system are commented on and to interpret by Matlab silmulik.

## ملخص:

العمل المنجز في هذه المذكرة يخص تطبيق تقنية المنطق الغامض من أجل تشخيص العطب من نوع دائرة قصيرة بين الملفات للمحرك اللا تزامني.

بداية قمنا بتقديم بعض تقنيات التشخيص المطبقة على المحرك اللا تزامني ثم قمنا بتقديم نموذجين للمحرك في الحالة العادية و حالة العطب من نوع دائرة قصيرة بين الملفات.

وأخيرا قمنا بتقديم محاكاة تطبيق المنطق الغامض الذي يعتمد على التحليل الطيفي لإشارة التيار الكهربائي للجزء الساكن و هذا من أجل تشخيص العطب الموجود في المحرك بواسطة :

(Matlab Simulink)

# TABLE DES MATIERES

|  |   |
|--|---|
| Introduction générale .....  | 1 |
| Chapitre 1   |   |
| Technique de diagnostic.....   | 3 |
| 1. introduction.....   | 3 |
| 2. Qu'est-ce que le diagnostic ? .....   | 3 |
| 2.1 Terminologie .....   | 3 |
| 2.1.1 Fonctionnement normal d'un système .....   | 3 |
| 2.1.2 Défaut .....   | 3 |
| 2.1.3 Défaillance.....   | 3 |
| 2.1.4 Panne .....  | 4 |
| 2.2 La Supervision.....  | 4 |
| 2.2.1 La détection .....   | 4 |
| 2.2.2 La localisation .....  | 4 |
| 2.2.3 La décision .....  | 4 |
| 3. Eléments de constitution-Fonctionnement de la machine asynchrone à cage d'écureuil..... | 4 |
| 3.1 Eléments de constitution de la machine asynchrone .....                                | 4 |
| 3.1.1 Stator.....  | 5 |
| 3.1.2 Rotor.....   | 6 |
| 3.1.3 Les organes mécaniques .....   | 7 |
| 4. Les défaillances de la machine asynchrone .....   | 7 |
| 4.1 Défaillances d'ordre mécanique .....   | 8 |
| 4.1.1 Défaillances des roulements .....  | 8 |
| 4.1.2 Défaillances du flasque .....  | 8 |
| 4.1.3 Défaillances de l'arbre .....  | 8 |

|  |    |
|--|----|
| 4.2 Défaillances d'ordre électrique .....  | 9  |
| 4.2.1 Défaillances au stator.....  | 9  |
| 4.2.1.1 Défauts d'isolant dans un enroulement .....                              | 9  |
| 4.2.1.2 Court-circuit entre spires.....  | 10 |
| 4.2.1.3 Court-circuit entre phases .....   | 10 |
| 4.2.1.4 Court-circuit phase/bâti .....   | 11 |
| 4.2.1.5 Défauts de circuit magnétique .....                                      | 11 |
| 4.2.2 Défaillances au rotor .....  | 11 |
| 4.2.2.1 Ruptures de barres.....  | 12 |
| 4.2.2.2 Ruptures d'anneaux.....  | 12 |
| 4.2.2.3 Excentricité statique et dynamique .....                                 | 12 |
| 5. Techniques de diagnostic .....  | 13 |
| 5.1 Méthode d'analyse des signaux obtenus sans modèle (diagnostic externe) ..... | 14 |
| 5.1.1 Analyse fréquentielle (La transformation de Fourier) .....                 | 14 |
| 5.5.1.1 Fenêtres d'observation .....   | 15 |
| a. Fenêtre rectangulaire .....   | 15 |
| b. Fenêtre Hann .....  | 16 |
| b. Fenêtre Hamming .....   | 17 |
| 5.5.1.2 Choix d'une fenêtre.....   | 17 |
| 5.1.2 Analyses vibratoires de la machine .....                                   | 18 |
| 5.1.3 Diagnostic des défauts par analyse du vecteur de Park .....                | 18 |
| 5.2 Méthodes d'obtention et d'analyse des signaux à base de modèles .....        | 19 |
| 5.2.1 Techniques d'identification.....   | 20 |
| 5.2.2 Techniques d'estimation d'état .....                                       | 20 |
| 5.2.3 Diagnostic des défauts par estimation paramétrique .....                   | 20 |

|  |    |
|--|----|
| 5.2.4 Techniques des résidus .....             | 21 |
| 5.3 Les approches modernes de diagnostic.....  | 21 |
| 5.3.1 Les systèmes experts .....               | 22 |
| 5.3.2 Les arbres de défaillances .....         | 23 |
| 5.3.3 Les réseaux de neurones artificiels..... | 24 |
| 6. Conclusion .....                            | 25 |

## Chapitre 2

|   |    |
|---|----|
| Modélisation de la machine asynchrone.....  | 26 |
| 1. Introduction .....   | 26 |
| 2. Hypothèses de travail .....  | 26 |
| 3. Modèle en régime permanent .....   | 26 |
| 4. Modèle dynamique .....   | 27 |
| 4.1 Equations associées .....   | 27 |
| 4.1.1 Les Equation de tension .....   | 27 |
| 4.1.2 Equations magnétiques.....  | 28 |
| 5. L'utilisation de la transformation de park.....  | 29 |
| 5.1 Les équations des tensions statoriques .....  | 30 |
| 5.2 Les équations des tensions rotoriques .....   | 30 |
| 5.3 Les équations des flux statoriques .....  | 30 |
| 5.4 Les équations des flux rotoriques .....   | 30 |
| 5.5 L'équation mécanique .....  | 31 |
| 6. Modèle de la machine asynchrone dans le référentiel lié au stator ( $\alpha, \beta$ ).....     | 31 |
| 7. Simulation de la machine asynchrone dans le référentiel lié au stator ( $\alpha, \beta$ )..... | 32 |
| 7.1 Simulation à vide .....   | 32 |
| 7.2 Simulation en charge .....  | 38 |
| 8. Analyse du courant par FFT .....   | 39 |

|  |    |
|--|----|
| 9. Analyse du courant statorique par le vecteur du park..... | 40 |
| 10. Conclusion .....   | 41 |

## Chapitre 3

|   |    |
|---|----|
| Modélisation de la machine asynchrone avec défaut.....                                      | 42 |
| 1. Introduction .....   | 42 |
| 2. modélisation de la machine avec un défaut de courts circuits entre spires .....          | 42 |
| 2.1 Modélisation triphasé .....   | 42 |
| 2.1.1 Equations detension.....  | 44 |
| 2.1.2 Equations magnétiques .....   | 44 |
| 2.2 Modélisation dans le repère biphasé .....   | 45 |
| 2.2.1 Equations des tensions .....  | 45 |
| 2.2.2 Equations des flux .....  | 46 |
| 3. Simulation de la machine asynchrone avec un défaut de courts-circuits entre spires ..... | 46 |
| 3.1 Simulation du défaut de la phase R avec $N_{cc}=0.02(2\%)$ .....                        | 47 |
| 3.2 Simulation du défaut de la phase R avec $N_{cc}=0.05(5\%)$ .....                        | 49 |
| 3.3 Simulation du défaut de la phase R avec $N_{cc}=0.09(9\%)$ .....                        | 51 |
| 4. Analyse du courant statorique par le vecteur du park .....                               | 52 |
| 5. Analyse du courant par FFT .....   | 53 |
| 6. conclusion .....   | 53 |

## Chapitre 4

|   |    |
|---|----|
| Diagnostic à base de la logique floue .....           | 54 |
| 1. Introduction.....                                  | 54 |
| 2. Principe de la logique floue.....                  | 54 |
| 2.1 Bref historique.....                              | 54 |
| 2.2 Limite de la logique booléenne .....              | 55 |
| 2.3 Les concepts principaux de la logique floue ..... | 56 |
| 2.3.1 Sous-ensemble flou .....                        | 56 |

|  |    |
|--|----|
| 2.3.2 Variable linguistique .....                              | 57 |
| 2.3.3 Opérateurs de la logique floue .....                     | 58 |
| 2.3.4 Fonction d'appartenance .....                            | 59 |
| 2.3.5 Propositions et règle floue.....                         | 60 |
| 2.4 Structure générale de la logique flou .....                | 61 |
| 2.4.1 Interface de fuzzification .....                         | 61 |
| 2.4.2 Base de connaissances .....                              | 62 |
| 2.4.3 Moteur d'inférence floue.....                            | 62 |
| 2.4.4 Interface de défuzzification .....                       | 63 |
| 3. Diagnostique de la machine basée sur la logique floue ..... | 64 |
| 3.1 Analyse spectrale (FFT) .....                              | 64 |
| 3.2 fuzzification.....   | 66 |
| 3.3 Les règles de la logique floue .....                       | 67 |
| 3.4 défuzzification .....                                      | 67 |
| 4.Conclusion .....   | 69 |
| Conclusion générale .....                                      | 70 |
| REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....                               | 71 |

# TABLE DES FIGURES

## Chapitre 1

|  |           |
|--|-----------|
| <i>Figure 1 photo réelle de la machine asynchrone à cage d'écureuil.....</i> | <i>05</i> |
| <i>Figure 2 les éléments de la machine asynchrone à cage d'écureuil.....</i> | <i>05</i> |
| <i>Figure 3 Photo du stator d'une machine asynchrone.....</i>                | <i>06</i> |
| <i>Figure 4 le rotor d'une machine asynchrone.....</i>                       | <i>07</i> |
| <i>Figure 5 fenêtres rectangulaires.....</i>                                 | <i>16</i> |
| <i>Figure 6 fenêtres de Hann.....</i>  | <i>16</i> |
| <i>Figure 7 fenêtres de Hamming.....</i>                                     | <i>17</i> |
| <i>Figure 8 Mesures vibratoires sur la machine asynchrone.....</i>           | <i>18</i> |
| <i>Figure 9 Diagnostic à base du modèle.....</i>                             | <i>19</i> |

## Chapitre 2

|   |           |
|---|-----------|
| <i>Figure 1 schéma monophasé équivalent en régime permanent.....</i>  | <i>26</i> |
| <i>Figure 2 Représentation schématique des enroulements statoriques et rotoriques d'une machine asynchrone triphasée.....</i> | <i>27</i> |
| <i>Figure 3 modèle triphasé réel.....</i>   | <i>29</i> |
| <i>Figure 4 modèle biphasé équivalent.....</i>  | <i>29</i> |
| <i>Figure 5 le courant <math>i_\alpha</math>.....</i>   | <i>32</i> |
| <i>Figure 6 le courant <math>i_\beta</math>.....</i>  | <i>33</i> |
| <i>Figure 7 le flux <math>\Phi_{s\alpha}</math>.....</i>  | <i>33</i> |
| <i>Figure 8 le flux <math>\Phi_{s\beta}</math>.....</i>   | <i>34</i> |
| <i>Figure 9 le flux <math>\Phi_{r\alpha}</math>.....</i>  | <i>34</i> |
| <i>Figure 10 le flux <math>\Phi_{r\beta}</math>.....</i>  | <i>35</i> |
| <i>Figure 11 La vitesse.....</i>  | <i>35</i> |

|   |           |
|---|-----------|
| <i>Figure 12 Le couple moteur.....</i>                          | <i>36</i> |
| <i>Figure 13 Le courant <math>I_R</math> de la phase 1.....</i> | <i>37</i> |
| <i>Figure 14 Le courant <math>I_S</math> de la phase 2.....</i> | <i>37</i> |
| <i>Figure 15 Le courant <math>I_T</math> de la phase 3.....</i> | <i>38</i> |
| <i>Figure 16 Le courant <math>I_R</math> en charge.....</i>     | <i>38</i> |
| <i>Figure 17 la vitesse en charge.....</i>                      | <i>39</i> |
| <i>Figure 18 le couple moteur en charge.....</i>                | <i>39</i> |
| <i>Figure 19 analyse du courant du phase 1 par FTT.....</i>     | <i>40</i> |
| <i>Figure 20 la machine sain.....</i>                           | <i>40</i> |

### Chapitre 3

|   |           |
|---|-----------|
| <i>Figure 1 Court-circuit de spires sur la phase S du stator.....</i>             | <i>42</i> |
| <i>Figure 2 Enroulements triphasés avec court-circuit.....</i>                    | <i>43</i> |
| <i>Figure 3 le courant de la phase R avec <math>N_{cc}=0.02(2\%)</math>.....</i>  | <i>47</i> |
| <i>Figure 4 le courant de la phase S avec <math>N_{cc}=0.02(2\%)</math>.....</i>  | <i>48</i> |
| <i>Figure 5 le courant de la phase T avec <math>N_{cc}=0.02(2\%)</math>.....</i>  | <i>48</i> |
| <i>Figure 6 le courant de la phase R avec <math>N_{cc}=0.05(5\%)</math>.....</i>  | <i>49</i> |
| <i>Figure 7 le courant de la phase S avec <math>N_{cc}=0.05(5\%)</math>.....</i>  | <i>50</i> |
| <i>Figure 8 le courant de la phase T avec <math>N_{cc}=0.05(5\%)</math>.....</i>  | <i>50</i> |
| <i>Figure 9 le courant de la phase R avec <math>N_{cc}=0.09(9\%)</math>.....</i>  | <i>51</i> |
| <i>Figure 10 le courant de la phase S avec <math>N_{cc}=0.09(9\%)</math>.....</i> | <i>51</i> |
| <i>Figure 11 le courant de la phase T avec <math>N_{cc}=0.09(9\%)</math>.....</i> | <i>52</i> |
| <i>Figure 12 La machine en défaut.....</i>  | <i>52</i> |
| <i>Figure 13 analyse parFFT.....</i>  | <i>53</i> |

### Chapitre 4

|  |           |
|--|-----------|
| <i>Figure 1 logique booléenne.....</i> | <i>55</i> |
|--|-----------|

|   |    |
|---|----|
| <i>Figure 2</i> logique flou. ....  | 55 |
| <i>Figure 3</i> Représentation d'un sous-ensemble flou et principales caractéristiques.....                                 | 57 |
| <i>Figure 4</i> Représentation d'une variable linguistique définie comme $\{ U, V, T_v = \{ A_1, A_2, A_3, A_4 \} \}$ ..... | 58 |
| <i>Figure 5</i> Notions de spécificité et de précision représentées à l'aide de sous-ensembles flous.....                   | 58 |
| <i>Figure 6</i> Structure générale.....   | 61 |
| <i>Figure 7</i> Différentes méthodes de défuzzification.....  | 64 |
| <i>Figure 8</i> courts-circuits de 2%.....  | 65 |
| <i>Figure 9</i> courts-circuits de 5 %.....   | 65 |
| <i>Figure 10</i> courts-circuits 9%.....  | 65 |
| <i>Figure 11</i> la fonction d'appartenance des entrées cc1 et cc2.....   | 67 |
| <i>Figure 12</i> la fonction d'appartenance de sortie cc.....   | 69 |

## **Tables des Notations et Symboles**

### **Paramètres de modélisation de la machine**

[L<sub>s</sub>],[L<sub>r</sub>] :Représentent respectivement les matrices d'inductance statorique et rotorique

[M<sub>sr</sub>]: Correspond à la matrice des inductances mutuelles stator-rotor

R<sub>s</sub> : Résistance statorique par phase

R<sub>r</sub> : Résistance rotorique par phase

P : Nombre de paires de pôles

J : Moment d'inertie des parties tournantes

f : Coefficient de frottements visqueux

M : inductance mutuelle

### **Repères**

R,S, T : Correspondent aux trois phases du stator

r, s, t : Correspondent aux trois phases du rotor

$\alpha,\beta$  : Axes de référentiel statoriques

d,q : Axes de référentiel de Park

$\theta$  : L'angle entre l'axe R et r

### **Grandeurs électriques au stator**

V<sub>s RST</sub> : Tension statoriques des phases R, S, ou T

V<sub>s $\alpha$</sub>  : Tension statorique sur l'axe  $\alpha$

V<sub>s $\beta$</sub>  : Tension statorique sur l'axe  $\beta$

i<sub>s RST</sub> : Courant statorique phase R, S, ou T

i<sub>s $\alpha$</sub>  : Courant statorique sur l'axe  $\alpha$

i<sub>s $\beta$</sub>  : Courant statorique sur l'axe  $\beta$

### **Grandeurs magnétiques au stator**

$\Phi_{s RST}$  : Flux statorique phase R, S, ou T

$\Phi_{s\alpha}$  : Flux statorique sur l'axe  $\alpha$

$\Phi_{s\beta}$  : Flux statorique sur l'axe  $\beta$

n<sub>s</sub> : Nombre de spires sur une phase sans défaut

### **Grandeurs électriques au rotor**

$V_{rst}$  : Tension rotorique phase r, s, ou t

$i_{rst}$  : Courant rotorique phase r, s, ou t

$V_{r\alpha}$  : Tension rotorique sur l'axe  $\alpha$

$V_{r\beta}$  : Tension rotorique sur l'axe  $\beta$

$i_{r\alpha}$  : Courant rotorique sur l'axe  $\alpha$

$i_{r\beta}$  : Courant rotorique sur l'axe  $\beta$

### **Grandeurs magnétiques au rotor**

$\Phi_{rst}$  : Flux rotorique phase r, s, ou t

$\Phi_{r\alpha}$  : Flux rotorique sur l'axe  $\alpha$

$\Phi_{r\beta}$  : Flux rotorique sur l'axe  $\beta$

### **Grandeurs mécaniques**

$\omega_s$  : Pulsation électrique statorique

$\omega_r$  : Pulsation électrique rotorique

### **Grandeurs du court -circuit**

$i_{cc}$  : courant du court-circuit

$N_{cc}$  : rapport du nombre de spires en court-circuit sur le nombre total de spires

$B_{cc}$  : bobine du court-circuit

$R_{cc}$  : résistance du court-circuit

$\theta_{cc}$  : L'angle du court-circuit

$\Phi_{cc}$  ;flux du court-circuit

$L_{cc}$  : inductance du court-circuit

$M_{scc}$  : inductance mutuelle statorique du court-circuit

$M_{ccr}$  : inductance mutuelle rotorique du court-circuit

$i_{acc}$  : courant du court-circuit du l'axe  $\alpha$

## ***Tables des Notations et Symboles***

---

$i_{\beta cc}$  : courant du court-circuit de l'axe  $\beta$

$\Phi_{\alpha cc}$  : flux du court-circuit de l'axe  $\alpha$

$\Phi_{\beta cc}$  : flux du court-circuit de l'axe  $\beta$

FFT : transformé de Fourier rapide

$f$  : Fréquence

N : nombre d'échantillons

# Introduction Générale

Aujourd'hui, l'évolution dans le domaine des entraînements électriques à vitesse variable qui permettent d'optimiser les processus industriels tout en réduisant l'énergie et la matière consommée en vue de leur fabrication est particulièrement rapide. Cette évolution est à la fois quantitative par la puissance unitaire des équipements, et qualitative par la précision, la souplesse et la fiabilité de ces équipements.

Les moteurs à courants alternatifs utilisés dans les entraînements électriques à vitesse variable sont en grande majorité des moteurs asynchrones à cage, grâce à leur robustesse, leur puissance massique et leur faible coût. Cependant, il n'est pas exclu qu'il peut y apparaître des défauts tant au niveau du stator que du rotor. À cet effet leur maintenance et leur diagnostic sont devenus un enjeu économique. Par conséquent, il est recommandé de détecter de manière précoce des défaillances afin d'y remédier dans des délais les plus brefs pour minimiser les effets induits sur l'installation électrique ou sur la machine elle-même.

Le diagnostic et la surveillance d'un dispositif sont passés généralement par la connaissance de son comportement sain, la maîtrise totale des différents modes de fonctionnement est alors indispensable lorsqu'on envisage une surveillance avancée du processus. La difficulté de la détection de défaut vient de la pluridisciplinarité des connaissances qu'elle nécessite. L'étude des entraînements relève tout à la fois de l'électrotechnique, de l'électronique de puissance, de la mécanique, de l'automatique et de l'informatique. Il n'est pas possible de dissocier ces différentes disciplines.

L'application de la technique de la logique floue pour le diagnostic et la classification de défaut du court circuit dans les phases statorique d'une machine asynchrone est basée sur les informations fournies par l'analyse fréquentielle (FFT) du courant statorique de la machine en régime permanent.

Ce système de surveillance permettra de fournir des informations sur le fonctionnement de la machine aux opérateurs qui l'exploitent. Il est capable aussi de provoquer dans les cas graves un arrêt de la machine ou de permettre au système de production de continuer de fonctionner en mode dégradé en cas de problème ne nécessitent pas un arrêt immédiat.

## Organisation du mémoire

Ce travail s'inscrit dans le domaine de la détection et du diagnostic des défauts d'une machine asynchrone triphasée à cage par l'application de la technique de la logique floue. L'analyse du courant statorique est plus riche en information, pour la détection et la classification des défauts électriques. Les méthodes de traitement numérique de base utilisée est la transformée de Fourier rapide (FFT).

✓ Ce mémoire est organisé en quatre chapitres complémentaires :

Dans le premier chapitre de ce mémoire, nous donnons des généralités sur les différentes techniques de diagnostic notamment le diagnostic interne et externe.

Dans le deuxième chapitre, nous avons évoqué au début des généralités sur les machines asynchrones à cage. Par la suite, nous sommes passés à la modélisation de la machine asynchrone. L'étape de la modélisation en vue du diagnostic des machines électriques est délicate puisque le diagnostic par la technique de la logique floue est basée sur les résultats de la simulation de ce modèle. Il est donc essentiel de connaître la mise en équations du comportement dynamique des machines à courant alternatif pour en déduire les schémas fonctionnels à partir desquels la technique de diagnostic peut être conçue. À cet effet, nous avons essayé d'éclaircir le mieux possible la transformation de Park de moteur asynchrone pour obtenir un modèle analytique qui imite au mieux le comportement du système à diagnostiquer. À la fin de ce chapitre, nous avons donné les résultats de simulation sans défaut qui imite le comportement de la MAS à cage lors de l'alimentation par un réseau triphasé.

Pour le troisième chapitre, nous l'avons consacré à la présentation et la modélisation de la machine asynchrone incluant des dysfonctionnements de type de court-circuit statorique. Nous commençons par une modélisation de cette machine avec modèle biphasé on tien compte de défaut court-circuit entre spires que nous le finissons par des simulations et Interprétation du modèle avec défaut alimenté par un réseau triphasé.

Pour le dernier chapitre, nous donnons des définitions et des propriétés sur la technique de diagnostic par la logique floue. Nous commençons par donner des généralités et les applications principales de la logique floue. Nous l'avons consacré à l'application de la technique de la logique floue sur l'allure fréquentielle de courant statorique du moteur asynchrone pour la détection et la classification de défaut. Des résultats de simulations sont présentés et interprétés.

### 1. introduction :

Dans ce chapitre, nous décrivons le système étudié qui se limite, dans notre cas, à la machine asynchrone triphasée à cage d'écureuil. Après avoir rappelé les éléments de constitution de cette machine, nous effectuons une analyse des différents défauts pouvant survenir sur la machine asynchrone, et les techniques utilisées pour le diagnostic de défaut dans la machine asynchrone à cage d'écureuil.

### 2. Qu'est-ce que le diagnostic ? :

Le diagnostic est une tâche hautement cognitive centrale dans de nombreux domaines, l'objectif visé par le diagnostic consiste à déterminer les causes d'un dysfonctionnement à partir d'observation et de symptômes constatés c'est-à-dire la détection et la localisation d'un composant ou un élément défectueux dans un système dynamique [1].

#### 2.1 Terminologie :

Avant d'aller plus loin, il faut définir les termes suivants :

##### 2.1.1 Fonctionnement normal d'un système :

Un système est dit dans un état de fonctionnement normal lorsque les variables le caractérisant (variables d'état, variables de sortie, variables d'entrée, paramètres du système) demeurent au voisinage de leurs valeurs nominales. Le système est dit défaillant dans le cas contraire.

##### 2.1.2 Défaut :

Le concept de défaut est fondamental dans les opérations de surveillance pour la conduite et maintenance des procédés industriels. On appelle défaut tout écart entre la caractéristique observée sur le dispositif et la caractéristique théorique. Cet écart est idéalement nul en l'absence de défaut. Les défauts peuvent apparaître au niveau des capteurs, des actionneurs ou au niveau du processus lui-même.

##### 2.1.3 Défaillance :

Une défaillance est l'altération ou la cessation de l'aptitude d'un ensemble à accomplir sa ou ses fonctions requises avec les performances définies dans les spécifications techniques. Une défaillance est un dysfonctionnement du système, le processus présente alors un fonctionnement inacceptable du point de vue des performances. Il est clair qu'une défaillance implique l'apparition d'un défaut puisqu'il existe un écart entre la caractéristique

mesurée et théorique. Par contre, un défaut n'implique pas nécessairement une défaillance puisque le dispositif peut très bien continuer à assurer sa fonction principale.

#### 2.1.4 Panne :

Une panne est l'inaptitude d'un dispositif à accomplir une fonction requise. Une panne résulte toujours d'une défaillance et d'un défaut :



Dans le cadre de la maintenance préventive conditionnelle, il est clair que le diagnostic doit permettre de détecter et de localiser un défaut avant que celui-ci ne conduise à une défaillance ou à une panne qui entraînerait l'arrêt du système.

#### 2.2 La Supervision :

La supervision comporte trois fonctions : la détection, la localisation, la décision.

##### 2.2.1 La détection :

La détection consiste à reconnaître qu'un dispositif est dans un mode de dysfonctionnement à partir de la connaissance de certaines caractéristiques.

##### 2.2.2 La localisation :

La localisation consiste à déterminer les causes physiques ou fonctionnelles d'une panne, c'est-à-dire à déterminer le ou les éléments à l'origine du défaut.

##### 2.2.3 La décision :

Elle consiste en premier lieu à décider quel est le mode de fonctionnement dans lequel on désire placer le dispositif (mode dégradé ou mode de fonctionnement normal). Ensuite, il s'agit de définir précisément quelles sont les actions à entreprendre pour atteindre ce mode.

### 3. Eléments de constitution—Fonctionnement de la machine asynchrone à cage d'écureuil:

#### 3.1 Eléments de constitution de la machine asynchrone :

La machine asynchrone (figure1) est constituée des principaux éléments (figure2) suivants [2][3][4]:

- le stator (partie fixe) constitué de disques en tôles magnétiques portant les enroulements chargés de magnétiser l'entrefer.
- le rotor (partie tournante) constitué de disques en tôles magnétiques empilés sur l'arbre de la machine portant un enroulement injecté.
- les organes mécaniques permettant la rotation du rotor et le maintien des différents sous-ensembles.



Figure 1 photo réelle de la machine asynchrone à cage d'écureuil.

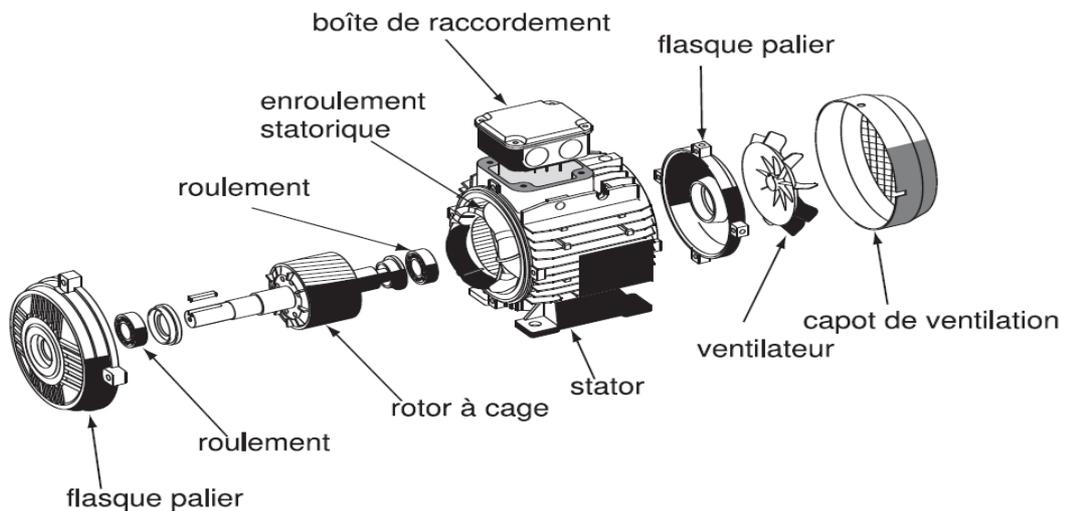


Figure 2 les éléments de la machine asynchrone à cage d'écureuil.

### 3.1.1 Stator :

Il est constitué d'un enroulement bobiné réparti dans les encoches du circuit magnétique. Ce circuit magnétique est constitué d'un empilage de tôles dans lesquelles sont découpées

des encoches parallèles à l'axe de la machine (figure 3). Le bobinage statorique peut se décomposer en deux parties : les conducteurs d'encoches et les têtes de bobines. Les conducteurs d'encoches permettent de créer dans l'entrefer le champ magnétique à l'origine de la conversion électromagnétique. Les têtes de bobines permettent, quant à elles, la fermeture des courants en organisant la circulation judicieuse des courants d'un conducteur d'encoche à l'autre. L'objectif est d'obtenir à la surface de l'entrefer une distribution de courant la plus sinusoïdale possible, afin de limiter les ondulations du couple électromagnétique.



*Figure 3 Photo du stator d'une machine asynchrone.*

### 3.1.2 Rotor :

Dans le rotor à cage (figure 4) , les anneaux de court-circuit permettent la circulation des courants d'un conducteur d'encoche (barre rotorique) à l'autre. Ces barres conductrices sont régulièrement réparties, et constituent le circuit du rotor. Cette cage est insérée à l'intérieur d'un circuit magnétique constitué de disques en tôles empilés sur l'arbre de la machine. Les conducteurs sont réalisés par coulage d'un alliage d'aluminium, ou par des barres massives de cuivre préformées et frettés dans les tôles du rotor. Il n'y a généralement pas, ou très peu, d'isolation entre les barres rotoriques et les tôles magnétiques, mais leur résistance est suffisamment faible pour que les courants de fuite dans les tôles soient négligeables, sauf lorsqu'il y a une rupture de barre.

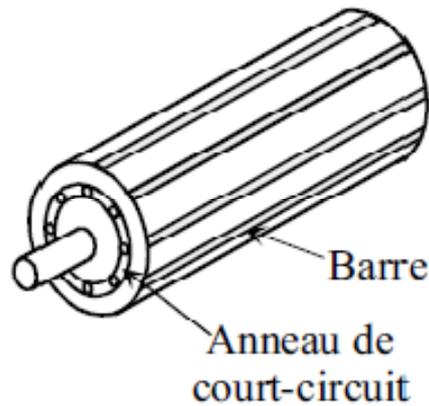


Figure 4 le rotor d'une machine asynchrone.

### 3.1.3 Les organes mécaniques :

La carcasse sert de support, elle joue le rôle d'enveloppe et assure la protection contre l'environnement extérieur.

L'arbre est un organe de transmission. Il comprend une partie centrale qui sert de support au corps du rotor et un bout d'arbre sur lequel est fixé un demi-accouplement. Il est généralement constitué en acier moulé ou forgé. Son dimensionnement est fonction des efforts de flexion (force centrifuge qui s'exerce sur lui, attraction magnétique radiale, etc...), des efforts radiaux et tangentiels dus aux forces centrifuges, des efforts de torsion (couple électromagnétique transmis en régime permanent, transitoire). Il est supporté par un ou plusieurs paliers. Ces paliers soutiennent le rotor et assurent la libre rotation. Le second palier est libre pour assurer les dilatations thermiques de l'arbre. Une isolation électrique de l'un des paliers assure l'élimination des courants dans l'arbre dû aux dissymétries des réluctances du circuit magnétique. Ils sont généralement à roulements pour les machines de petite et moyenne puissance.

### 4. Les défaillances de la machine asynchrone :

Bien que la machine asynchrone à cage d'écureuil soit réputée robuste, elle peut parfois présenter différents types de défauts. Ces défauts peuvent être soit d'origine électrique, soit d'origine mécanique. Un problème minime à l'étape de fabrication peut être à l'origine d'un défaut tout comme une utilisation non conforme de la machine. Certaines fois, nous pouvons aussi incriminer le milieu dans lequel la machine est utilisée (milieux corrosifs et/ou chimiques hostiles) [5].

#### 4.1 Défaillances d'ordre mécanique :

Les défaillances d'ordre mécaniques sont, en général, les plus rencontrées parmi tous les défauts que compte la machine asynchrone. Ces défauts peuvent apparaître au niveau des roulements à billes, des flasques ou encore de l'arbre moteur. Nous énumérons, dans la suite du document, certains de ces défauts sans pour autant en donner les détails.

Nous pouvons trouver dans la littérature des ouvrages très complets qui traitent de ces divers problèmes.

##### 4.1.1 Défaillances des roulements :

Les roulements à billes jouent un rôle très important dans le fonctionnement de tout type de machines électriques. Les défauts de roulements peuvent être causés par un mauvais choix de matériau à l'étape de fabrication. Les problèmes de rotation au sein de la culasse du roulement, causés par un roulement abîmé, écaillé ou assuré, peuvent créer des perturbations au sein de la machine. Nous savons que des courants électriques circulent au niveau des roulements d'une machine asynchrone ce qui, pour des vitesses importantes, peut provoquer la détérioration de ces derniers. La graisse, qui permet la lubrification et la bonne rotation des roulements peut, dans certaines applications, se rigidifier et causer une résistance à la rotation. L'analyse vibratoire de la machine ou l'analyse harmonique des courants statoriques permet de détecter ce type de défaillances.

##### 4.1.2 Défaillances du flasque :

Les défauts créés par les flasques de la machine asynchrone sont le plus généralement causés à l'étape de fabrication. En effet, un mauvais positionnement des flasques provoque un désalignement des roulements à billes, ce qui induit une excentricité au niveau de l'arbre de la machine. Il est possible de détecter ce type de défaillance par une analyse vibratoire ou une analyse harmonique des courants absorbés par la machine.

##### 4.1.3 Défaillances de l'arbre :

L'arbre de la machine peut laisser paraître une usure due à l'utilisation d'un mauvais matériau lors de sa construction. A court ou long terme, cette usure peut mener à une fracture nette de l'arbre provoquant ainsi un arrêt irrémédiable de la machine asynchrone. Les milieux corrosifs peuvent aussi affaiblir la robustesse de l'arbre de la machine. Par exemple, l'humidité peut provoquer des microfissures et conduire à une destruction complète de la machine. Une excentricité statique, dynamique ou mixte peut induire des

efforts considérables sur l'arbre moteur, amenant ainsi une fatigue supplémentaire. Une analyse vibratoire, une analyse par ultrason, une analyse fréquentielle des courants absorbés ou simplement une analyse visuelle de l'arbre de la machine permet de détecter ce type de défaillance.

#### 4.2 Défaillances d'ordre électrique :

Les défaillances d'origine électrique peuvent, dans certain cas, être la cause d'un arrêt de la machine (au même titre que les défaillances d'ordre mécanique). Ces défaillances se séparent en deux catégories bien distinctes. Nous pouvons citer les défaillances qui apparaissent au niveau des circuits électriques statoriques et celles qui apparaissent au niveau des circuits électriques rotoriques.

##### 4.2.1 Défaillances au stator :

Pour le stator, les défaillances sont principalement dues à un problème :

- thermique (surcharge,...)
- électrique
- mécanique (bobinage,...)
- environnemental (agression,...)

Les défauts qui sont les plus récurrents, localisés au niveau du stator, peuvent être définis comme suit :

- défaut d'isolant
- court-circuit entre spires
- court-circuit entre phases
- court-circuit phase/bâti
- déséquilibre d'alimentation
- défaut de circuit magnétique

##### 4.2.1.1 Défauts d'isolant dans un enroulement :

La dégradation des isolants dans les enroulements peut provoquer des courts-circuits. En effet, les différentes pertes (Joule, fer, mécanique,...) engendrent des phénomènes thermiques se traduisant par une augmentation de la température des différents constituants du moteur. Or les matériaux d'isolation ont une limite de température, de tension et mécanique. De ce fait, si l'environnement de travail d'un matériau d'isolation

dépasse une de ces limites, ce matériau se dégrade de manière prématurée ou accélérée, puis finit par ne plus assurer sa fonction.

Dans ce cas, un court-circuit peut apparaître dans l'enroulement concerné. Les différentes causes pour ce type de défaut sont :

- dégradation de l'isolant à la fabrication.
- tension de l'enroulement supérieure à la limite du matériau d'isolation.
- courant élevé dans l'enroulement dû à un court-circuit, un défaut du convertisseur, une surcharge. Ceci entraîne une élévation de la température dégradant prématurément le matériau d'isolation.
- vibrations mécaniques.
- vieillissement naturel des isolants. Tous les matériaux isolants ont une durée de vie limitée. Même dans une utilisation 'normale', l'isolant finit naturellement par se dégrader.
- fonctionnement dans un environnement sévère.

#### 4.2.1.2 Court-circuit entre spires

Un court-circuit entre spires de la même phase est un défaut assez fréquent. Cette défaillance a pour origine un ou plusieurs défauts d'isolant dans l'enroulement concerné. Il entraîne une augmentation des courants statoriques dans la phase affectée, une légère variation de l'amplitude sur les autres phases, modifie le facteur de puissance et amplifie les courants dans le circuit rotorique. Ceci a pour conséquence une augmentation de la température au niveau du bobinage et, de ce fait, une dégradation accélérée des isolants, pouvant provoquer ainsi, un défaut en chaîne (apparition d'un 2ème court-circuit). Par contre, le couple électromagnétique moyen délivré par la machine reste sensiblement identique hormis une augmentation des oscillations proportionnelle au défaut.

#### 4.2.1.3 Court-circuit entre phases :

Ce type de défaillance peut arriver en tout point du bobinage, cependant les répercussions ne seront pas les mêmes selon la localisation. Cette caractéristique rend difficile une analyse de l'incidence de ce défaut sur le système.

L'apparition d'un court-circuit proche de l'alimentation entre phases, induirait des courants très élevés qui conduiraient à la fusion des conducteurs d'alimentation et/ou à la disjonction par les protections. D'autre part, un court-circuit proche du neutre entre deux phases engendre un déséquilibre sans provoquer la fusion des conducteurs.

Les courants statoriques sont totalement déséquilibrés et ce déséquilibre est proportionnel au défaut qui apparaît. Les courants dans les barres ainsi que dans les anneaux sont augmentés lors de l'apparition de ce défaut. La détection de ce type de défaut peut reposer sur le déséquilibre des courants de phases.

#### 4.2.1.4 Court-circuit phase/bâti :

Le bâti a généralement un potentiel flottant, mais pour des raisons de liaisons mécaniques, il est souvent relié à la masse. Si le potentiel est flottant, un court-circuit entre l'enroulement et le bâti n'a pas d'importance du point de vue matériel, excepté les effets capacitifs, le bâti prend alors le potentiel de l'enroulement à l'endroit du court-circuit. Par contre, au niveau de la sécurité des personnes, ce type de défaut peut être très dangereux et il est alors nécessaire de mettre en place des dispositifs de protection (disjoncteurs différentiels). En présence de ce type de défaillance, la tension de la phase concernée ne change pas. Cependant le courant circulant dans cette phase augmente avec la réduction de la résistance et de l'inductance. Cette augmentation du courant se traduit par une augmentation de la température pouvant entraîner des défauts d'isolant dans l'enroulement. De plus, cette défaillance va générer une composante homopolaire entraînant l'apparition d'un couple pulsatoire. Une mesure du courant de fuite pourrait permettre de détecter ce type de défaut.

#### 4.2.1.5 Défautes de circuit magnétique :

Ces défauts aboutissent dans la plupart des cas à une dissymétrie au niveau du fonctionnement de la machine, qui à son tour peut accentuer le problème par des phénomènes de surchauffe, de surtension, d'élévation importante du courant, etc.

#### 4.2.2 Défaillances au rotor :

Pour le rotor, les défaillances sont essentiellement dues à un problème :

- thermique (surcharge,...)
- électromagnétique
- résiduel (déformation,...)
- dynamique (arbre de transmission,...)
- mécanique (roulement,...)
- environnemental (agression,...)

Les défauts qui sont les plus récurrents, localisés au niveau du rotor, peuvent être définis comme suit :

- Rupture de barres

- Rupture d'une portion d'anneau de court-circuit
- Excentricité statique et dynamique

#### 4.2.2.1 Ruptures de barres

La cassure ou rupture de barre est un des défauts les plus fréquents au rotor. Elle peut se situer soit au niveau de son encoche soit à l'extrémité qui la relie à l'anneau rotorique. La détérioration des barres réduit la valeur moyenne du couple électromagnétique et augmente l'amplitude des oscillations, qui elles-mêmes provoquent des oscillations de la vitesse de rotation, ce qui engendre des vibrations mécaniques et donc, un fonctionnement anormal de la machine. La grande amplitude de ces oscillations accélère la détérioration de la machine. Ainsi, le couple diminue sensiblement avec le nombre de barres cassées induisant un effet cumulatif de la défaillance. L'effet d'une cassure de barre croît rapidement avec le nombre de barres cassées.

#### 4.2.2.2 Ruptures d'anneaux

La rupture de portion d'anneau est un défaut qui apparaît aussi fréquemment que la cassure de barres. Ces ruptures sont dues soit à des bulles de coulées ou aux dilatations différentielles entre les barres et les anneaux.

Comme il est difficile de le détecter, ce défaut est généralement groupé, voir confondu, avec la rupture de barres dans les études statistiques. Ces portions d'anneaux de court-circuit véhiculent des courants plus importants que ceux des barres rotoriques. De ce fait, un mauvais dimensionnement des anneaux, une détérioration des conditions de fonctionnement (température, humidité,...) ou une surcharge de couple et donc de courants, peuvent entraîner leur cassure. La rupture d'une portion d'anneau déséquilibre la répartition des courants dans les barres rotoriques et de ce fait, engendre un effet de modulation d'amplitude sur les courants statoriques similaire à celui provoqué par la cassure de barres.

#### 4.2.2.3 Excentricité statique et dynamique :

Parfois, la machine électrique peut être soumise à un décentrement du rotor, se traduisant par des oscillations de couple (décalage entre le centre de rotation de l'arbre et le centre du rotor). Ce phénomène est appelé excentricité (statique et dynamique) dont l'origine peut être liée à un positionnement incorrect des paliers lors de l'assemblage, à un défaut roulement (usure), à un défaut de charge, ou à un défaut de fabrication (usinage). Trois cas d'excentricité sont généralement distingués :

- l'excentricité statique, le rotor est déplacé du centre de l'alésage stator mais tourne toujours autour de son axe
- l'excentricité dynamique, le rotor est positionné au centre de l'alésage mais ne tourne plus autour de son axe.
- l'excentricité qu'on pourrait qualifier de 'mixte', associant les deux cas précédemment cités. Ce défaut modifie le comportement magnétique ainsi que mécanique de la machine. En effet, l'augmentation de l'excentricité dans l'entrefer induit une augmentation des forces électromagnétiques qui agissent directement sur le noyau statorique ainsi que l'enroulement correspondant, ce qui engendre une dégradation de son isolation. D'autre part, cette augmentation peut avoir comme conséquence des frottements entre le stator et le rotor en raison des forces d'attraction magnétique qui déséquilibrent le système. Ceci donne naissance à des niveaux de vibration considérables dans les enroulements.

#### 5. Techniques de diagnostic [6][7]:

Le diagnostic de défauts d'un système peut passer par les étapes suivantes :

##### 1- Structuration de la connaissance :

- Comprendre le fonctionnement du système à diagnostiquer ou à surveiller.
- Evaluer l'apparition de défauts ou de pannes. Cela se fait soit par des analyses logiques du processus de fonctionnement. Citons par exemple, l'effet de surchauffe du moteur qui provoquerait une dégradation des isolants des conducteurs et par conséquent, engendrerait des courts-circuits dans les bobinages. Soit par des études statistiques faites généralement dans l'industrie sur un large panel de machines. L'expérience des praticiens est aussi une source fiable et précieuse d'informations.
- Une troisième étape consiste à hiérarchiser les défauts sur la base de leur impact sur le fonctionnement de la machine et sur leur fréquence d'apparition. Ceci permet de focaliser l'étude sur un nombre limité de défauts et d'éviter ainsi de mobiliser des ressources.

2- Réduction des sources d'information : ceci consiste à identifier les signaux pertinents à l'identification des défauts sélectionnés au préalable, et permet ainsi de réduire le nombre de capteurs et donc le coût de la surveillance.

3- Procédure de détection : il s'agit de développer les outils nécessaires à la synthèse de résidus significatifs de l'apparition de défauts.

4- Diagnostic et pronostic : Il s'agit dans cette étape de faire le lien entre le résidu et le défaut dans la machine, ensuite, de prendre les mesures nécessaires pour minimiser l'impact de la panne ou de réparer. Dans une machine asynchrone, la cassure d'une barre au rotor implique, selon le type d'utilisation du moteur, la prévision d'une réparation dans un délai plus ou moins appréciable, alors qu'un court-circuit sérieux entre deux phases impliquent une intervention immédiate.

### 5.1 Méthode d'analyse des signaux obtenus sans modèle (diagnostic externe) :

Ces méthodes se fondent sur l'analyse des mesures que fournit la machine lors de son fonctionnement. Une comparaison entre le spectre du courant d'alimentation et celui du signal fourni par un capteur de vibration montre que l'utilisation des courants statoriques est très intéressante pour le diagnostic, puisque les informations présentes dans l'analyse des courants englobent celles trouvées dans l'analyse vibratoire et celles liées aux phénomènes électriques. La technique d'analyse en temporel ou en fréquentiel identifie le comportement optimal de la machine dans le cas où elle est saine et compare les résultats avec ceux obtenus en présence de défaut.

Dans cette partie nous présentons l'utilisation de différentes techniques d'analyse temps/fréquence. Quelques méthodes ont été appliquées sur le moteur asynchrone présenté précédemment.

#### 5.1.1 Analyse fréquentielle (La transformation de Fourier) :

Comme nous venons de le présenter, une défaillance sur le système étudié engendre l'apparition et/ou la modification d'harmoniques au niveau des spectres des signaux précédemment cités.

De nombreux outils de traitement du signal sont utilisés afin de caractériser les origines des défauts à partir des spectres.

Classiquement, la méthode la plus utilisée est la Transformée de Fourier (FFT). Il s'agit d'une méthode non paramétrique, qui se prête bien à l'analyse des phénomènes stationnaires.

La composante à la fréquence  $f$  d'un signal temporel  $x(t)$  s'exprime par :

$$X(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \cdot e^{-j \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot t} \quad (1.1)$$

Il est impossible d'analyser le signal sur une période infinie. Il est donc nécessaire de choisir une fenêtre de pondération pour l'analyse (fenêtre rectangulaire, de Hann, Hamming) pour

corriger les effets d'un fenêtrage temporel fini. De plus, outre la forme, la taille de la fenêtre aura une influence sur la résolution maximale possible.

Cependant, la FFT présente des limites quant au traitement des signaux en régime transitoire et nécessite un volume de calcul important (le pas d'analyse fréquentiel est inversement proportionnel à la durée de l'enregistrement et la bande de fréquence analysée doit être inférieure à  $f_e/2$  avec  $f_e$  la fréquence d'échantillonnage). En effet la précision fréquentielle dépend de la fréquence d'échantillonnage et du nombre  $N$  d'échantillons :

$$\Delta f = \frac{f_e}{\Delta t \cdot f_e} = \frac{f_e}{N} \quad (1.2)$$

La transformée de Fourier est surtout utilisée pour l'analyse des systèmes en régimes permanents. Cependant, il est possible de la mettre en oeuvre pour l'étude de fonctionnements dynamiques (lents), par la méthode du spectrogramme. Certaines études se basent sur cette analyse bi spectre. montre que l'intérêt de cette analyse est la prise en compte à la fois des informations sur l'amplitude et la phase. Le spectrogramme est le calcul répétitif de la transformée de Fourier sur une fenêtre temporelle glissant sur le signal. Son calcul sera donc soumis aux paramètres suivants :

- longueur de la fenêtre,
- type de fenêtre de pondération,
- longueur totale du signal analysé,
- pas de glissement de la fenêtre ou pas temporel.

#### 5.5.1.1 Fenêtres d'observation :

Les fenêtres utilisées en analyse spectrale sont nombreuses. On cite dans cette mémoire trois fenêtres les plus fréquemment appliquées à l'enregistrement d'un signal. Elles sont définies comme suit :

Les fenêtres utilisées en analyse spectrale sont nombreuses. On cite dans cette mémoire trois fenêtres les plus fréquemment appliquées à l'enregistrement d'un signal. Elles sont définies comme suit :

#### a. Fenêtre rectangulaire :

La figure ci-dessous montre la fenêtre rectangulaire.

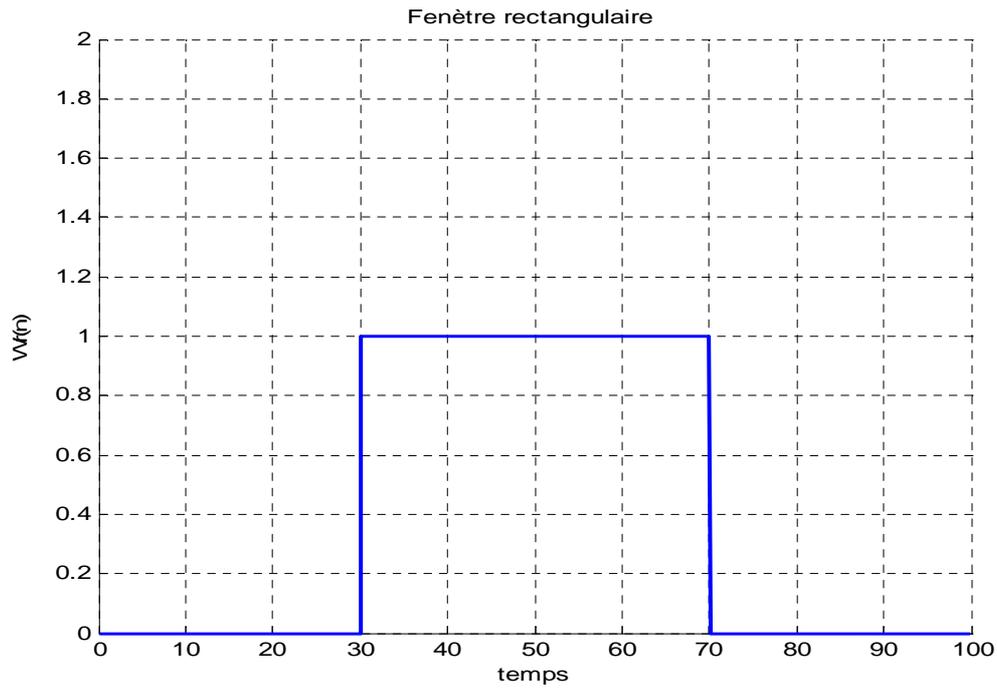


Figure 5 fenêtres rectangulaires.

b. Fenêtre Hann :

la figure suivante montre la fenêtre de Hann .

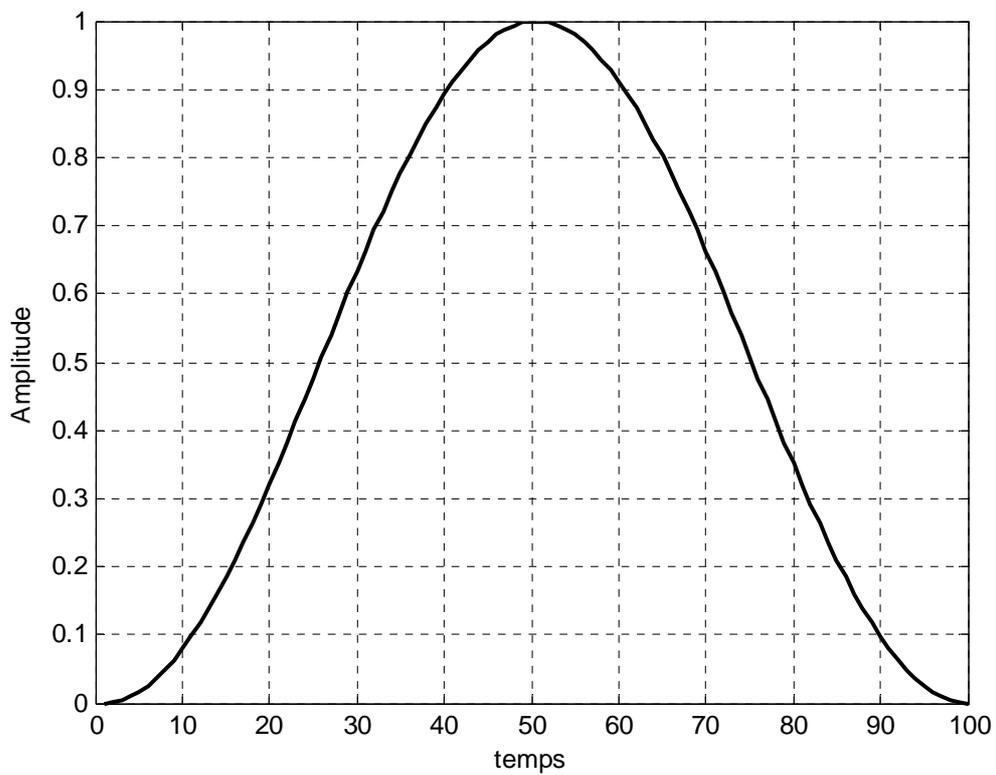
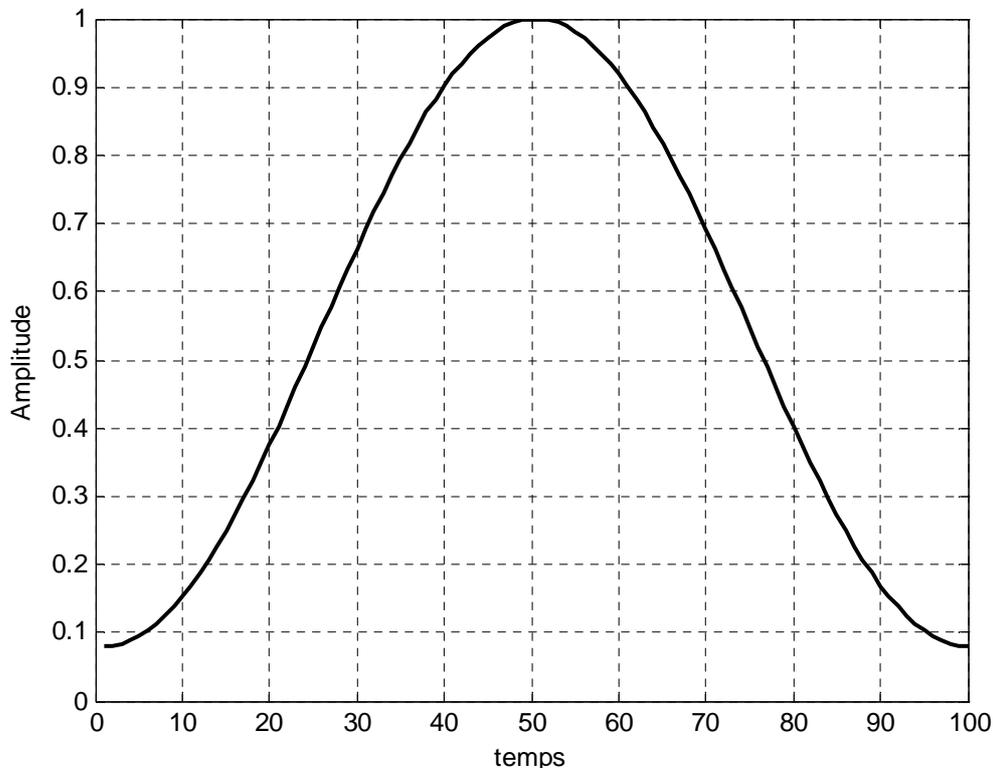


Figure 6 fenêtres de Hann.

### *b. Fenêtre Hamming :*

La figure illustré ci-dessous désigne la fenêtre de Hamming .



*Figure 7 fenêtres de Hamming.*

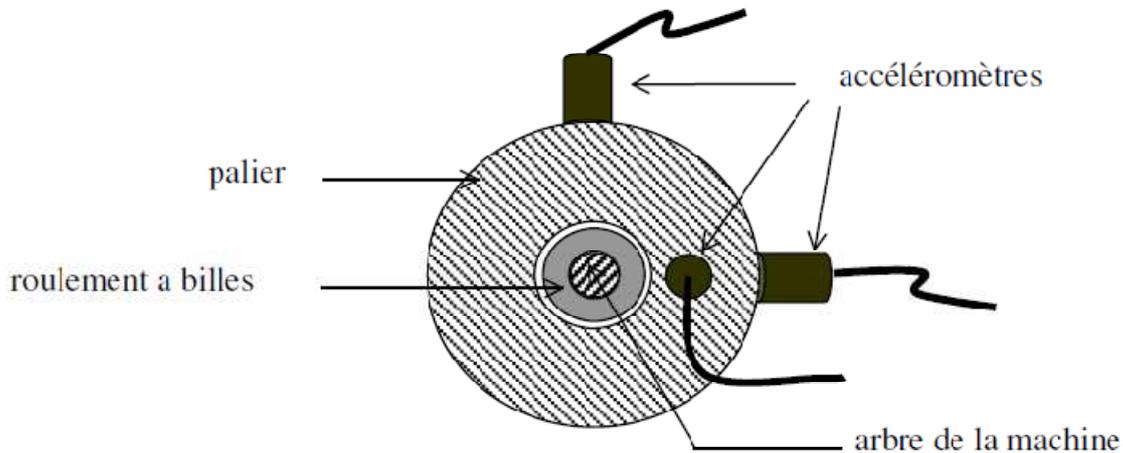
#### 5.5.1.2 Choix d'une fenêtre :

Le choix d'une fenêtre est un compromis entre une bonne définition spectrale et un étalement spectral aussi faible que possible. Qualitativement, leurs caractéristiques peuvent être résumées comme suit :

1. La fenêtre rectangulaire ne modifie pas l'enregistrement ; c'est celle que l'on utilisera dans le cas de signaux transitoires ou non permanents et, dans le cas de signaux périodiques, lorsque l'on est sûr que le nombre de périodes enregistrées est un entier.
2. La fenêtre en cosinus, dite de Hann, est mathématiquement la plus simple et elle offre de bons résultats dans le cas de composantes spectrales pas trop proches.
3. La fenêtre en cosinus relevé, dite de Hamming, n'élimine pas complètement l'étalement spectral. Elle offre en contre partie une meilleure définition spectrale mais ne permet pas de voir des composantes spectrales de faibles amplitudes.

### 5.1.2 Analyses vibratoires de la machine :

L'analyse vibratoire de la machine asynchrone peut être menée grâce à des accéléromètres placés sur les paliers dans les directions verticales, axiales et radiales.



*Figure 8 Mesures vibratoires sur la machine asynchrone.*

Les vibrations de la machine fournissent des informations sur pratiquement tous les défauts mécaniques fréquemment rencontrés. Plutôt que de disposer d'une étude au cas par cas, nous avons réalisé une synthèse de l'ensemble des informations que peuvent fournir ces signaux en fonction des défauts, à partir de la référence, qui présente une comparaison entre les signatures des courants et les signatures vibratoires. Nous avons remarqué que les composantes fréquentielles, qui permettent d'identifier les défauts cités, dépendent de la fréquence de rotation du rotor. De ce fait, ces signatures ne sont pas assez distinctes les unes par rapport aux autres. Leur utilisation poserait des problèmes de discrimination des types de défaut. Par contre, pour la détection d'un défaut ou d'un déséquilibre au rotor, les vibrations de la machine s'avèrent être des signaux pertinents.

### 5.1.3 Diagnostic des défauts par analyse du vecteur de Park :

Une représentation en deux dimensions peut être utilisée pour décrire le phénomène des moteurs asynchrones triphasés. Une des plus connues et des plus appropriées repose sur le calcul des courants dits de Park. En fonction des courants statoriques de phase  $i_R(t)$ ,  $i_S(t)$  et  $i_T(t)$ , les courants de Park  $i_d(t)$  et  $i_q(t)$  peuvent être calculés grâce aux deux relations suivantes[8] :

$$i_d(t) = \sqrt{\frac{2}{3}} i_R(t) - \frac{1}{\sqrt{6}} i_S(t) - \frac{1}{\sqrt{6}} i_T(t) \quad (1.3)$$

$$i_q(t) = \frac{1}{\sqrt{2}} i_R(t) - \frac{1}{\sqrt{2}} i_T(t) \quad (1.4)$$

D'après le vecteur du park  $[i_d(t), i_q(t)]$  on trace le courant  $i_q(t)$  en fonction de  $i_d(t)$  c'est-à-dire  $i_q(t) = f(i_d(t))$  de la machine avec un rotor sain et un rotor défaillant. Nous apercevons que le défaut rotorique induit un épaississement du contour du cercle, ce qui permet d'établir un diagnostic de défaut en effectuant une surveillance des déviations de ce cercle par rapport au modèle de base.

### 5.2 Méthodes d'obtention et d'analyse des signaux à base de modèles (diagnostic interne) :

Ces méthodes de détection reposent sur une connaissance à priori du système. Elles s'appuient sur la connaissance des paramètres caractéristiques du système étudié ou de variables représentatives développées à partir des acquisitions. Une comparaison entre les paramètres identifiés à un état de fonctionnement normal (sain) et ceux identifiés à un état de fonctionnement anormal nous alerte sur la présence de défaut.

L'utilisation de ces méthodes nécessite la connaissance au préalable des variations de ces paramètres dans les conditions de fonctionnement normales et lors de la présence de défaut.

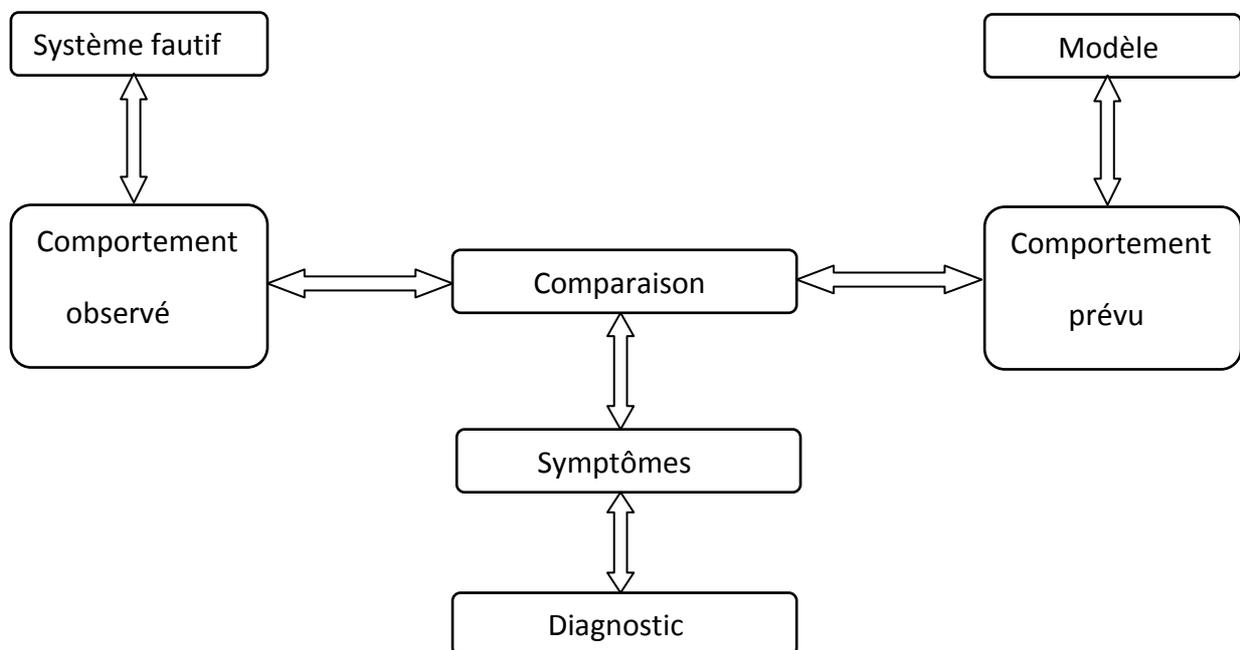


Figure 9 Diagnostic à base du modèle.

### 5.2.1 Techniques d'identification :

L'identification est la détermination, à partir de la connaissance des signaux d'entrées et de sorties, d'un modèle mathématique appartenant à une classe donnée pour lequel les comportements dynamiques ou statiques sont équivalents à ceux du processus au sens d'un critère donné.

Donc, le processus de diagnostic peut se faire suivant les étapes suivantes:

- Le choix d'un modèle mathématique.
- Le choix des signaux d'entrées et de sorties.
- Un critère de similitude entre le modèle et le processus.

Le processus d'identification se base par la suite sur un algorithme d'optimisation de l'erreur entre les paramètres du modèle et ceux du système étudié.

### 5.2.2 Techniques d'estimation d'état :

L'estimation des variables internes d'un système en se basant sur un modèle approché, comme par exemple l'estimation des flux ou des courants rotoriques ou statoriques dans la machine asynchrone sur la base du modèle de Park, peuvent donner dans certains cas des informations sur la présence de défauts.

L'observation, présentée plus loin, effectue la correction des variables estimées sur la base de mesures. Ces techniques permettent le suivi de grandeurs utilisées en commande ou pour le diagnostic.

### 5.2.3 Diagnostic des défauts par estimation paramétrique :

Cette méthode de diagnostic utilise les paramètres structuraux d'un modèle de connaissance et extrait par la suite les paramètres du système à partir des lois de connaissance pour détecter et localiser les défaillances. Le point essentiel dans l'efficacité de cette méthode est le choix du modèle de connaissance. En effet, le type de défaut que l'on voudra détecter sera fonction du modèle utilisé. Ces modèles n'ont besoin que de quatre paramètres pour effectuer le diagnostic de défaut ce qui, dans certain cas, ne permet pas de localiser avec précision la défaillance. L'étape suivante est donc nécessairement le passage à un modèle de connaissance plus fin de la machine, tout en gardant la possibilité d'identifier les paramètres souhaités. Ces modèles peuvent être des modèles triphasés, qui s'affranchissent de l'hypothèse d'une machine magnétiquement équilibrée, ou encore des modèles à n phases, capables de refléter le fonctionnement de la machine sur une large bande de fréquences. Des algorithmes spécifiques ont été élaborés pour l'estimation

séquentielle de paramètres. Le filtre de Kalman apparaît comme le plus adéquat de tous mais aussi le plus délicat à mettre en œuvre. Tout d'abord, en tant qu'algorithme d'identification en temps réel, le filtre de Kalman étendu délivre un modèle adaptatif, capable de prendre en compte les évolutions normales des paramètres de la machine telles que la variation des résistances (en fonction de la température) ou encore la variation des inductances (en fonction du niveau de saturation). Par ailleurs, les paramètres estimés, eux-mêmes, permettent une première analyse des conditions de fonctionnement de la machine. Par exemple, une augmentation anormale de la valeur des résistances statoriques peut signifier un échauffement excessif et donc une dégradation progressive des enroulements.

#### 5.2.4 Techniques des résidus :

Un test sur les résidus [9] permet de détecter une défaillance éventuelle. Les résidus sont des signaux générés à partir d'un modèle proche du système à surveiller. Ce modèle est de manière générale, constitué d'un ensemble de relations de contraintes dynamiques liant deux types de variables : des variables inconnues (variables internes, perturbations, entrées inconnues,...) et des variables connues (consignes, variables mesurées). Les résidus sont théoriquement nuls en fonctionnement normal et différents de zéro lorsqu'une défaillance survient. Plusieurs méthodes sont utilisées pour faire ressortir un résidu significatif de la présence de défaut. La difficulté majeure consiste à faire la liaison entre le résidu établi et un défaut particulier. établi l'identification de court-circuit de spires au bobinage statorique en utilisant la méthode d'erreur de prédiction sur le modèle d'erreur de sortie. Cette méthode effectue la minimisation du carré de l'erreur de sortie entre le signal estimé et le signal mesuré. Il étend l'identification des paramètres électriques de la machine à une variable représentant le comportement entré/sortie en modifiant le modèle de Park.

#### 5.3 Les approches modernes de diagnostic :

En dépit des diverses techniques mentionnées précédemment (diagnostic interne externe), ces dernières années, la surveillance et la détection de défaut des machines électriques se sont éloignées des techniques traditionnelles pour s'orienter vers des techniques dites d'intelligence artificielle (IA) [10][11]. Ces techniques apportent aux systèmes de diagnostic des moteurs électriques la fiabilité, l'automatisation, la praticité et la sensibilité. Ces méthodes ne sont pas en concurrence avec les méthodes précédemment citées. Elles exploitent les signatures avec ou sans modèle, décrites précédemment, pour réaliser la supervision et le diagnostic du système. Elles possèdent, par ailleurs, de grandes

facultés d'apprentissage. En effet, les récents développements dans le matériel et le logiciel permettent de produire un système pour la surveillance automatique des moteurs asynchrones en utilisant des techniques de traitement des signaux et des techniques de classification non supervisée pour le diagnostic des défauts.

Parmi ces méthodes, nous pouvons citer les systèmes experts, la logique floue, les réseaux neuronaux, la reconnaissance des formes,.... Dans cette partie, nous allons présenter quelques unes de ces techniques ainsi que leur application dans le domaine du diagnostic de la machine électrique. Elles sont présentées dans l'ordre chronologique de leur utilisation pour la surveillance des moteurs.

### 5.3.1 Les systèmes experts :

Les systèmes experts sont des outils conçus pour pouvoir modéliser l'approche des experts dans un domaine spécifique. Ils permettent de formaliser leurs connaissances et fournissent un mécanisme pour les exploiter. Lorsque le mode de représentation de la connaissance est de type symbolique, l'approche par système expert est favorisée. Dans ce cadre, la *connaissance a priori* sur le système est représentée par un ensemble de règles et de faits (données manipulées par les règles) qui constituent ce qu'on appelle la *base de connaissance*. Cette base est construite à l'aide d'outils d'aide à la formalisation, ces outils sont fortement liés à l'application. L'architecture générale d'un système expert se compose principalement de deux éléments : une base de connaissance et un moteur d'inférence . Le moteur d'inférence représente l'organe de résolution, son fonctionnement est basé sur des méthodes de résolution indépendantes du contexte. Une méthode de résolution inclut en général les étapes suivantes :

1. la sélection de règles dans la base de connaissance en fonction des faits établis,
2. la résolution des conflits entre les règles sélectionnées,
3. l'exécution en indiquant les conditions de déclenchement et les conséquences jusqu'à ce que le but recherché soit atteint, par exemple le diagnostic. En diagnostic, ce type d'approche est adapté aux problèmes nécessitant la manipulation d'une quantité importante de données non homogènes. Ils ont beaucoup été utilisés dans le diagnostic des systèmes statiques. Pour des systèmes dynamiques, ce type d'approche est peu adapté pour des problèmes de temps-réel et de gestion dynamique de l'information.

### 5.3.2 Les arbres de défaillances :

Il s'agit d'une méthode déductive qui vise à identifier pour chaque événement indésirable, l'ensemble des événements élémentaires qui peuvent contribuer à son apparition. Cette méthode est très employée dans les domaines de l'automobile, du nucléaire, de la chimie, de l'aéronautique, etc... pour évaluer la fiabilité d'un système. Elle consiste en une recherche exhaustive des combinaisons possibles d'événements qui conduisent à un défaut de fonctionnement ou une panne. La représentation la plus utilisée est celle qui associe à chaque événement indésirable la liste de tous les enchaînements logiques des événements jusqu'à arriver à des événements de base qui ne nécessitent pas de développements plus poussés.

Quand l'arbre est établi et les probabilités des événements élémentaires connues, la probabilité de l'événement indésirable et les combinaisons les plus probables conduisant à son apparition peuvent être déterminées.

Cette méthode présente différents avantages :

- Elle permet d'analyser toutes les causes possibles d'un défaut et donc d'améliorer la conception du système.
- La décomposition arborescente permet un diagnostic relativement rapide des défauts.

Cependant, cette méthode présente plusieurs inconvénients :

- Le principal vient de l'exhaustivité nécessaire pour établir le diagnostic : uniquement les causes prévues peuvent être déduites. La difficulté réside en la lourdeur de la mise en oeuvre de la méthode pour un système complexe.
- Connaître jusqu'à quel niveau de décomposition l'analyse peut être menée.
- La méthode est difficile à utiliser pour des systèmes complexes fortement interconnectés. Une étude exhaustive de tous les défauts et de leurs combinaisons s'avère rédhibitoire pour un entraînement.

Dans le domaine des entraînements, des arbres de défaillances ont été utilisés pour analyser les pannes de cartes analogiques de commande. L'idée était d'analyser les causes de quelques combinaisons de signaux logiques issus de protections pour donner à l'utilisateur une indication sur la carte à changer après un défaut. L'expérience a montré que ces arbres étaient lourds à mettre en oeuvre et difficiles à modifier. De plus, comme ils étaient basés sur un nombre restreint de signaux logiques, les indications données étaient très succinctes.

### 5.3.3 Les réseaux de neurones artificiels [12] :

Un réseau de neurone est un modèle de calcul dont la conception est très schématiquement inspirée du fonctionnement de vrais neurones humains. Cette technique est placée dans la famille des méthodes de l'intelligence artificielle qu'ils enrichissent en permettant de prendre des décisions s'appuyant davantage sur la perception que sur le raisonnement logique formel. Dans les années 1940, les neurologues Warren Sturgis McCulloch et Walter Pitts menèrent les premiers travaux sur les réseaux de neurones. Ils constituèrent un modèle simplifié de neurone biologique communément appelé neurone formel. Ils montrèrent également théoriquement que des réseaux de neurones formels simples peuvent réaliser des fonctions logiques, arithmétiques complexes.

Issus de la recherche en neurophysiologie et en informatique, cette approche fait l'objet de recherches dans beaucoup de domaines tels que la compréhension et la synthétisation de la langue naturelle, la classification, le diagnostic, etc. Cette technologie comporte des caractéristiques très intéressantes comme la faculté d'apprentissage et d'auto-organisation. Elle présente des perspectives d'applications particulièrement intéressantes pour l'aide au diagnostic avec signatures externes. En effet, le calcul neuromimétique possède des propriétés similaires à celles de la reconnaissance des formes pour la classification automatique de signatures.

Pour identifier des défauts dans un système, le diagnostic réalisé par réseaux de neurones doit disposer d'un nombre suffisant d'exemples de bon fonctionnement et de défauts pour pouvoir les apprendre. Pendant la phase d'apprentissage, les exemples sont présentés au réseau en entrée avec les diagnostics correspondants à la sortie. Le réseau s'auto-organise, apprenant à relier les exemples montrés aux diagnostics. Après l'apprentissage, le réseau ne reconnaît pas seulement les exemples appris mais également des paradigmes leur ressemblant, ce qui correspond à une certaine robustesse par rapport aux déformations de signaux par le bruit.

Pour un traitement par réseau de neurones, les exemples doivent être mis en forme pour être entrés dans le réseau. Ce sont des grandeurs caractéristiques des défauts à diagnostiquer, filtrées et prétraitées (transformée de Fourier). Conceptuellement, un réseau de neurones peut être considéré comme une boîte noire, il n'est pas nécessaire de construire un modèle du système, contrairement aux méthodes dites internes. Cependant, l'inconvénient majeur est d'arriver à déterminer une méthodologie pour maîtriser les problèmes inhérents, qui sont principalement le choix de la structure, de la taille du réseau

et des algorithmes d'apprentissage pour un problème précis. Par contre, la principale raison de leur intérêt en diagnostic industriel est leur faculté d'apprentissage et la mémorisation d'un grand volume d'information.

D'ailleurs, en ce qui concerne la surveillance des machines électriques, cette méthode a été largement utilisée. Par exemple, dans et, le premier auteur utilise comme signal les vibrations du châssis du moteur alors que le second s'oriente vers l'emploi du courant statorique. Ces deux articles montrent l'efficacité des réseaux de neurones artificiels pour différents types de défauts. Alors que Schoen s'intéresse à l'excentricité. Dans ces deux cas, leurs essais prouvent l'intérêt des réseaux de neurones pour la classification et la prise de décision.

#### 6. Conclusion :

Nous avons présenté dans ce chapitre les différentes techniques du diagnostic, les techniques basées sur l'extraction des signatures des défauts à partir des mesures des grandeurs de la machine asynchrone et les techniques basées sur les modèles, ainsi que les techniques modernes du diagnostic.

### 1. Introduction :

La modélisation de la machine asynchrone à cage d'écureuil est une phase indispensable et nécessaire pour les différentes applications de commande, et également pour le diagnostic et la surveillance, le modèle mathématique permet d'observer et analyser des différentes évolutions de ses grandeurs électriques et électromagnétiques. Ce chapitre présente les différents modèles : modèle en régime permanent et le modèle dynamique de la machine [13][14]. Par la suite nous avons appliqué la technique FFT et l'analyse du vecteur du park sur le courant statorique de la machine asynchrone dans le cas sain.

### 2. Hypothèses de travail :

Les hypothèses sont [15][16] :

- le bobinage est réparti de manière à donner une f.m.m sinusoïdale s'il est alimenté par des courants sinusoïdaux.
- circuit magnétique non saturé et parfaitement feuilleté.
- pertes ferromagnétiques négligeables.
- l'influence de l'échauffement sur les caractéristiques n'est pas prise en compte.
- entrefer constant, l'effet des encoches négligeable.

### 3. Modèle en régime permanent :

La machine asynchrone peut être considérée comme un transformateur triphasé avec un enroulement secondaire tournant. On peut analyser son comportement en régime permanent en utilisant le schéma monophasé équivalent. Ce circuit est donné par la figure 1 et permet d'extraire les différents paramètres physiques du moteur.

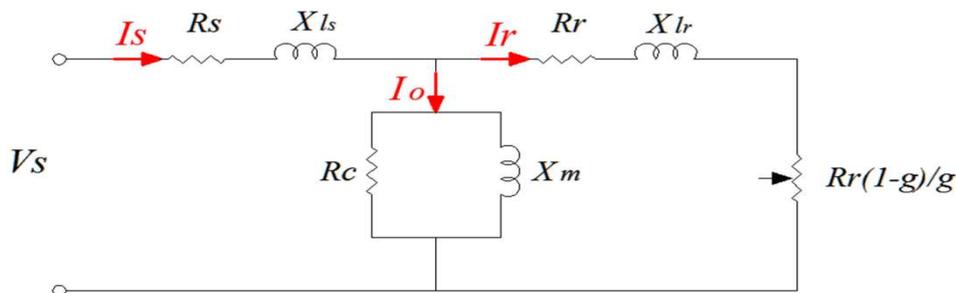


Figure 1 schéma monophasé équivalent en régime permanent.

#### 4. Modèle dynamique :

Le schéma électrique précédent est uniquement valable en régime stationnaire. le modèle dynamique décrit le comportement de la machine en régime transitoire. La figure ci-dessous présente les enroulements statoriques et rotoriques de la machine asynchrone.

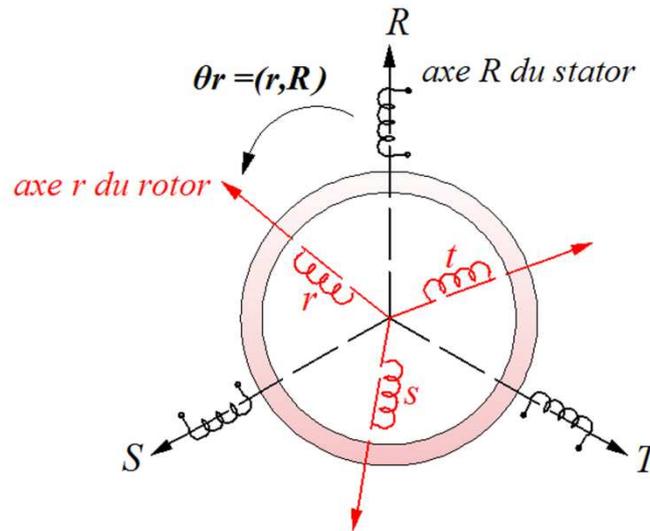


Figure 2 Représentation schématique des enroulements statoriques et rotoriques d'une machine asynchrone triphasée.

#### 4.1 Equations associées :

D'après le schéma de la figure présente on peut décrire les différentes équations de la machine asynchrone:

##### 4.1.1 Les Equation de tension :

Les enroulements statoriques (R.S.T) et rotoriques (r.s.t) sont désignées par les relations matricielles comme suit:

**Stator:**

$$[V_s] = [R_s] [i_s] + \frac{d[\Phi_s]}{dt} \quad (2.1)$$

Avec  $[V_s]$  représente le vecteur tension,  $[i_s]$  le vecteur courant,  $[\Phi_s]$  vecteur flux. La matrice résistance statorique se met sous la forme suivante :

$$[R_s] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

*Rotor:*

$$[V_r] = [R_r] [i_r] + \frac{d[\Phi_r]}{dt} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

Où  $[V_r]$  représente le vecteur tension,  $[i_r]$  le vecteur courant,  $[\Phi_r]$  vecteur flux. la matrice résistance rotorique se met sous la forme suivante :

$$[R_r] = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

#### 4.1.2 Equations magnétiques:

Le flux magnétique de la machine asynchrone est exprimé par les relations matricielles suivantes :

**Stator:**

$$[\Phi_s] = [L_s] [i_s] + [M_{sr}] [i_r] \quad (2.5)$$

**Rotor:**

$$[\Phi_r] = [L_r] [i_r] + [M_{rs}] [i_s] \quad (2.6)$$

Avec:

$$[L_s] = \begin{bmatrix} l_s & M_s & M_s \\ M_s & l_s & M_s \\ M_s & M_s & l_s \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

$$[L_r] = \begin{bmatrix} l_r & M_r & M_r \\ M_r & l_r & M_r \\ M_r & M_r & l_r \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

$$[M_{sr}] = [M_{rs}]^T = M_{sr} \cdot \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

5. L'utilisation de la transformation de Park:

La transformation de Park permet de changer la base triphasée (RST) à la base biphasée (dq) c'est-à-dire de remplacer les enroulements triphasés par deux enroulements (dq) l'un sur l'axe direct (d) et l'autre sur l'axe quadrature (q), ce passage est fait par la matrice [A] :

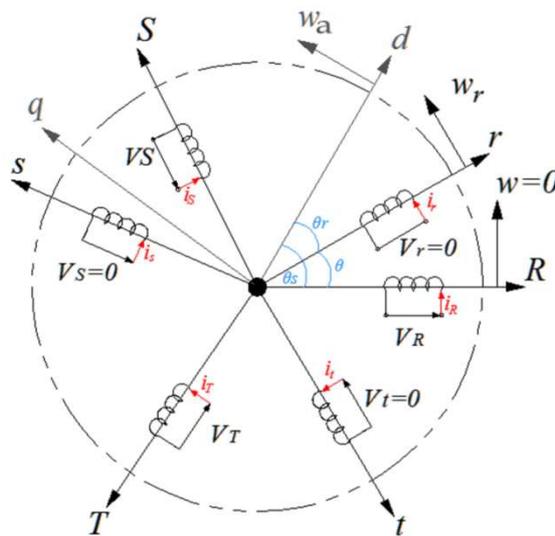


Figure 3 modèle triphasé réel.

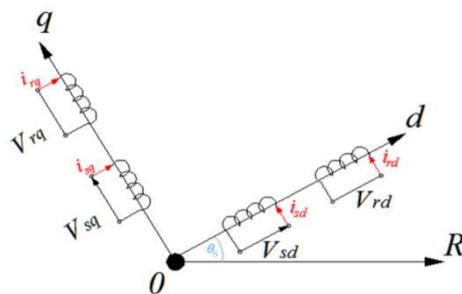


Figure 4 modèle biphasé équivalent.

$$[V_{dq}] = [A] [V_{RST}] \quad (2.10)$$

$$[i_{dq}] = [A] [i_{RST}] \quad (2.11)$$

$$[\Phi_{dq}] = [A] [\Phi_{RST}] \quad (2.12)$$

Où la matrice de Park [A] est définie par :

$$[A] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \sqrt{\frac{1}{2}} & \sqrt{\frac{1}{2}} & \sqrt{\frac{1}{2}} \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

Les figures suivantes illustrent la schématisation de la machine asynchrone dans les axes triphasés et les axes biphasés après la transformation de park.

#### 5.1 Les équations des tensions statoriques :

$$\begin{cases} V_{sd} = R_s i_{sd} + \frac{d}{dt} \varphi_{sd} - \omega_a \varphi_{sq} \end{cases} \quad (2.14)$$

$$\begin{cases} V_{sq} = R_s i_{sq} + \frac{d}{dt} \varphi_{sq} + \omega_a \varphi_{sd} \end{cases} \quad (2.15)$$

#### 5.2 Les équations des tensions rotoriques :

$$\begin{cases} V_{rd} = 0 = R_r i_{rd} + \frac{d}{dt} \varphi_{rd} - (\omega_a - \omega_r) \varphi_{rq} \end{cases} \quad (2.16)$$

$$\begin{cases} V_{rq} = 0 = R_r i_{rq} + \frac{d}{dt} \varphi_{rq} + (\omega_a - \omega_r) \varphi_{rd} \end{cases} \quad (2.17)$$

#### 5.3 Les équations des flux statoriques :

$$\begin{cases} \varphi_{sd} = L_s i_{sd} + M i_{rd} \end{cases} \quad (2.18)$$

$$\begin{cases} \varphi_{sq} = L_s i_{sq} + M i_{rq} \end{cases} \quad (2.19)$$

#### 5.4 Les équations des flux rotoriques :

$$\begin{cases} \varphi_{rd} = L_r i_{rd} + M i_{sd} \end{cases} \quad (2.20)$$

$$\begin{cases} \varphi_{rq} = L_r i_{rq} + M i_{sq} \end{cases} \quad (2.21)$$

Avec :

$$L_s = l_s + M_s \quad (2.22)$$

$$L_r = l_r + M_r \quad (2.23)$$

$$M = \frac{3}{2} \cdot M_{sr} \quad (2.24)$$

### 5.5 L'équation mécanique :

L'équation mécanique de la machine est donnée par :

$$\bullet \quad C_{em} - C_r = J \cdot \frac{d\omega_r}{dt} + f_r \cdot \omega_r \quad (2.25)$$

$$\bullet \quad C_{em} = p \frac{M}{L_r} (\varphi_{rd} i_{sq} - \varphi_{rq} i_{sd}) \quad (2.26)$$

D'après les équations des tensions statoriques et rotoriques, on peut placer dans différents référentiels correspondants à des axes fixes, liés au stator ( $\omega_a=0$ ), ou à des axes liés au rotor ( $\omega_a = \omega_r$ ), ou des axes liés au champ tournant ( $\omega_a = \omega_s$ ).

### 6. Modèle de la machine asynchrone dans le référentiel lié au stator ( $\alpha, \beta$ ):

On peut écrire dans le repère lié au stator ( $\alpha, \beta$ ) c'est à dire pour ( $\omega_a=0$ ) les différentes équations suivantes :

Pour les équations des tensions statoriques et rotoriques on a :

$$V_{s\alpha} = R_s i_{s\alpha} + \frac{d}{dt} \Phi_{s\alpha} \quad (2.27)$$

$$V_{s\beta} = R_s i_{s\beta} + \frac{d}{dt} \Phi_{s\beta} \quad (2.28)$$

$$V_{r\alpha} = 0 = R_r i_{r\alpha} + \frac{d}{dt} \Phi_{r\alpha} + \omega_r \Phi_{r\beta} \quad (2.29)$$

$$V_{r\beta} = 0 = R_r i_{r\beta} + \frac{d}{dt} \Phi_{r\beta} - \omega_r \Phi_{r\alpha} \quad (2.30)$$

Les équations de flux sont :

$$\Phi_{s\alpha} = L_s i_{s\alpha} + M i_{r\alpha} \quad (2.31)$$

$$\Phi_{s\beta} = L_s i_{s\beta} + M i_{r\beta} \quad (2.32)$$

$$\Phi_{r\alpha} = L_r i_{r\alpha} + M i_{s\alpha} \quad (2.33)$$

$$\Phi_{r\beta} = L_r i_{r\beta} + M i_{s\beta} \quad (2.34)$$

Les équations mécaniques de la machine sont exprimées par :

$$C_e = \frac{3}{2} P \cdot \frac{M}{L_r} \cdot (\Phi_{r\alpha} \cdot i_{s\beta} + \Phi_{r\beta} \cdot i_{s\alpha}) \quad (2.35)$$

$$C_e - C_r - f \cdot \Omega_r = \frac{J}{p} \cdot \frac{d\omega_r}{dt} \quad (2.36)$$

### 7. Simulation de la machine asynchrone dans le référentiel lié au stator ( $\alpha, \beta$ ):

La simulation de la machine asynchrone est basée sur les équations (27), (28), (29), (30), (31), (32), (33), (34), (35), (36) du modèle dynamique précédent. La machine asynchrone est alimentée par un réseau triphasé équilibré. Le temps de la simulation est égal à 2 S.

#### 7.1 Simulation à vide :

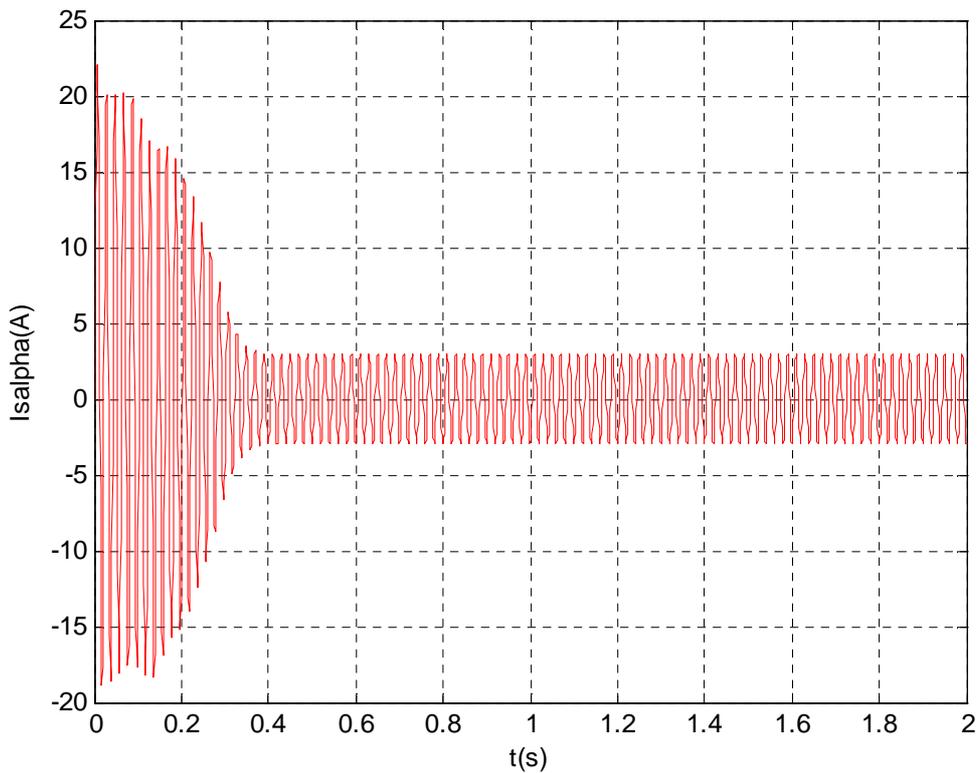


Figure 5 le courant  $i_{s\alpha}$ .

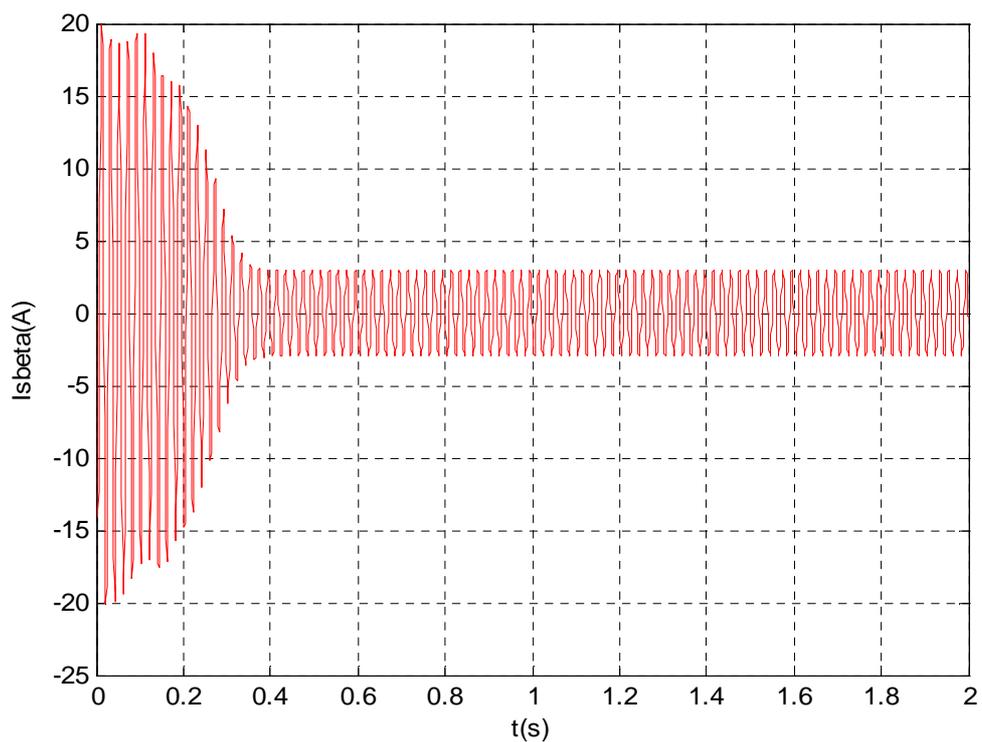


Figure 6 le courant  $i_{\beta}$ .

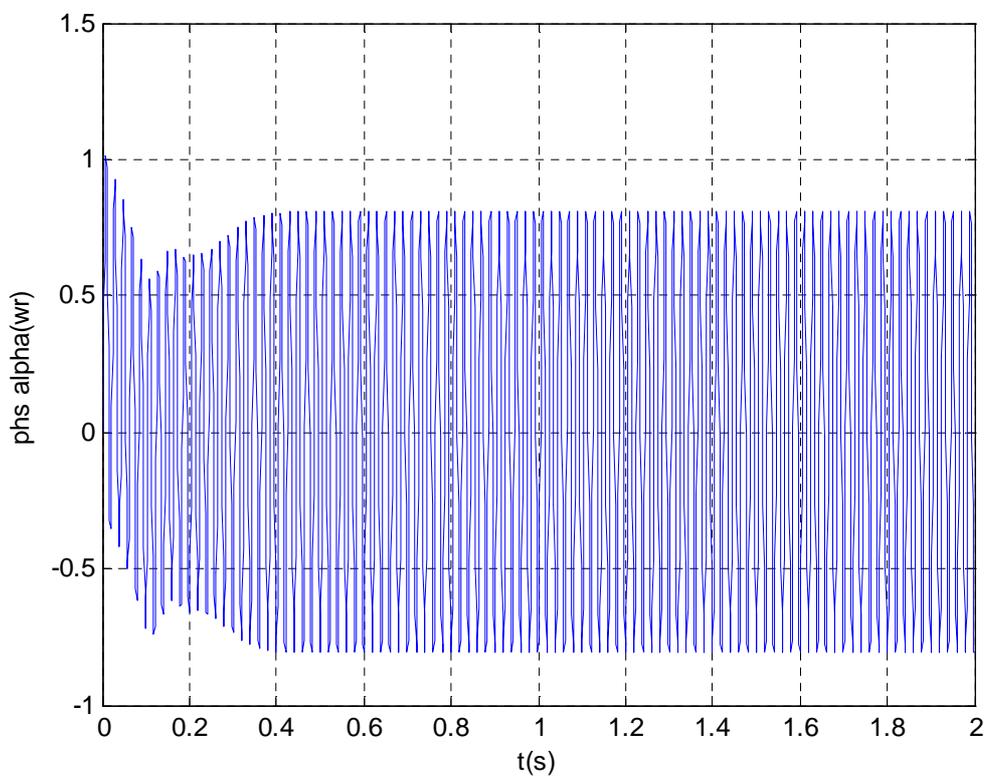


Figure 7 le flux  $\Phi_{\alpha}$ .

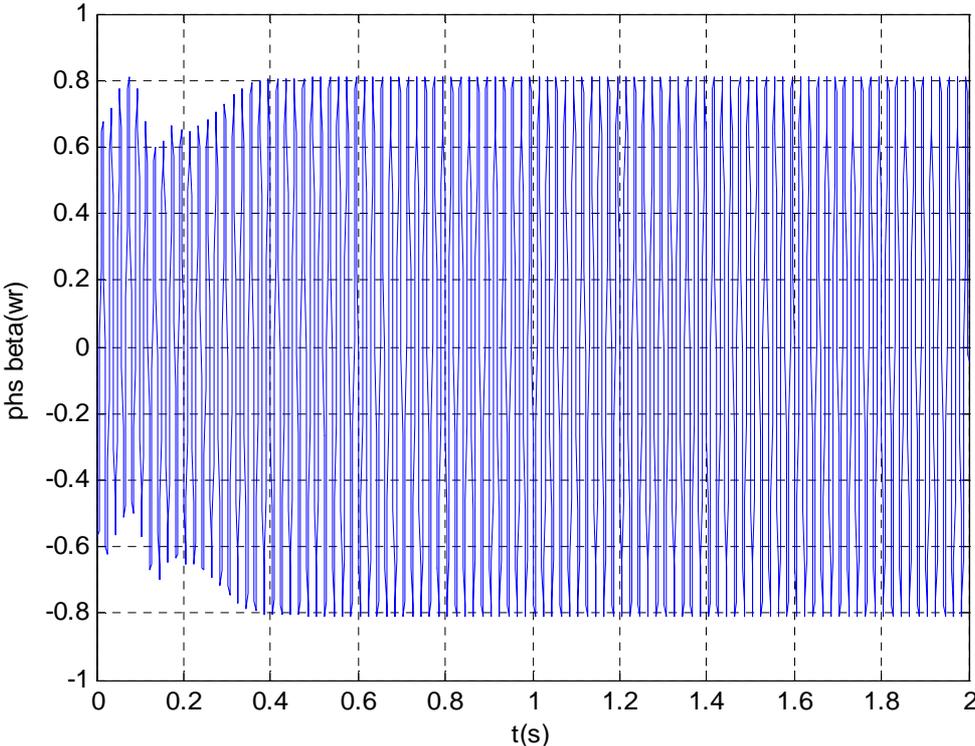


Figure 8 le flux  $\Phi_{s\beta}$ .

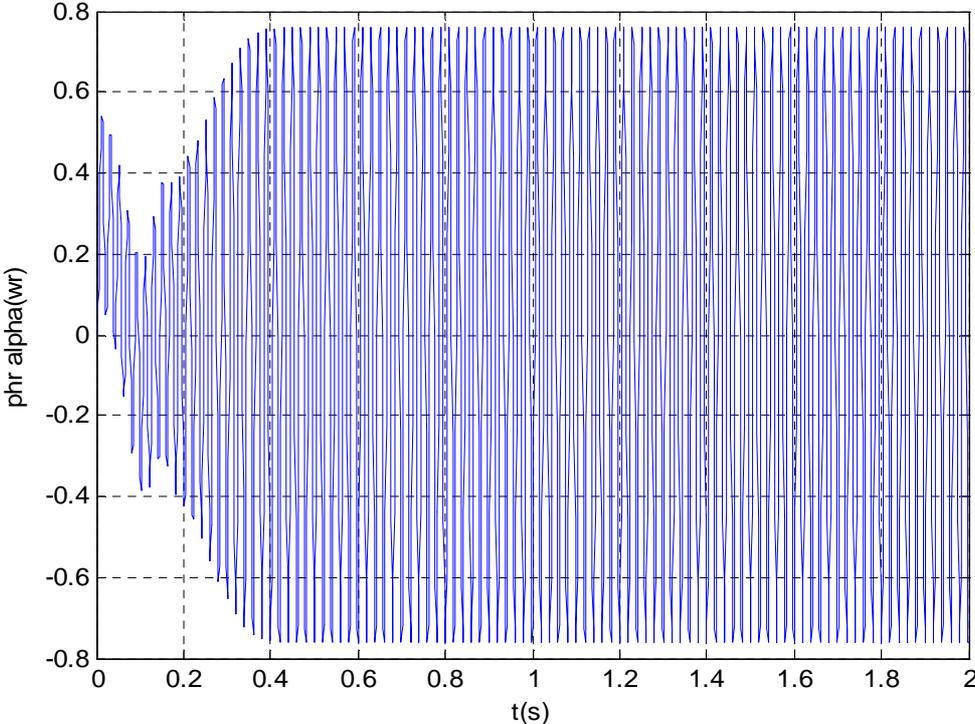


Figure 9 le flux  $\Phi_{s\alpha}$ .

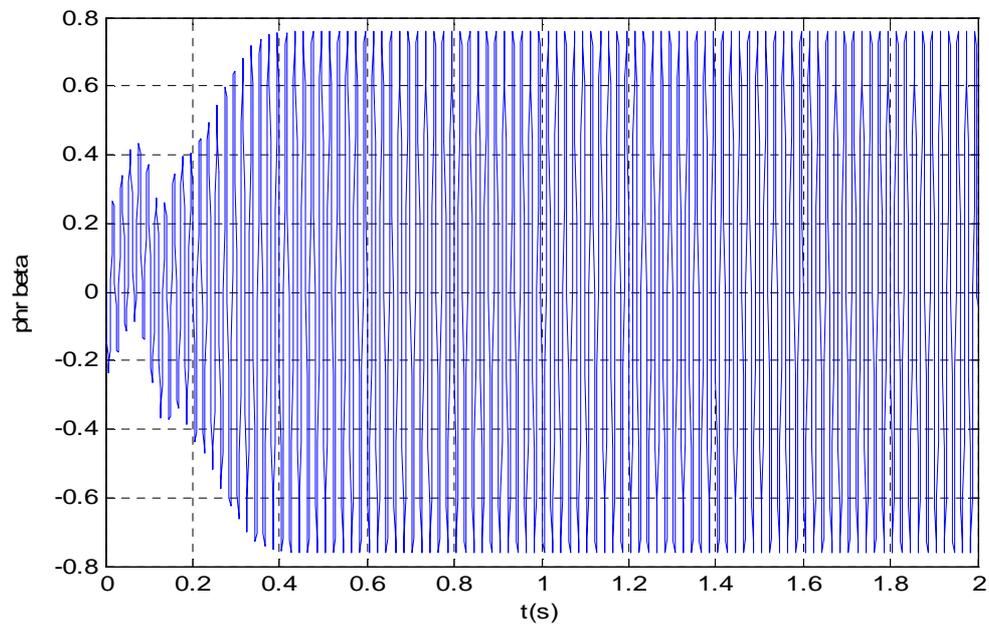


Figure 10 le flux  $\Phi_{r\beta}$ .

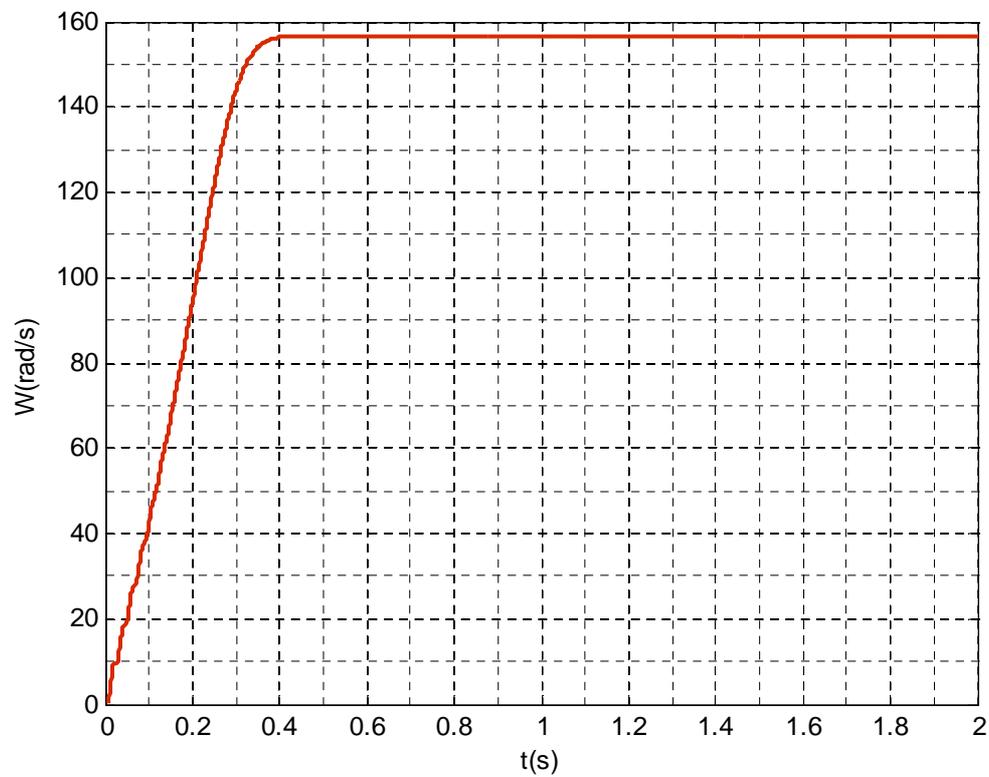


Figure 11 La vitesse.

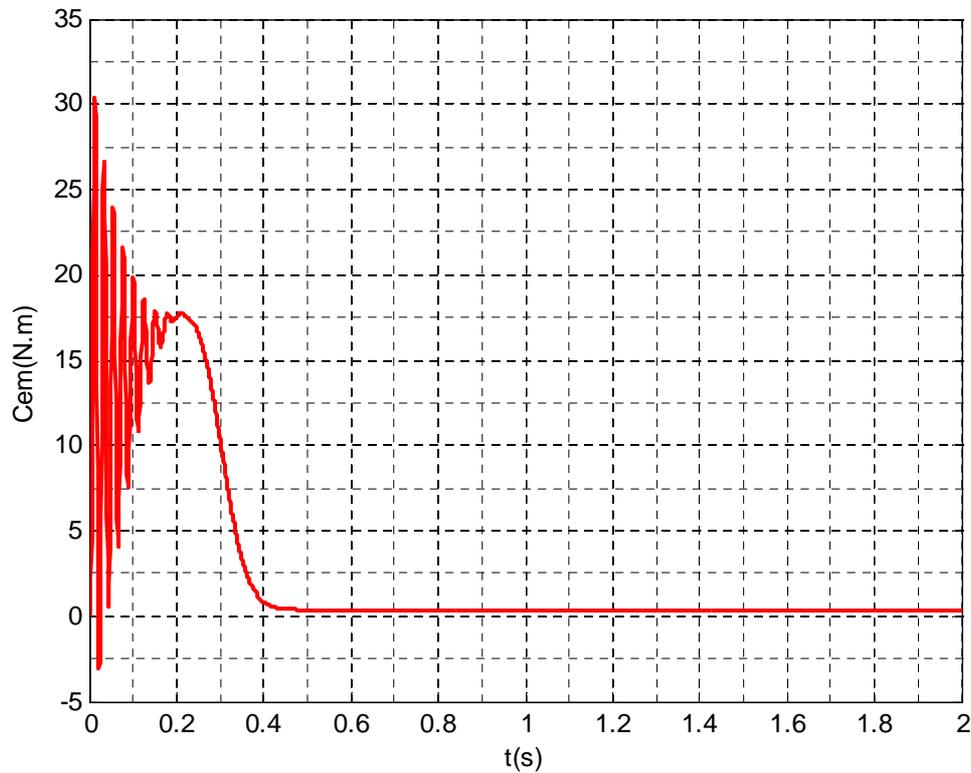


Figure 12 Le couple moteur.

D'après les figures ci-dessus on remarque les points suivants :

- La vitesse atteint le régime permanent à la valeur 157 à partir de l'instant 0.4s.
- le couple tend vers le couple de perte à vide à partir de l'instant 0.4s.

D'après la transformation suivante

$$I_R = \sqrt{\frac{2}{3}} i_{s\alpha}$$

$$I_S = \sqrt{\frac{2}{3}} \left[ -\frac{1}{2} i_{s\alpha} + \frac{\sqrt{3}}{2} i_{s\beta} \right]$$

$$I_T = \sqrt{\frac{2}{3}} \left[ -\frac{1}{2} i_{s\alpha} - \frac{\sqrt{3}}{2} i_{s\beta} \right]$$

On a obtenue les simulations des courants statoriques (R.S.T) ci- dessous.

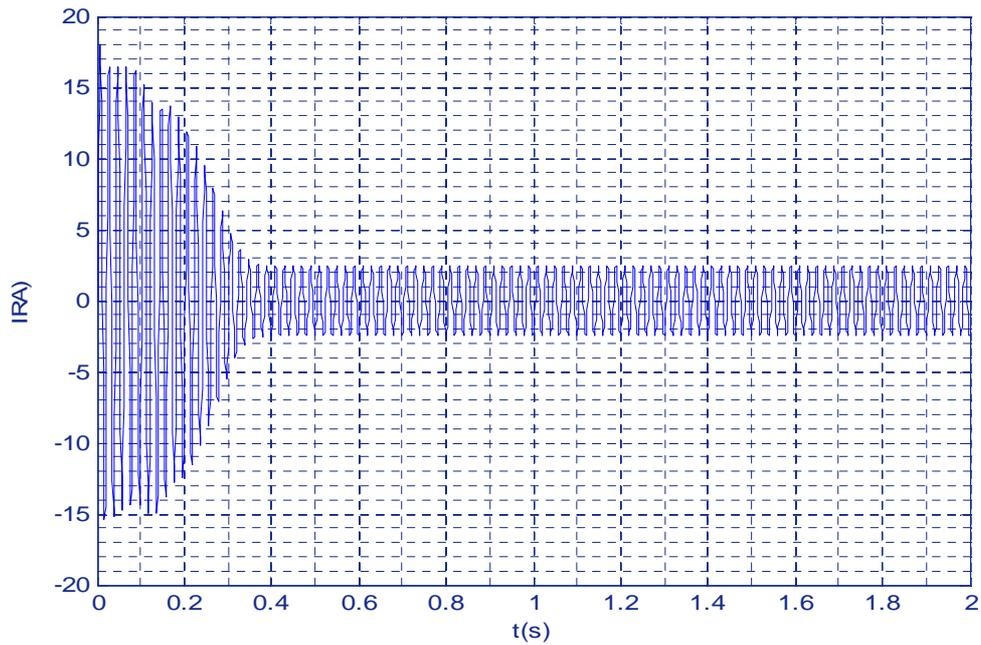


Figure 13 Le courant  $I_R$  de la phase 1.

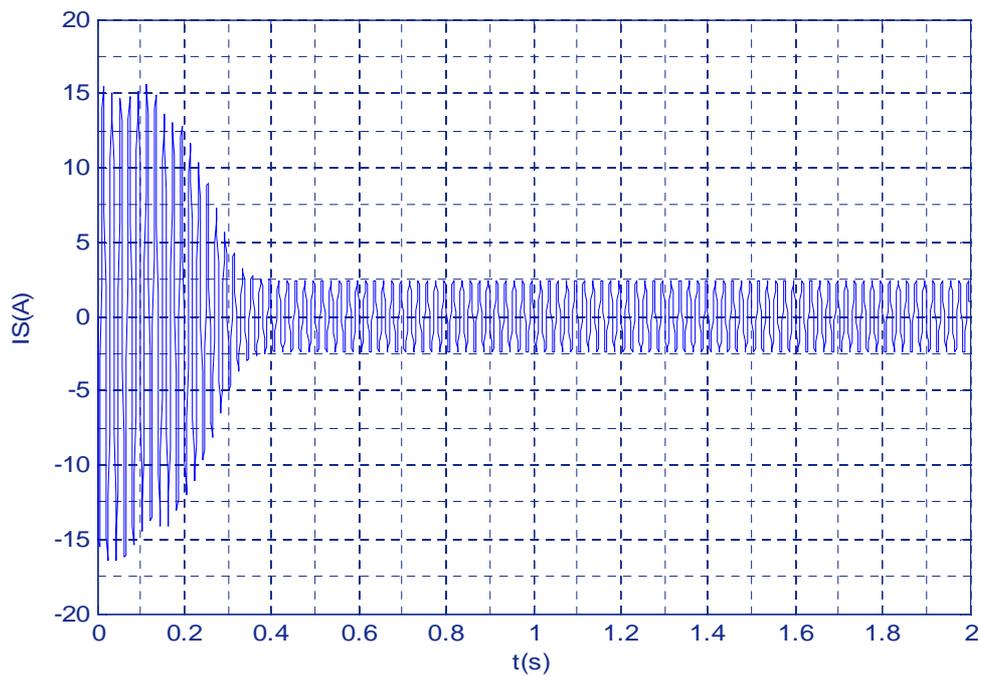


Figure 14 Le courant  $I_S$  de la phase 2.

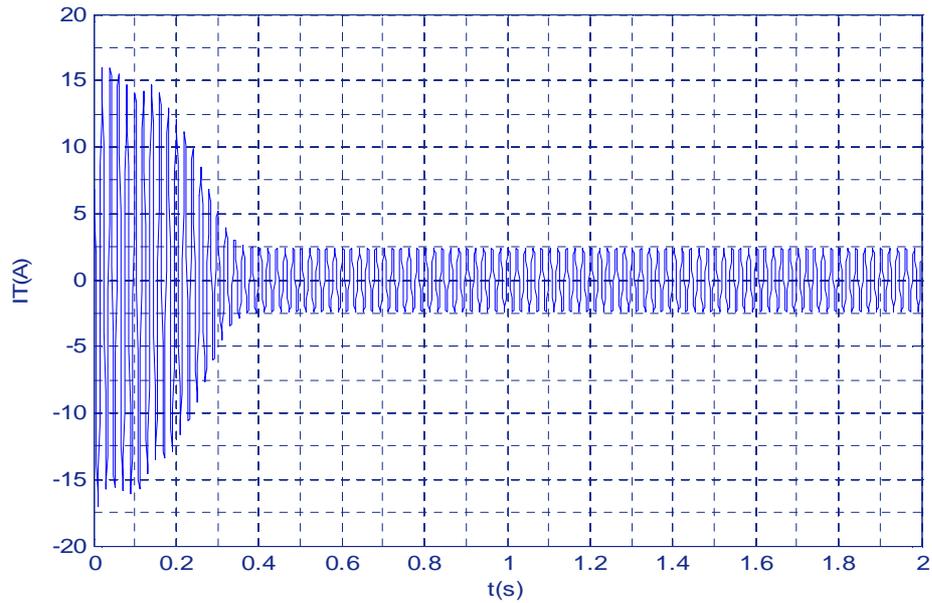


Figure 15 Le courant  $I_T$  de la phase 3.

D'après les figures 13, 14 et 15 on observe que le moteur au démarrage absorbe un grand courant (régime transitoire) puis il diminue jusqu'à la valeur 2.4 (A) (régime permanent sinusoïdale).

### 7.2 Simulation en charge :

Dans cette partie on a appliqué un couple de charge (résistant) égale 9 N.m à l'instant  $t=1$ s.

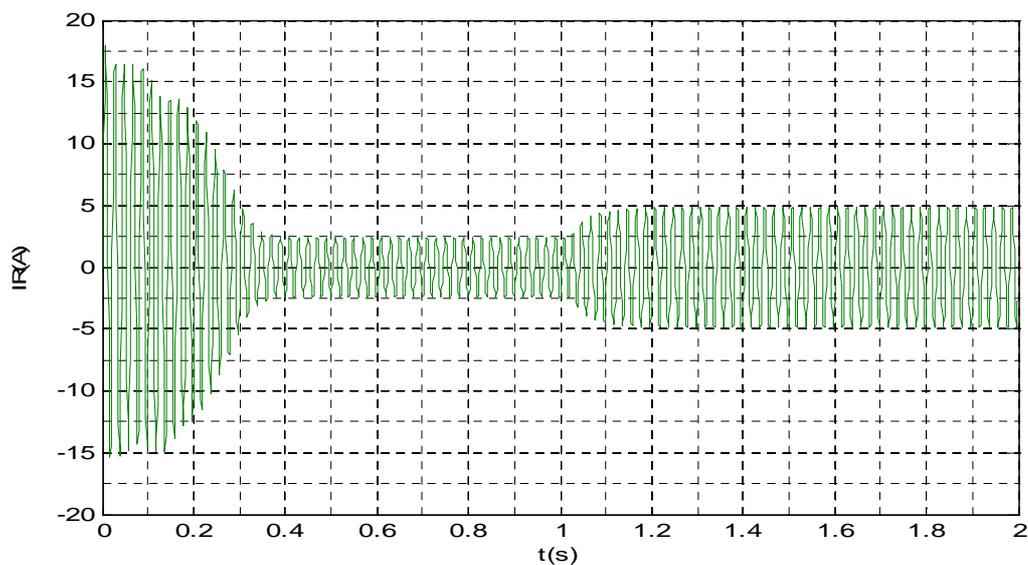


Figure 16 Le courant  $I_R$  en charge.

Après l'application de la charge à l'instant  $t=1$  s, le courant des phases RST augmente de la valeur 2.4 A à la valeur 4.3 A.

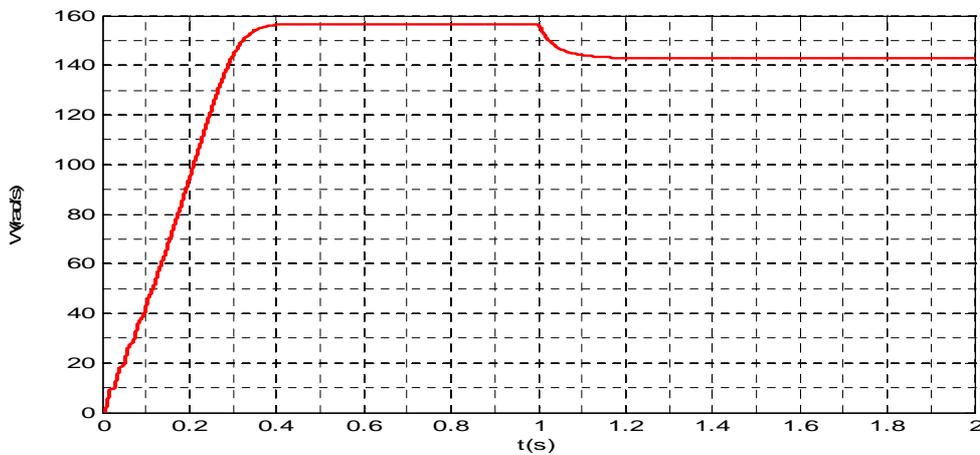


Figure 17 la vitesse en charge.

À l'instant  $t=1$ s, la vitesse du moteur diminue jusqu'à une valeur à cause de l'application de la charge.

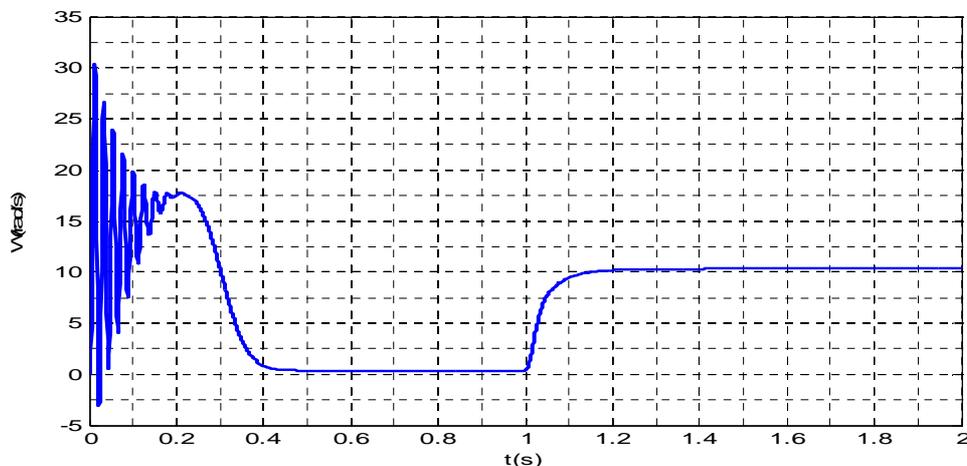


Figure 18 le couple moteur en charge.

Après un régime transitoire à vide de 0.4s, le couple électromagnétique du moteur stabilise à une valeur de 0Nm, l'augmentation de la charge à  $t=1$ s crée une augmentation équivalente sur le couple électromagnétique.

### 8. Analyse du courant par FFT :

On applique dans cette partie la transformé du Fourier rapide FFT sur le courant de la phase 1 on obtient le résultat suivant :

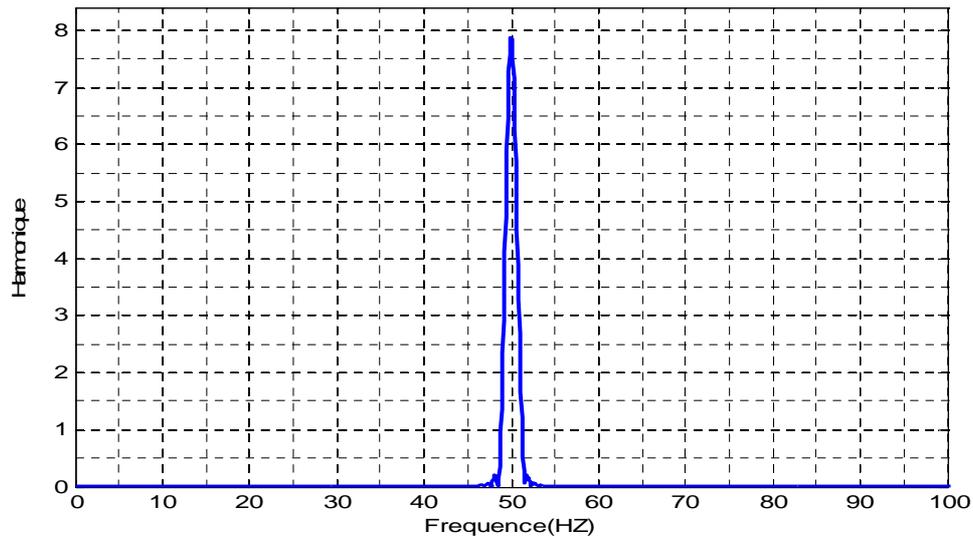


Figure 19 analyse du courant de la phase 1 par FFT.

D'après la figure illustré ci-dessus on remarque l'existence d'une seule fréquence  $f=50$  HZ.

#### 9. Analyse du courant statorique par le vecteur du Park :

La figure suivante présente la machine dans le cas sain.

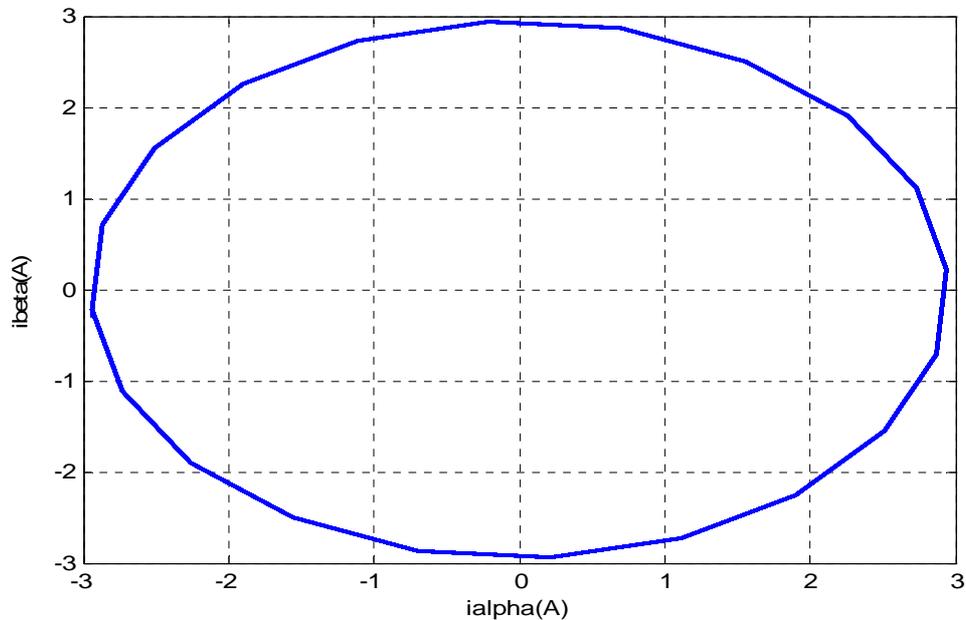


Figure 20 la machine saine.

### 10. Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons pu établir un modèle mathématique de la machine asynchrone triphasée dont la complexité a été réduite en utilisant un certain nombre d'hypothèses simplificatrices. En appliquant la transformation de Park qui permet de passer du système triphasé vers le système biphasé de Park.

Les résultats obtenus par simulation montrent bien la validité du modèle de Park, dans le référentiel lié au stator. Ce modèle présente l'état normal de la machine asynchrone c'est-à-dire l'état sain.

### 1. Introduction :

Les modèles de la machine asynchrone avec défaut [17][18][19] désignent le comportement de la machine avec la présence du défaut statorique ou rotorique. Ce chapitre donne un modèle de la machine asynchrone qui tien compte les défauts statorique de type courts-circuits entre spires sur une ou trois phases statorique [20][21].

### 2. modélisation de la machine avec un défaut de courts-circuits entre spires :

#### 2.1 Modélisation triphasé :

La présence d'un défaut du ce type est présenté par une bobine  $B_{cc}$  parcouru par un courant du court-circuit  $i_{cc}$  (figure1et2).

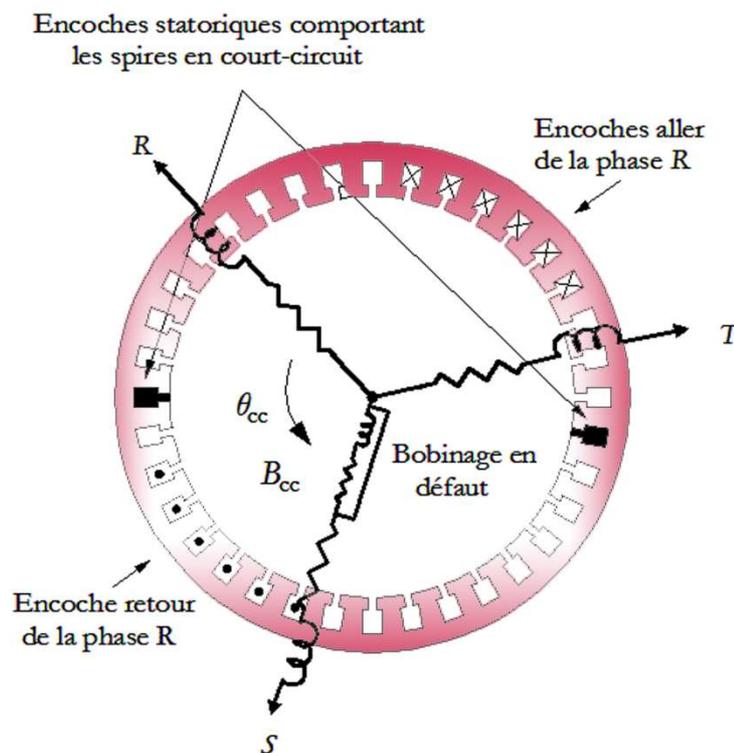


Figure 1 Court-circuit de spires sur la phase S du stator.

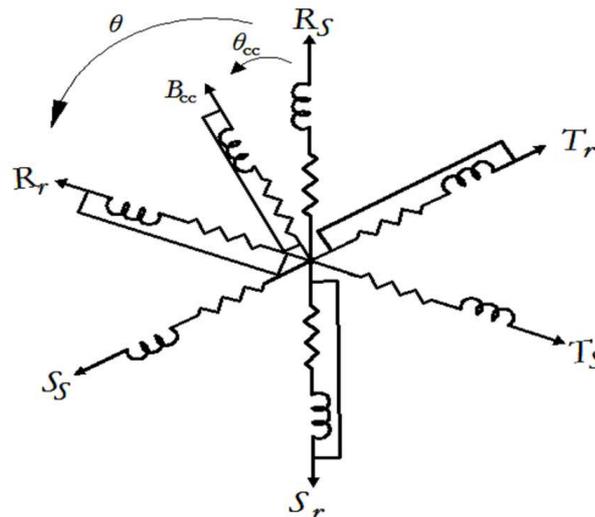


Figure 2 Enroulements triphasés avec court-circuit.

Ce défaut est caractérisé par :

- Le rapport de court-circuit noté  $N_{cc}$  égal au rapport du nombre de spires en court-circuit sur le nombre total de spires dans une phase statorique sans défaut. Ce paramètre permet de quantifier le déséquilibre et d'obtenir le nombre de spires en court-circuit.
- Les résistances étant directement proportionnelles au nombre de spires, la résistance  $R_{cc}$  de la bobine  $B_{cc}$  s'écrit simplement en fonction de la résistance  $R_s$  des trois phases statoriques sans défaut.

$$N_{cc} = \frac{\text{Nombre de spires en court-circuit}}{\text{Nombre de spires sur une phase sans défaut}} = \frac{N_{cc}}{n_s} \quad (3.1)$$

$$R_{cc} = N_{cc} R_s \quad (3.2)$$

$R_{cc}$  : résistance du court-circuit.

- L'angle électrique, noté  $\theta_{cc}$ , repérant le bobinage en court-circuit par rapport à l'axe de référence de la phase  $a_s$ . Ce paramètre permet la localisation du bobinage en défaut et ne peut prendre que les trois valeurs  $0, \frac{2\pi}{3}, \frac{4\pi}{3}$ , correspondant respectivement à un court-circuit sur les phases RST.

Le circuit magnétique emprunté par les lignes de champ coupant la bobine  $B_{cc}$  en court-circuit est identique à celui emprunté par les lignes de champ coupant la phase statorique en défaut. Ainsi, on peut écrire les différentes inductances et mutuelles inductances de la bobine  $B_{cc}$  par rapport aux phases statoriques et rotoriques de la machine.

2.1.1 Equations de tensions :

Les équations des tensions statoriques et rotoriques de la machine sont exprimées avec les relations matricielles suivantes :

$$[V_s] = [R_s] [i_s] + \frac{d[\Phi_s]}{dt} \quad (3.3)$$

$$[V_r] = [R_r] [i_r] + \frac{d[\Phi_r]}{dt} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

$$0 = R_{cc} i_{cc} + \frac{d}{dt} \Phi_{cc} \quad (3.5)$$

Avec

$$[R_s] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

$$[R_r] = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

2.1.2 Equations magnétiques:

On peut écrire les équations des flux statoriques et rotoriques comme suit :

$$[\Phi_s] = [L_s] [i_s] + [M_{sr}] [i_r] + [M_{scc}] i_{cc} \quad (3.8)$$

$$[\Phi_r] = [L_r] [i_r] + [M_{rs}] [i_s] + [M_{rcc}] i_{cc} \quad (3.9)$$

$$\Phi_{cc} = [M_{ccs}] [i_r] + [M_{ccr}] [i_s] + L_{cc} i_{cc} \quad (3.10)$$

$L_{cc}$ : inductance du court-circuit.

Où

$$[L_s] = \begin{bmatrix} l_s & M_s & M_s \\ M_s & l_s & M_s \\ M_s & M_s & l_s \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

$$[L_r] = \begin{bmatrix} l_r & M_r & M_r \\ M_r & l_r & M_r \\ M_r & M_r & l_r \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

$$[\mathbf{M}_{sr}] = [\mathbf{M}_{rs}]^T = \mathbf{M}_{sr} \cdot \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

$$L_{cc} = N^2_{cc} (L_s - \frac{1}{3} M) \quad (3.15)$$

$$[\mathbf{M}_{ccs}] = [\mathbf{M}_{ccs}]^T = \sqrt{\frac{2}{3}} N_{cc} \cdot \mathbf{M}_{sr} \begin{bmatrix} \cos(\theta_{cc}) & -\frac{1}{2}\cos(\theta_{cc}) + \frac{\sqrt{3}}{2}\sin(\theta_{cc}) & -\frac{1}{2}\cos(\theta_{cc}) - \frac{\sqrt{3}}{2}\sin(\theta_{cc}) \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

### 2.2 Modélisation dans le repère biphasé :

La machine asynchrone est modélisée dans le repère lié au stator  $(\alpha, \beta)$ . Les grandeurs de court-circuit sont localisées sur une direction fixe au stator, leurs projections sur les axes  $(\alpha, \beta)$  permettent de leur associer des vecteurs stationnaires par rapport au stator :

On peut écrire les équations suivantes :

$$i_{\alpha cc} = \cos(\theta_{cc}) i_{cc} \quad (3.17)$$

$$i_{\beta cc} = \sin(\theta_{cc}) i_{cc} \quad (3.18)$$

$$\Phi_{\alpha cc} = \cos(\theta_{cc}) \Phi_{cc} \quad (3.19)$$

$$\Phi_{\beta cc} = \sin(\theta_{cc}) \Phi_{cc} \quad (3.20)$$

#### 2.2.1 Equations des tensions :

Les équations des tensions sont présentées par les relations suivantes :

$$V_{s\alpha} = R_s i_{s\alpha} + \frac{d}{dt} \Phi_{s\alpha} \quad (3.21)$$

$$V_{s\beta} = R_s i_{s\beta} + \frac{d}{dt} \Phi_{s\beta} \quad (3.22)$$

$$V_{r\alpha} = 0 = R_r i_{r\alpha} + \frac{d}{dt} \Phi_{r\alpha} + \omega_r \Phi_{r\beta} \quad (3.23)$$

$$V_{r\beta} = 0 = R_r i_{r\beta} + \frac{d}{dt} \Phi_{r\beta} - \omega_r \Phi_{r\alpha} \quad (3.24)$$

$$0 = R_{cc} i_{acc} + \frac{d}{dt} \Phi_{acc} \quad (3.25)$$

$$0 = R_{cc} i_{\beta cc} + \frac{d}{dt} \Phi_{\beta cc} \quad (3.26)$$

### 2.2.2 Les équations des flux :

On peut écrire les équations des flux statoriques et rotoriques comme suit :

$$\Phi_{s\alpha} = L_s i_{s\alpha} + M i_{r\alpha} + \sqrt{\frac{2}{3}} N_{cc} \cdot M i_{acc} \quad (3.27)$$

$$\Phi_{s\beta} = L_s i_{s\beta} + M i_{r\beta} + \sqrt{\frac{2}{3}} N_{cc} \cdot M i_{\beta cc} \quad (3.28)$$

$$\Phi_{r\alpha} = L_r i_{r\alpha} + M i_{s\alpha} + \sqrt{\frac{2}{3}} N_{cc} \cdot M i_{acc} \quad (3.29)$$

$$\Phi_{r\beta} = L_r i_{r\beta} + M i_{s\beta} + \sqrt{\frac{2}{3}} N_{cc} \cdot M i_{\beta cc} \quad (3.30)$$

$$\Phi_{acc} = \sqrt{\frac{2}{3}} N_{cc} \cdot M [\cos^2 \theta_{cc} \cdot [i_{s\alpha} + i_{r\alpha}] + \cos \theta_{cc} \cdot \sin \theta_{cc} \cdot [i_{s\beta} + i_{r\beta}]] + (L_s \cdot \frac{1}{3} M) [\cos^2 \theta_{cc} \cdot i_{acc} + \cos \theta_{cc} \cdot \sin \theta_{cc} \cdot i_{\beta cc}] \quad (3.31)$$

$$\Phi_{\beta cc} = \sqrt{\frac{2}{3}} N_{cc} \cdot M [\cos \theta_{cc} \cdot \sin \theta_{cc} \cdot [i_{s\alpha} + i_{r\alpha}] + \sin^2 \theta_{cc} \cdot [i_{s\beta} + i_{r\beta}]] + (L_s \cdot \frac{1}{3} M) [\cos \theta_{cc} \cdot \sin \theta_{cc} \cdot i_{acc} + \sin^2 \theta_{cc} \cdot i_{\beta cc}] \quad (3.32)$$

### 3. Simulation de la machine asynchrone avec un défaut de courts-circuits entre spires :

Les équations suivantes permettent de voir les différents courants statoriques en défaut entre spires :

$$i_{acc} = \frac{2 \cdot N_{cc}}{3 \cdot R_s} (\cos^2 \theta_{cck} \cdot V_{s\alpha} + \cos \theta_{cck} \cdot \sin \theta_{cck} \cdot V_{s\beta}) \quad (3.33)$$

$$i_{\beta cc} = \frac{2 \cdot N_{cc}}{3 \cdot R_s} (\cos \theta_{cck} \cdot \sin \theta_{cck} \cdot V_{s\alpha} + \sin^2 \theta_{cck} \cdot V_{s\beta}) \quad (3.34)$$

$$i_{acc} = i_{s\alpha} + \sum_{k=1}^3 i_{acc} \quad (3.35)$$

$$i_{\beta cc} = i_{s\beta} + \sum_{k=1}^3 i_{\beta cc} \quad (3.36)$$

$k=1, 2, 3$

Le temps de la simulation est égale à 3s, le défaut se présente dans la simulation à partir de  $t=2s$ .

On utilise dans cette partie trois (3) valeurs du  $N_{cc}=0.02$  (2%), 0.05 (5%) et 0.09 (9%).

### 3.1 Simulation du défaut de la phase R avec $N_{cc}=0.02$ (2%):

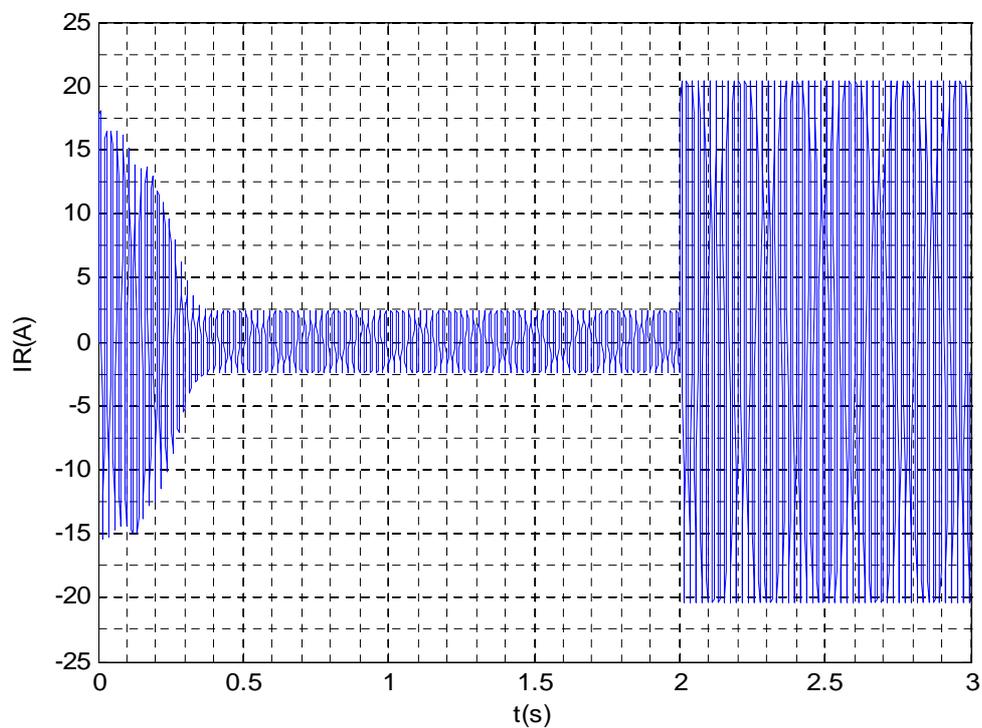


Figure 3 le courant de la phase R avec  $N_{cc}=0.02$  (2%).

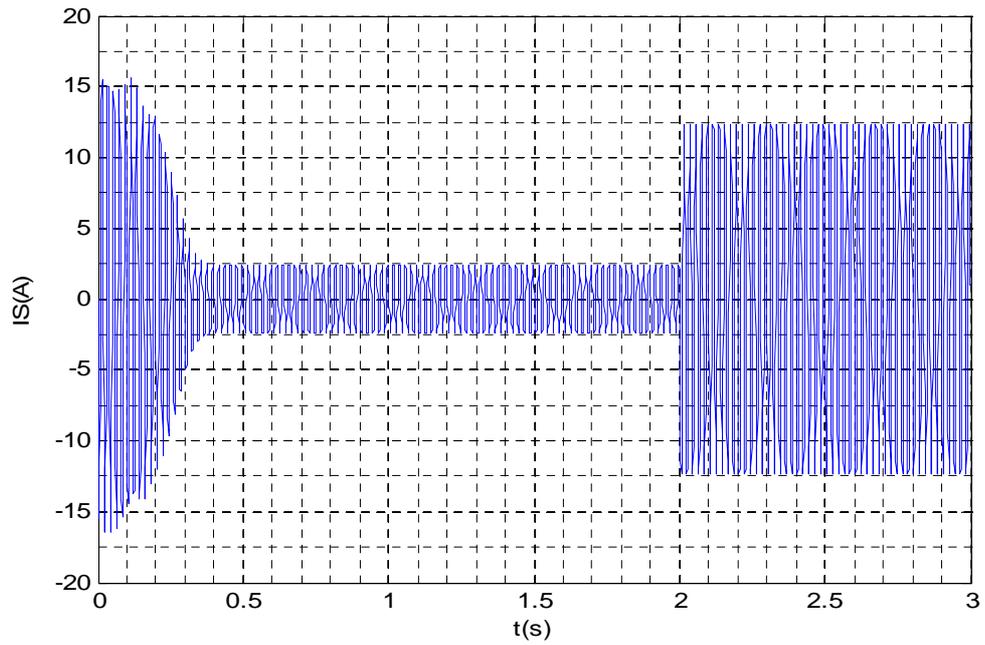


Figure 4 le courant de la phase S avec  $N_{cc}=0.02$  (2%).

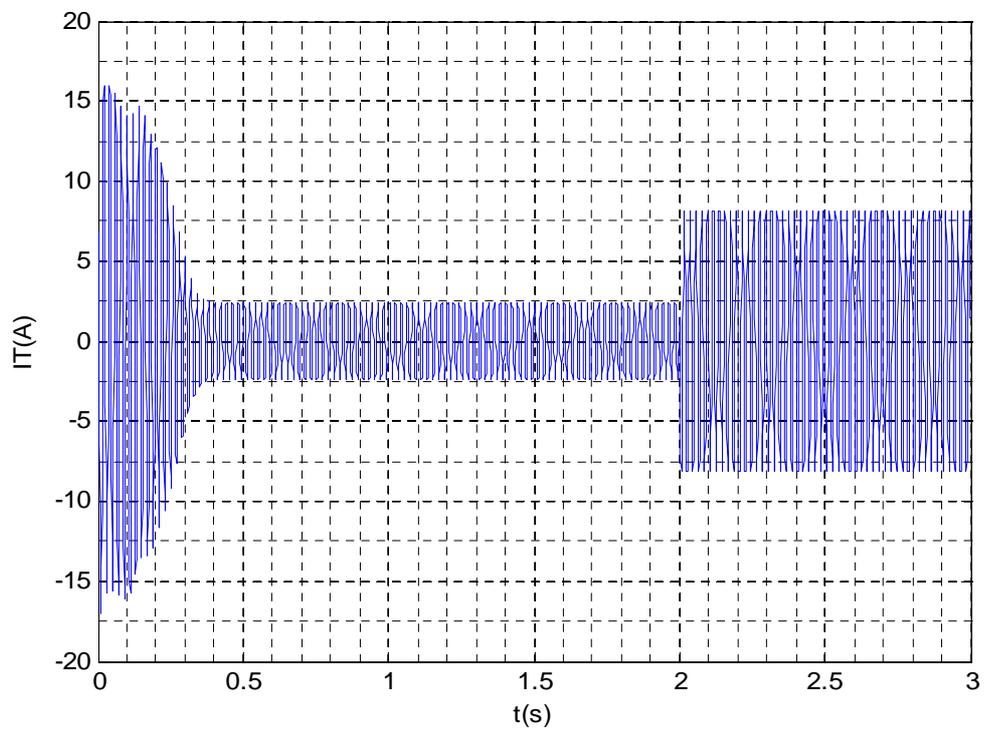


Figure 5 le courant de la phase T avec  $N_{cc}=0.02$  (2%).

D'après les résultats de la simulation on remarque les points suivants :

- augmentation du courant de la phase 1 (R) de la valeur 2.4A à la valeur 20A à l'instant de défaut  $t=2s$ .
- augmentation du courant de la phase 2 (S) de la valeur 2.4A à la valeur 12.3A à l'instant de défaut  $t=2s$ .
- augmentation du courant de la phase 3 (T) de la valeur 2.4A à la valeur 8.2A à l'instant de défaut  $t=2s$ .

### 3.2 Simulation du défaut de la phase R avec $N_{cc}=0.05$ (5%):

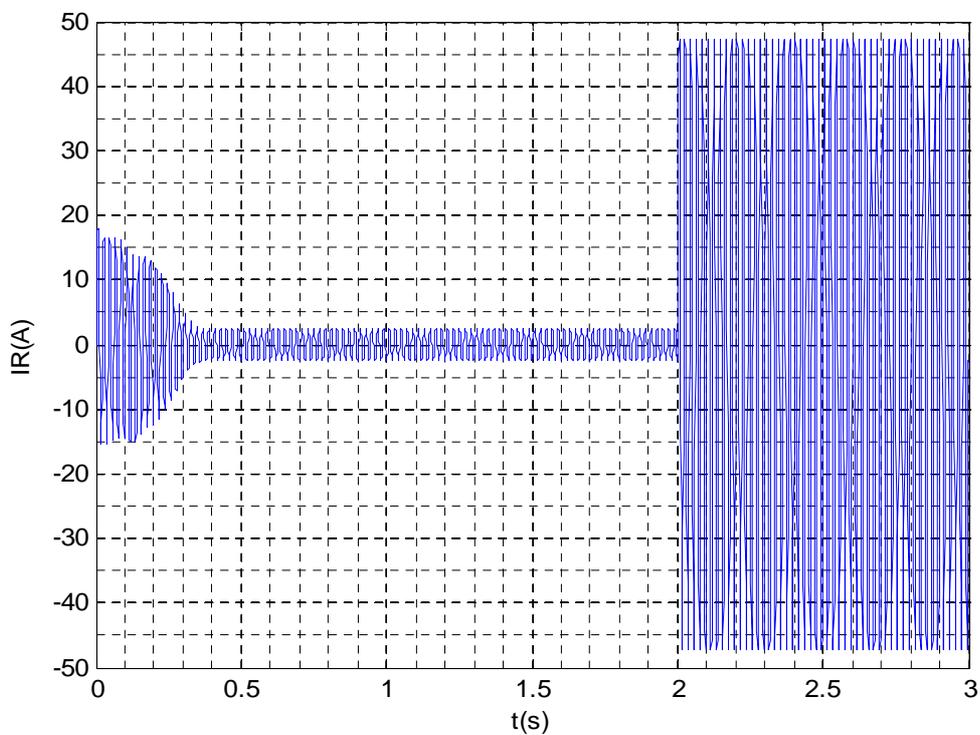


Figure 6 le courant de la phase R avec  $N_{cc}=0.05$  (5%).

On remarque augmentation du courant de la phase 1 (R) de la valeur 2.4A à la valeur 47A à l'instant de défaut  $t=2s$ .

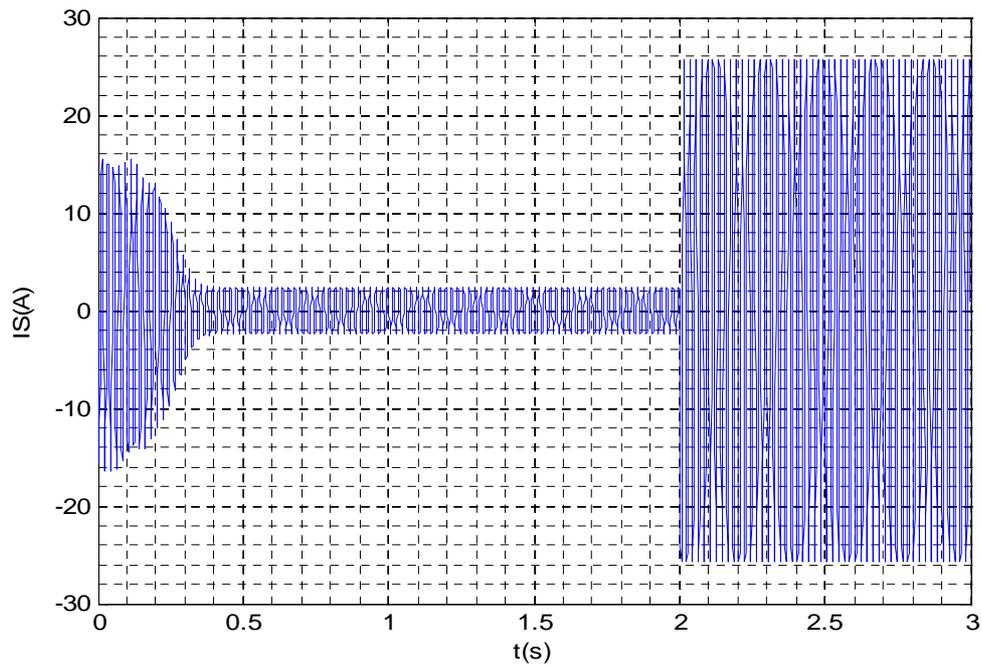


Figure 7 le courant de la phase S avec  $N_{cc}=0.05$  (5%).

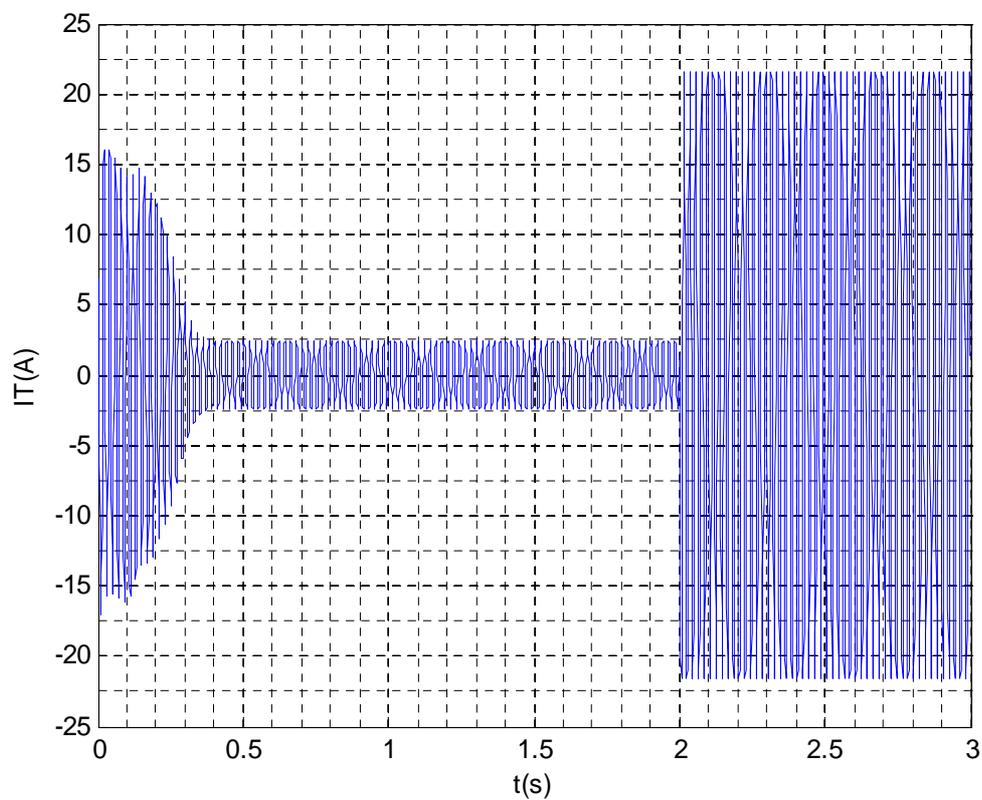


Figure 8 le courant de la phase T avec  $N_{cc}=0.05$  (5%).

D'après les résultats de la simulation on remarque les points suivants :

- augmentation du courant de la phase 2 (S) de la valeur 2.4A à la valeur 25.7A à l'instant de défaut  $t=2s$ .
- augmentation du courant de la phase 3 (T) de la valeur 2.4A à la valeur 21.6 A à l'instant de défaut  $t=2s$ .

### 3.3 Simulation du défaut de la phase R avec $N_{cc}=0.09$ (9%):

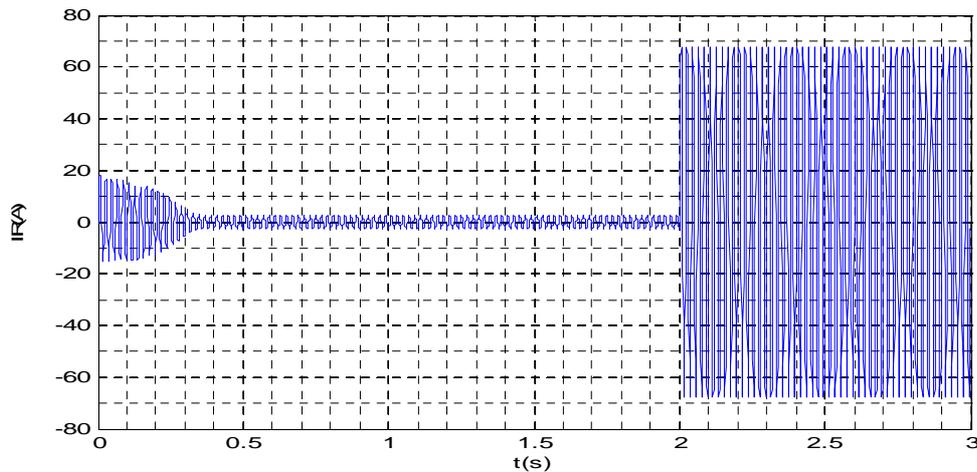


Figure 9 le courant de la phase R avec  $N_{cc}=0.09$  (9%).

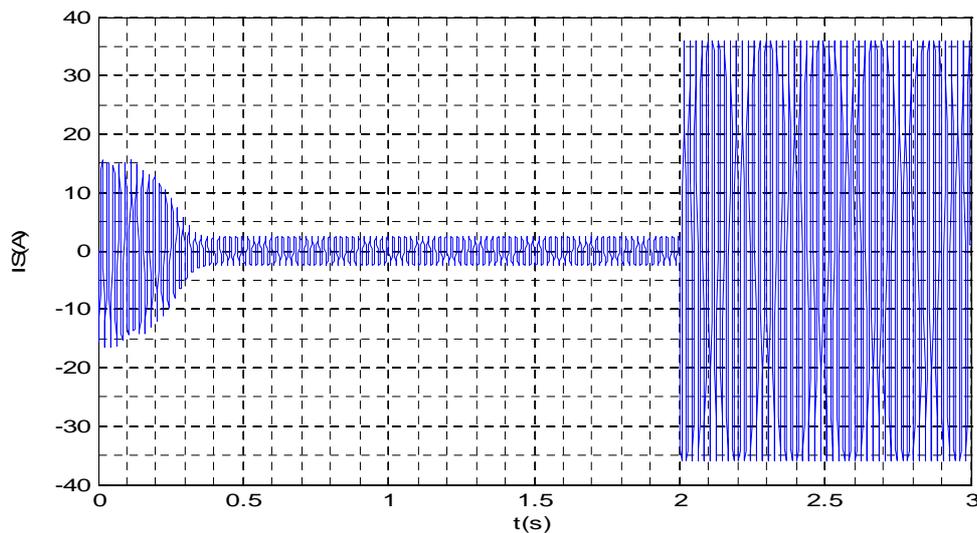


Figure 10 le courant de la phase S avec  $N_{cc}=0.09$  (9%).

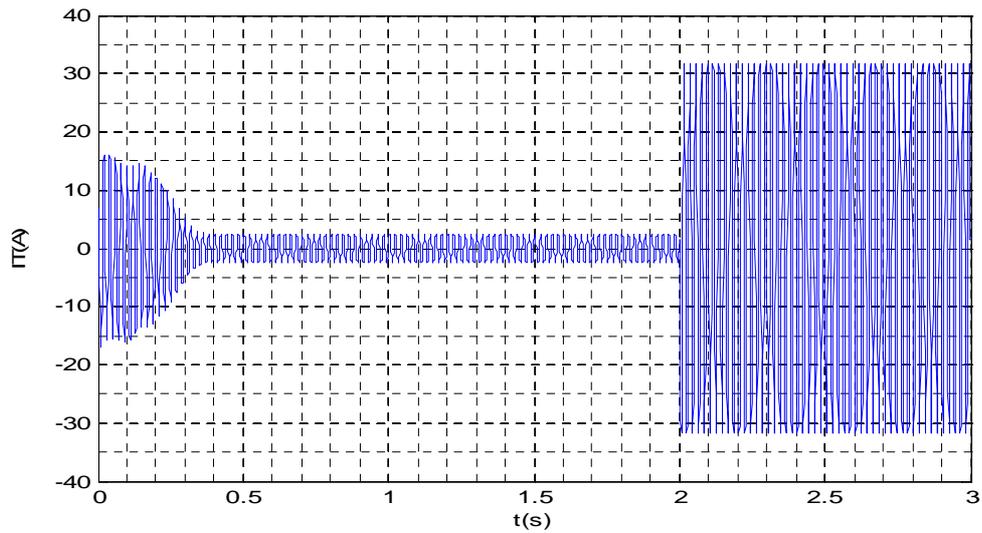


Figure 11 le courant de la phase T avec  $N_{cc}=0.09$  (9%).

#### 4. Analyse du courant statorique par le vecteur du Park :

La figure ci-dessous présente la machine dans le cas en défaut du court-circuit entre spire.

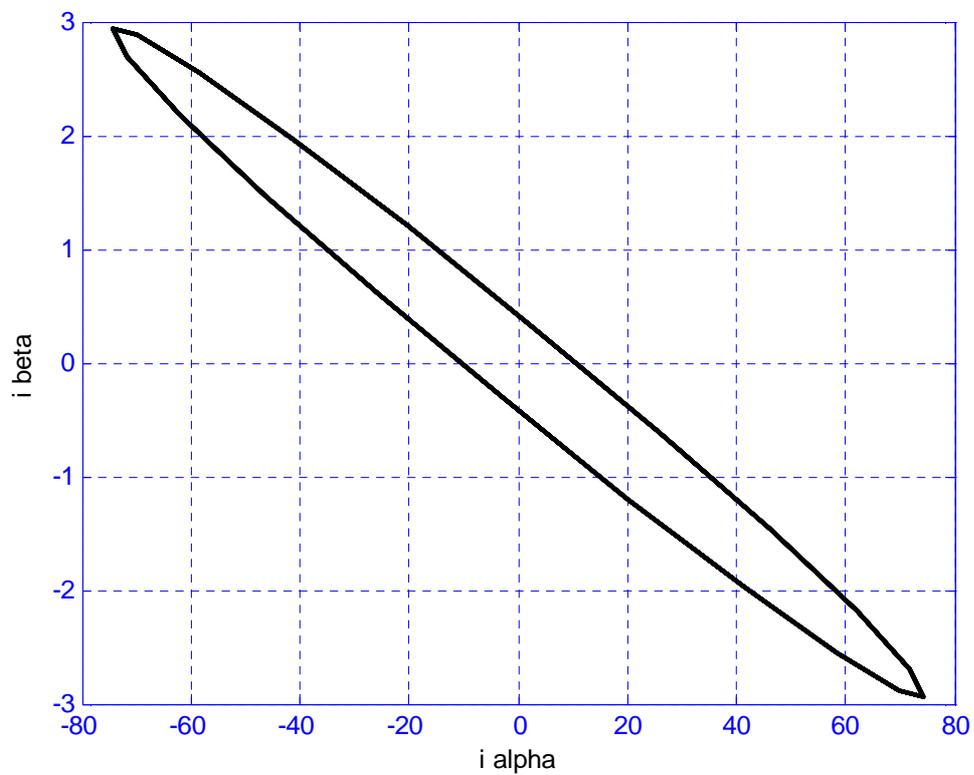
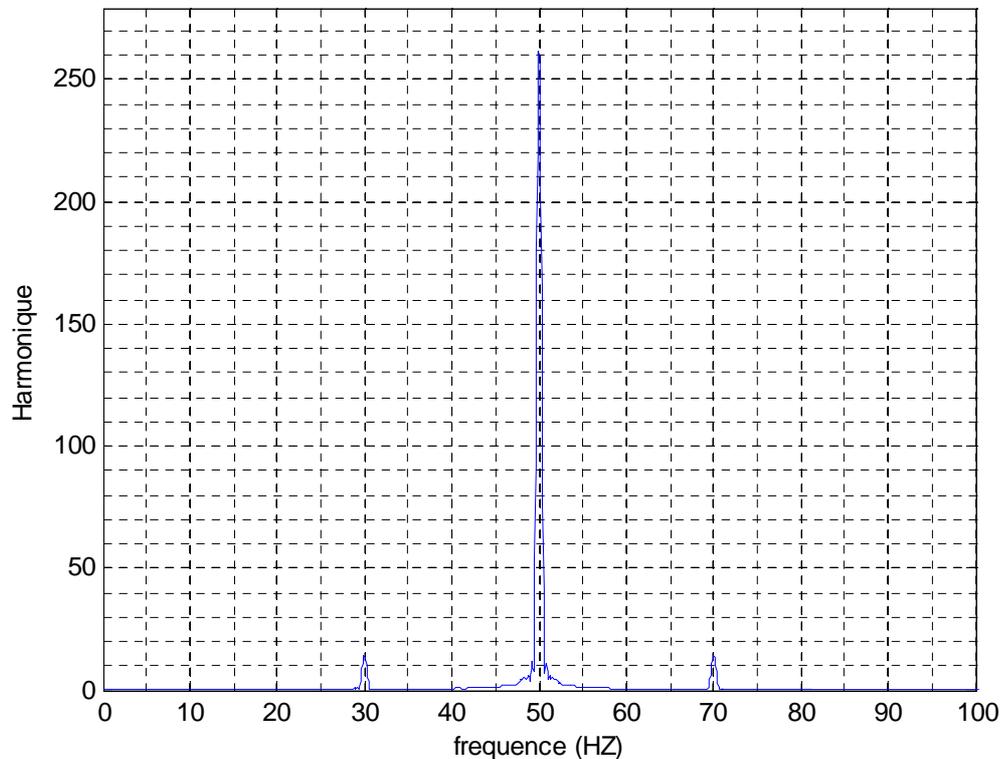


Figure 12 La machine en défaut.

### 5. Analyse du courant par FFT :

On applique dans cette partie la transformé du Fourier rapide FFT sur le courant de la phase 1 on obtient le résultat suivant :



*Figure 13 Analyse par FFT.*

Après l'application de l'analyse spectrale FFT sur le courant statorique de la machine asynchrone avec défaut, on peut observer la présence de nouvelles raies sur le spectre du courant.

### 6. conclusion :

Ce chapitre est consacré à l'élaboration de modèle dédié au défaut du stator de type court-circuit entre spire, ce modèle permet d'analyser les courants statoriques pour détecter les défauts existant dans la machine asynchrone. Nous avons présenté les résultats de la simulation de la machine asynchrone avec plusieurs pourcentages du défaut de type court-circuit entre spire, ainsi que la représentation du vecteur du park et la représentation spectrale du courant statorique.

### 1. Introduction :

Pendant que les nouvelles techniques informatiques et les nouvelles technologies pour les commandes électriques émergent, la surveillance, la détection de défaut et le diagnostic des machines électriques deviennent de plus en plus les questions importantes dans le domaine des machines électriques. Des machines asynchrone peuvent être trouvées dans presque tous les types d'applications, de petites machines monophasées pour les appareils ménagers jusqu'à de grands moteurs triphasés pour les ensembles industriels. Usiner les jeux de surveillance un rôle crucial en détectant les défauts naissants et, de cette façon, en empêchant le temps de panne imprévu et les coûts associés de panne de systèmes électromécaniques et de composants. Dans des décennies passées un certain nombre de différents méthodes et arrangements de détection naissants de défaut [22] [23]. L'attention particulière a été consacrée aux méthodes non envahissantes, qui sont capables pour détecter des défauts. L'analyse de courant du moteur est considéré les méthodes de détection les plus prometteuses de défaut, car il laisse détecter plusieurs défauts communs de machine. Cette méthode est basée sur la décomposition spectrale du courant, En suite on utilisera la logique floue (Fuzzy logic) comme un système expert pour le diagnostic de défaut basé sur le traitement de signature et l'analyse de courant de moteur pour atteindre une décision précise pour les des défauts de court-circuit (le pourcentage des spires en court circuit).

### 2. Principe de la logique floue [24] :

#### 2.1 Bref historique :

##### ✓ **Les débuts**

- 1965: Concept introduit par Pr. Lotfi Zadeh (Berkeley):  
« Fuzzy set theory »: Définition des ensembles flous et opérateurs associés.
- 1970: Premières applications: Systèmes experts, Aide à la décision en médecine, commerce.
- 1974: Première application industrielle. Régulation floue d'une chaudière à vapeur réalisée par Mamdani
- Longtemps universitaire.
- 1985: Les premiers, les japonais introduisent des produits grand public ( Fuzzy Logic Inside )
-

✓ **La maturité**

- 1990: Généralisation de l'utilisation de cette technique.
  - appareils électroménagers (lave-linge, aspirateurs, autocuiseurs).
  - systèmes audio-visuels (appareils de photos autofocus, caméscope à stabilisateur d'images, photocopieurs).
  - systèmes automobiles embarqués (BVA, ABS, suspension, climatisation).
  - systèmes autonomes mobiles.
  - systèmes de décision, diagnostic, reconnaissance.
  - systèmes de contrôle/commande dans la plupart des domaines industriels de production.

2.2 Limite de la logique Booléenne :

Pour illustrer très concrètement le principe fondamental de la logique floue, nous allons prendre l'exemple de la température de l'air ambiant. Nous souhaitons évaluer la température extérieure. Fait-il chaud ou froid ? Dans le cadre de la logique booléenne, il est nécessaire d'introduire un seuil correspondant à la valeur limite de la température extérieure qui va déterminer s'il fait chaud ou froid (figure 1).

On s'aperçoit immédiatement que la logique Booléenne est difficilement applicable à notre problème. Son utilisation en devient même complètement absurde : un simple degré d'écart entre deux températures peut faire basculer notre perception de la température d'un état à l'autre.

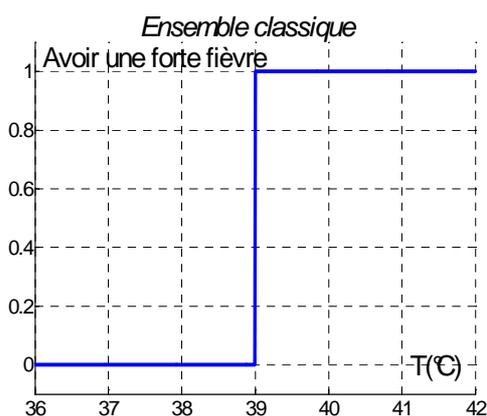


Figure 1 logique Booléenne.

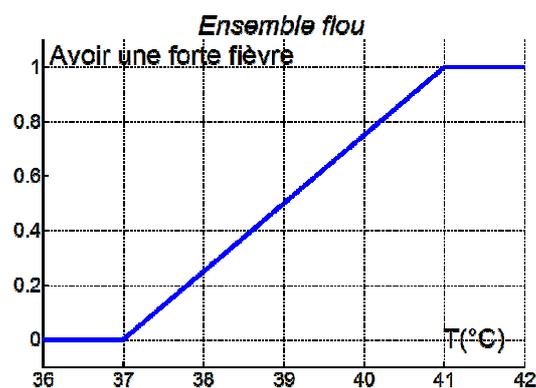


Figure 2 logique flou.

La logique floue, qui introduit une infinité de valeurs entre vrai et faux, permet de déterminer un degré d'appartenance à l'un ou l'autre état (figure 2). La logique floue comble donc les lacunes de la logique booléenne en introduisant la notion de continuité

entre les états. Par exemple, si nous constatons que la température extérieure est de 22°C, nous pouvons dire qu'il fait plus chaud que froid sans pour autant affirmer qu'il fait vraiment chaud.

### 2.3 Les concepts principaux de la logique floue :

Le concept de la théorie des sous-ensembles flous, s'appuie sur la notion de degré d'appartenance d'un élément à un sous-ensemble flou. Tandis que les ensembles traditionnels sont caractérisés par une fonction d'appartenance notée  $\chi$ , (également appelée fonction caractéristique) définie sur  $\{0,1\}$ , les sous-ensembles flous sont, eux, caractérisés par une fonction d'appartenance notée  $\mu$  définie sur  $[0,1]$ .

En d'autres termes, dans le langage ensembliste classique, un élément appartient ou n'appartient pas à un ensemble tandis qu'un élément appartient à un sous-ensemble flou avec un certain degré (éventuellement nul). En résumé, pour un sous-ensemble  $A$  défini sur un univers de discours  $U$ , on peut écrire :

$A$  Sous-ensemble classique : fonction caractéristique  $\chi_A : U \rightarrow \{0,1\}$

$A$  Sous-ensemble flou : fonction d'appartenance  $\mu_A : U \rightarrow [0,1]$

#### 2.3.1 Sous-ensemble flou :

Nous venons de voir ce que l'on entend par sous-ensemble ou, d'un point de vue formel. Un sous-ensemble  $A$  sur un univers de discours  $U$ , est représenté comme dans la figure 3 à travers sa fonction caractéristique  $\mu_A$ . Il peut également être décrit par un certain nombre de caractéristiques comme:

- *son support :*

$$\text{Support}(A) = \{x \in U / \mu_A(x) \neq 0\} \quad (4.1)$$

- *sa hauteur :*

$$\text{Hauteur}(A) = \sup_{x \in U} \{ \mu_A(x) \} \quad (4.2)$$

- *son noyau :*

$$\text{noyau}(A) = \{x \in U / \mu_A(x) = 1\} \quad (4.3)$$

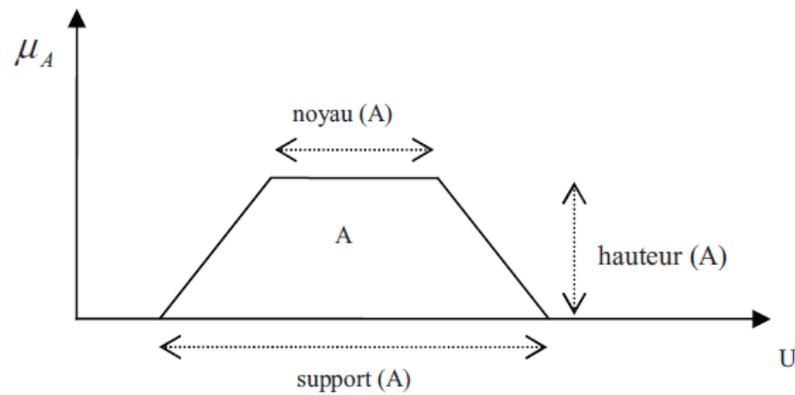


Figure 3 Représentation d'un sous-ensemble flou et principales caractéristiques.

Le concept de sous-ensemble flou a été introduit pour éviter les passages brusques d'une classe à une autre (de la classe noire à la classe blanche par exemple) et autoriser des éléments à n'appartenir complètement ni à l'une ni à l'autre (à être gris, par exemple) ou encore à appartenir partiellement à chacune (avec un fort degré à la classe noire et un faible degré à la classe blanche dans le cas du gris foncé).

La notion de sous-ensemble flou permet de traiter :

- des catégories aux limites mal définies (comme « centre ville » ou « ancien »),
- des situations intermédiaires entre le tout et le rien (« presque noir »),
- le passage progressif d'une propriété à une autre (de « proche » à « éloigné » selon la distance),
- des valeurs approximatives (« environ 2 km »),
- des classes en évitant l'utilisation arbitraire de limites rigides (il est difficile de dire qu'une maison située à 200 m de la plage en est proche, mais qu'à 210 m elle en est éloignée).

### 2.3.2 Variable linguistique :

Une variable linguistique sert à modéliser les connaissances imprécises ou vagues sur une variable dont la valeur précise peut être inconnue. Elle est définie par un triplet  $(V, U, T_V)$  où  $V$  représente une variable classique (âge, température, . . .) définie sur l'univers de discours  $U$ .  $T_V$  est l'ensemble des instanciations possibles de la variable  $V$  : Il s'agit de sous-ensembles flous repérés par leur label  $A_i$  : on écrit ainsi  $T_V = \{ A_1, A_2, A_3, A_n \}$  Graphiquement, une variable linguistique peut être représentée comme dans la figure 4.

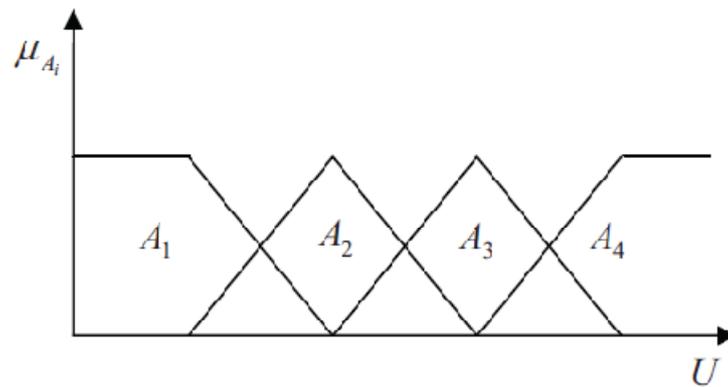


Figure 4 Représentation d'une variable linguistique définie comme

$$\{ U, V, T_V = \{ A_1, A_2, A_3, A_4 \} \}$$

Un sous-ensemble flou permet de représenter différentes notions, en particulier la spécificité et la précision. Ces différentes notions apparaissent dans la figure 5.

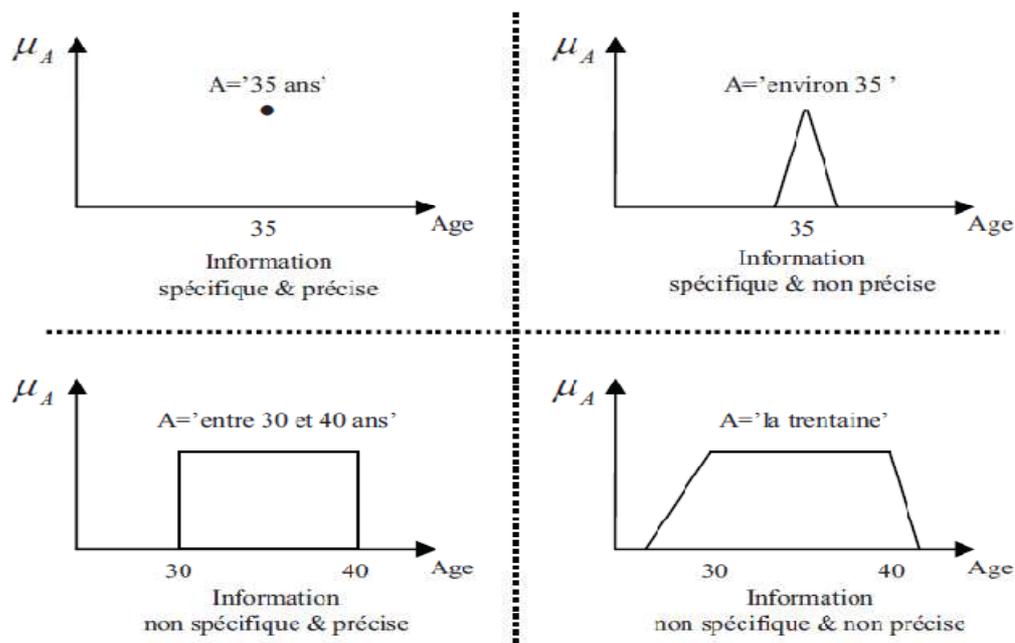


Figure 5 Notions de spécificité et de précision représentées à l'aide de sous-ensembles flous.

### 2.3.3 Opérateurs de la logique floue :

Les variables linguistiques sont liées entre elles au niveau des inférences par des opérateurs ET ou OU. IL s'agit d'opérateurs de la logique floue qui interviennent sur les fonctions d'appartenance représentant les variables linguistiques. Le plus souvent, les opérateurs ET ou OU sont réalisés respectivement par les règles «min» et «max». Il y a

alors une certaine affinité avec les règles de la logique classique. Cependant, il existe un grand nombre de règles pour la réalisation des opérateurs ET et OU qui tiennent compte du caractère particulier de la logique floue.

Soit A et B deux ensembles flous définissent dans le référentiel U avec les fonctions d'appartenances  $\mu_A$  et  $\mu_B$  respectivement :

Définition 1 : (Union) La fonction d'appartenance  $\mu_{A \cup B}$  de l'union  $A \cup B$ , est définis pour tout  $u \in U$  par :

$$\mu_{A \cup B}(u) = \mu_A(u) + \mu_B(u) \quad (4.4)$$

Définition 2 : (intersection) La fonction d'appartenance  $\mu_{A \cap B}$  de l'intersection  $A \cap B$ , est définie pour tout  $u \in U$  par :

$$\mu_{A \cap B}(u) = \min\{ \mu_A(u), \mu_B(u) \} \quad (4.5)$$

Définition 3 : (Complémentation) La fonction d'appartenance  $\mu_{\bar{A}}$  du complément de l'ensemble A, notée  $\bar{A}$ , est définie pour tout  $u \in U$  par :

$$\mu_{\bar{A}} = 1 - \mu_A(u) \quad (4.6)$$

Définition 4 : (produit cartésien) soit  $A_1, \dots, A_n$  des ensembles flous respectivement définis sur  $U_1, \dots, U_n$ , le produit cartésien de  $A_1, \dots, A_n$ , est un ensemble flou définit sur  $U_1, \dots, U_n$ , de fonction d'appartenance :

$$\mu_{A_1 \times \dots \times A_n}(\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n) = \min(\mu_{A_1}(\mu_1), \dots, \mu_{A_n}(\mu_n)) \quad (4.7)$$

#### 2.3.4 Fonction d'appartenance :

Afin de permettre un traitement numérique des variables linguistiques dans la prise de décisions floues sur ordinateur, une définition des variables linguistiques à l'aide de fonctions d'appartenance s'impose. Dans ce contexte on associe à chaque valeur de la variable linguistique une fonction d'appartenance désignée par  $\mu_A(x)$ , qui sera désignée par le degré ou le facteur d'appartenance. Il est à noter que l'ensemble des éléments de x pour lesquels  $\mu_A(x) > 0$ , est appelé «support de A». Le plus souvent, on utilise pour les fonctions d'appartenance les fonctions suivantes :

*Fonction triangulaire* : Elle est définie par trois paramètres {a, b, c} qui déterminent les coordonnées des trois sommets.

$$\mu(x) = \max\left(\min\left(\frac{x-a}{b-a}, \frac{c-x}{c-b}\right), 0\right) \quad (4.8)$$

*Fonction trapézoïdale* : Elle est définie par quatre paramètres {a, b, c, d} :

$$\mu(x) = \text{MAX}\left(\min\left(\frac{x-a}{b-a}, 1, \frac{c-x}{c-b}\right), 0\right) \quad (4.9)$$

*Fonction gaussienne* : Elle est définie par deux paramètres  $\{\sigma, m\}$  :

$$\mu(x) = \exp\left(-\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (4.10)$$

*Fonction sigmoïdale* : Elle est définie par deux paramètres  $\{a, c\}$  :

$$\mu(x) = \frac{1}{1 + \exp(-a(x-c))} \quad (4.11)$$

### 2.3.5 Propositions et règle floue :

Une *proposition floue élémentaire* est définie à partir d'une variable linguistique  $(V, U, T_v)$  par la qualification « $V$  est  $A$  », avec  $A$  appartenant à  $T_v$ . Par exemple, « taille\_de\_Paul est MOYENNE » est une proposition élémentaire définie à partir de la variable linguistique (taille\_de\_Paul, {tailles}, {..., MOYENNE, ...}).

La valeur de vérité d'une proposition élémentaire « $V$  est  $A$  » est égale à  $\mu_A(v)$  où  $v$  correspond à la valeur numérique exacte de  $V$ . Une proposition floue générale est définie à partir de propositions élémentaires et d'opérateurs logiques binaires (et, ou, implique) ou un aire (non). Il existe plusieurs méthodes pour calculer la valeur de vérité de telles propositions. Nous ne donnons ici que les plus communément utilisées.

- *conjonction* :  $(V_1 \text{ est } A_1) \text{ et } (V_2 \text{ est } A_2)$

$$\min(\mu_{A_1}(V_1), \mu_{A_2}(V_2)) \quad \text{Logique de Zadeh}$$

$$\max(\mu_{A_1}(V_1) + \mu_{A_2}(V_2) - 1, 0) \quad \text{Logique de Lukasiewicz}$$

$$\mu_{A_1}(V_1) \cdot \mu_{A_2}(V_2) \quad \text{Logique de probabiliste}$$

- *disjonction* :  $(V_1 \text{ est } A_1) \text{ ou } (V_2 \text{ est } A_2)$

$$\max(\mu_{A_1}(V_1), \mu_{A_2}(V_2)) \quad \text{Logique de Zadeh}$$

$$\min(\mu_{A_1}(V_1) + \mu_{A_2}(V_2), 1) \quad \text{Logique de Lukasiewicz}$$

$$\mu_{A_1}(V_1) + \mu_{A_2}(V_2) - \mu_{A_1}(V_1) \cdot \mu_{A_2}(V_2) \quad \text{Logique de probabiliste}$$

- *implication*:  $(V_1 \text{ est } A_1) \text{ implique } (V_2 \text{ est } A_2)$

$$\min(1 - \mu_{A_1}(V_1) + \mu_{A_2}(V_2), 1)$$

$$\min(\mu_{A_1}(V_1), \mu_{A_2}(V_2))$$

$$\mu_{A_1}(V_1) \cdot \mu_{A_2}(V_2)$$

- *complémentation :non* ( $V$  est  $A$ )

1-  $\mu_A (V)$

Dans ce qui précède,  $v, v_1$  et  $v_2$  correspondent à des instanciations numériques réelles des variables  $V, V_1$  et  $V_2$ .

Une *règle floue* est une proposition floue générale utilisant une implication entre deux propositions floues quelconques. Par exemple :

$(V_1 \text{ est } A_1)$  et  $(V_2 \text{ est } A_2)$  **implique**  $(V_3 \text{ est } A_3)$

ou sous une forme plus linguistique :

si  $(V_1 \text{ est } A_1)$  et  $(V_2 \text{ est } A_2)$  **alors**  $(V_3 \text{ est } A_3)$

est une règle floue. La partie  $(V_1 \text{ est } A_1)$  et  $(V_2 \text{ est } A_2)$  est appelée *prémisse* de la règle et  $(V_3 \text{ est } A_3)$  *conclusion*.

#### 2.4 Structure générale de la logique floue :

La logique est composée de quatre éléments suivants (figure :

- interface de fuzzification.
- base de connaissances.
- moteur d'inférence floue.
- interface de défuzzification.

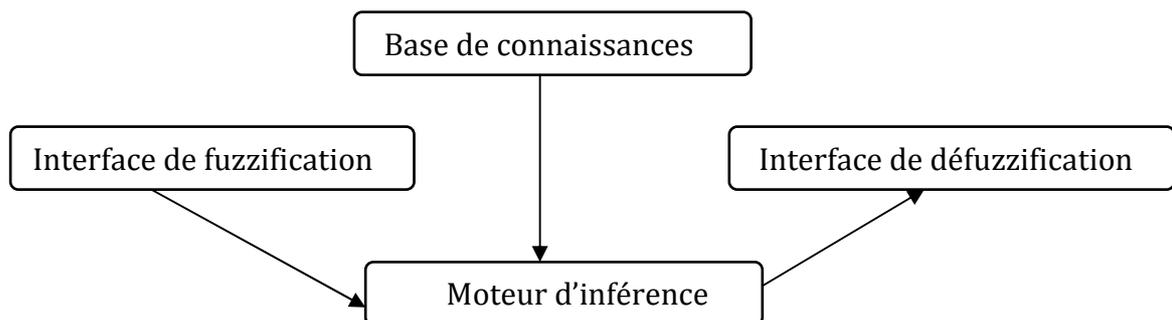


Figure 6 Structure générale

##### 2.4.1 Interface de fuzzification :

Transforme les entrées numériques (vecteurs précises) en des ensembles flous. Le choix de l'opérateur de fuzzification dépend de la confiance que l'on accorde aux mesures effectuées. Ainsi si la mesure  $x_0$  est exacte, le sous-ensemble flou  $x_A$  doit être représenté

par un *fait précis*. Par conséquent, on utilise comme opérateur de fuzzification la transformation dite de singleton. La fonction d'appartenance du sous ensemble flou  $x_A$  est alors définie par :

$$\mu_{A_x}(x) = \begin{cases} 1 & \text{si } x = x_0 \\ 0 & \text{si } x \neq x_0 \end{cases} \quad (4.12)$$

Par contre, si la mesure de la variable est incertaine, par exemple à cause du bruit, le sous-ensemble flou  $A_x$  doit être représenté par un *fait imprécis*. On utilise alors la méthode de fuzzification qui associé à la variable de mesure  $x_0$  une fonction d'appartenance telle que, par exemple :

Ce sous-ensemble flou comprend donc la mesure  $x_0$  avec une appartenance unité et les valeurs voisines de  $x_0$  avec une appartenance inversement proportionnelle à l'écart avec  $x_0$ .

La base du triangle est fonction de l'importance relative des erreurs de mesures. En effet, plus elles sont importantes, plus la mesure de la variable  $x_0$  devient imprécise, et donc, plus le triangle doit s'élargir.

#### 2.4.2 Base de connaissances :

La conception d'une base de connaissances représente la phase dans la conception des systèmes experts. Elle comprend la base de données et la base des règles floues.

##### *-La base de données*

Contient la définition des ensembles flous, les facteurs d'échelle pour la normalisation des ensembles de référence et la partition de l'espace flou d'entrée et sortie.

##### *-La base des règles floues*

Elle rassemble l'ensemble des règles floues de type « *Si-Alors* » décrivant en termes linguistiques basés sur la connaissance d'un expert le comportement dynamique du système.

$R_1$  : Si  $x_1$  est  $A^1_1$  et ..... et  $x_n$  est  $A^1_n$

*Alors  $u_i$  est  $B^i$*

#### 2.4.3 Moteur d'inférence floue :

C'est un mécanisme de décision. Il permet à partir d'un fait observé de la base des règles floues une décision en exploitant le raisonnement approximatif. Dans les inférences par logique floue interviennent les opérateurs ET et OU. L'opérateur ET

s'applique aux variables à l'intérieur d'une règle tandis que l'opérateur OU lie les différentes règles.

Il existe plusieurs méthodes pour réaliser ces opérateurs dans une inférence et qui s'appliquent aux fonctions d'appartenance à savoir :

- Méthode d'inférence max-min (Mamdani)
- Méthode d'inférence max-prod (Larsen)
- Méthode d'inférence somme-prod (Sugeno)

#### 2.4.4 Interface de défuzzification :

La stratégie de commande utilisée est décrite par un ensemble de déclaration linguistique ou règles. Puisque le processus exige à ses entrées des valeurs non floues, l'ensemble flou de sortie du régulateur doit être défuzzifié. La défuzzification est l'opération qui consiste à extraire d'un ensemble flou une valeur numérique considérée comme valeur significative (figure7).

##### *-Méthode du centre de gravité (DEF1)*

C'est la méthode la plus utilisée dans les contrôleurs flous. Elle donne comme valeur le centre de gravité de l'ensemble flou. La sortie défuzzifiée Z est définie par

$$Z = \frac{\sum_{j=1}^n \mu_z(z_j) z_j}{\sum_{j=1}^n \mu_z(z_j)} \quad (4.13)$$

##### *-Méthode du plus grand maximum (DEF2) :*

Cette méthode donne comme résultat la plus grande valeur dont la grandeur a le plus grand degré d'appartenance.

##### *-Méthode du plus petit maximum (DEF3) :*

Elle donne comme résultat la plus petite valeur dont la grandeur a le plus grand degré d'appartenance.

##### *-Méthode de la moyenne des maxima (DEF4) :*

Elle donne comme valeur la moyenne des valeurs dont le degré d'appartenance est maximal.

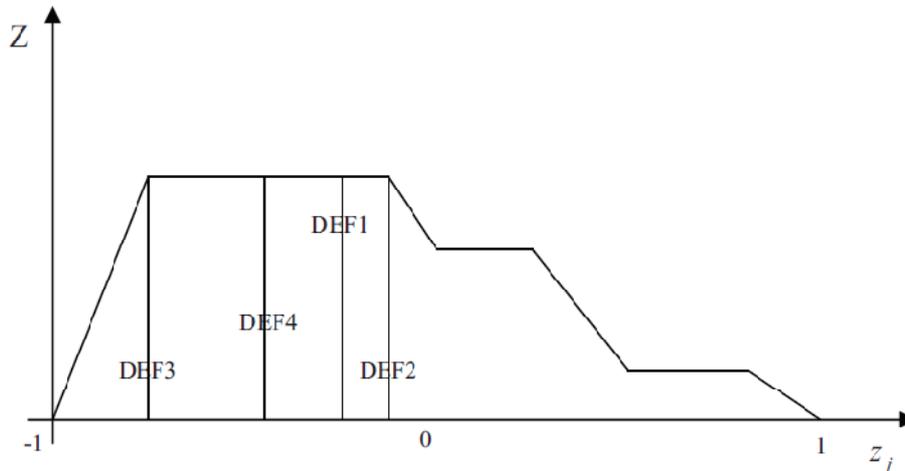


Figure 7 Différentes méthodes de défuzzification

### 3. Diagnostic de la machine basée sur la logique floue [25]:

#### 3.1 Analyse spectrale (FFT) :

Le diagnostic de défaut par la logique floue est basé sur l'analyse spectrale du courant statorique. Les fréquences qui apparaissent dans le spectre montrant la présence d'un défaut de court-circuit sont indiquées par l'équation suivante [26] :

$$f_{cc} = f \cdot \left\{ k \pm \frac{n}{p} (1 - g) \right\} \quad (4.14)$$

$p$  : Nombre de la paire de pole.

$g$  : Glissement

$f$  : Fréquence fondamentale.

$f_{cc}$  : Fréquence du court-circuit.

$N$  : 1,2,3,...

$K$  : 1,2,3...

Les figures suivantes présentent l'analyse spectrale (FFT) du courant statorique pour trois cas suivants :

- court-circuit de 2%.
- court-circuit de 5%.
- court-circuit de 9%.

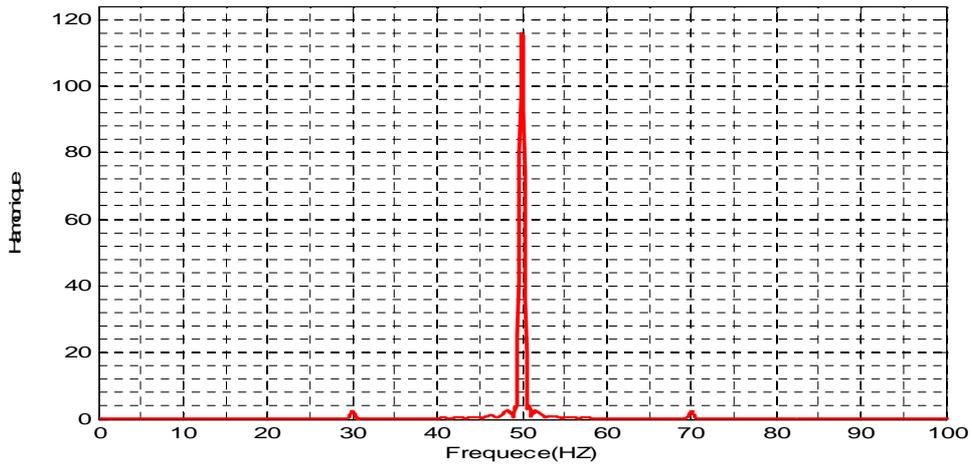


Figure 8 courts-circuits de 2%.

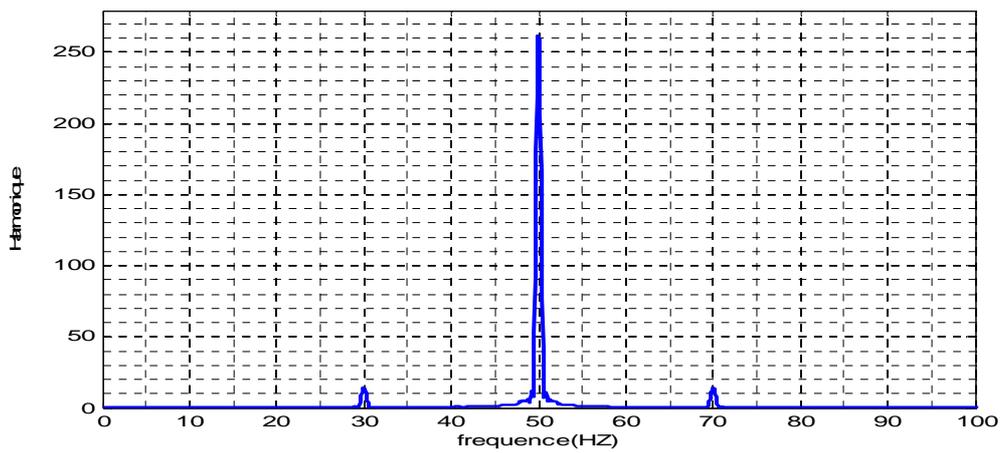


Figure 9 courts-circuits de 5 %.

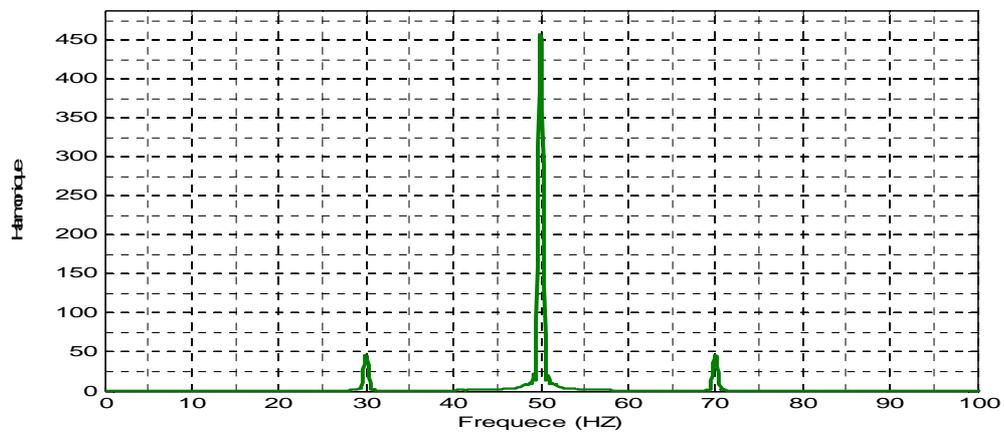


Figure 10 courts-circuits 9%.

### 3.2 fuzzification :

L'importance des fréquences de court-circuit  $f_{cc1}$  et  $f_{cc2}$  ont été définies comme variables d'entrée dans le système de diagnostic basé brouillé. Elles étaient des premières de tous « fuzzification » en conséquence au Tableau 1. Afin de les faciliter pour interpréter, l'amplitude courante des composants liés aux défauts a été normalisée pour l'utilisation de la fréquence fondamentale comme valeur basse. Par conséquent, les valeurs des variables d'entrée ont été traduites dans l'intervalle [0.1], suivant les indications du Tableau I. Les variables d'entrée ont été assignées les noms CC1 (premier indicateur de court-circuit) et CC2 (en second lieu indicateur de court-circuit). Elles correspondent aux 1<sup>èmes</sup> et 2<sup>èmes</sup> colonnes du Tableau 1. Des fonctions brouillées trapézoïdales et triangulaires d'adhésion ont été définies pour manipuler les variables d'entrée comme illustré dans figure 11. Les limites de chaque fonction ont été ajustées ont basé sur le comportement des variables d'entrée CC1 et CC2 a déterminé expérimentalement par des mesures d'harmonique du courant. Les valeurs linguistiques définies pour l'ensemble d'entrée sont définies en tant qu'étant : très bas (TB), bas (B), moyenne (M), haut (H). Basé sur les données mesurées, un ensemble de règles brouillées ont été définis. En termes de terminologie brouillée les variables CC1 and CC2 sont l'antécédent et l'état d'enroulement de phase (cc) est le conséquent. Ce dernier est associé à 4 fonctions d'adhésion qui tracent le rendement à l'ensemble brouillé suivant (valeurs linguistiques) : (S) sain et défaut mineur (Dm), défaut majeur (DM), défaut grave (DG).

|       | Mag f1 | Mag f2 |
|-------|--------|--------|
| Sain  | 0.199  | 0.118  |
| 2% CC | 0.279  | 0.314  |
| 5% CC | 0.597  | 0.575  |
| 9% CC | 0.861  | 0.827  |

*Tableau 1 Rapport des amplitudes de différentes court-circuits.*

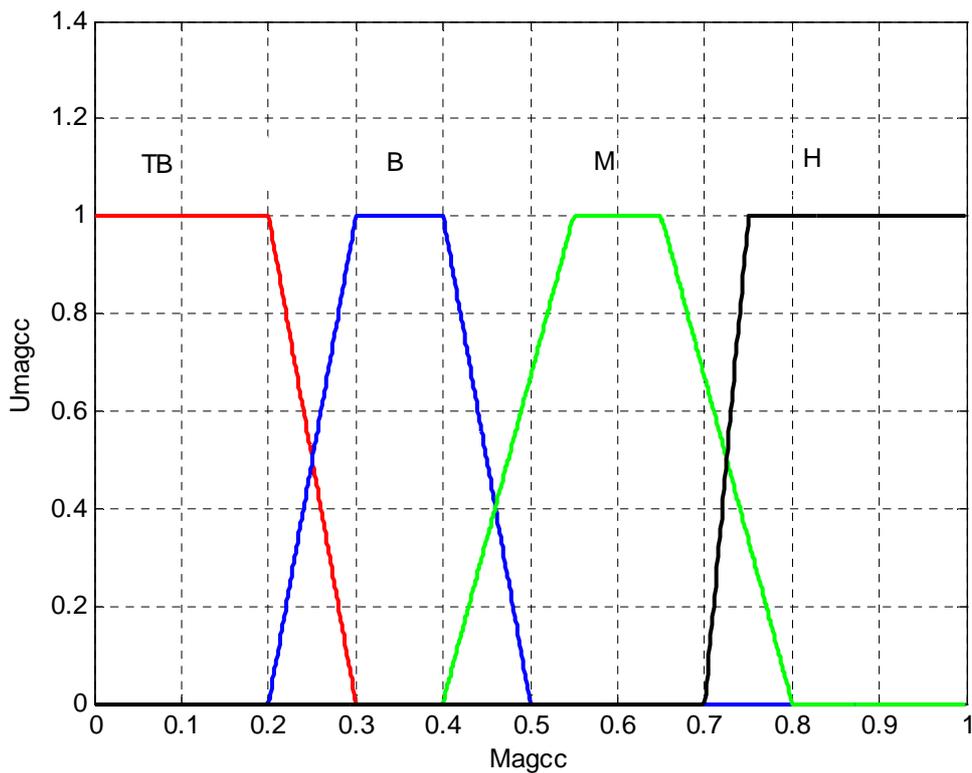


Figure 11 la fonction d'appartenance des entrées  $cc1$  et  $cc2$ .

### 3.3 Les règles de la logique floue :

Les règles pour l'inférence basée brouillée sont décrites comme suit :

Règle 1 : si  $CC1$  TB et  $CC2$  TB alors  $cc$  est S

Règle 2 : si  $CC1$  B et  $CC2$  TB alors  $cc$  est Dm

Règle 3 : si  $CC1$  B et  $CC2$  B alors  $cc$  est Dm

Règle 4 : si  $CC1$  M et  $CC2$  B alors  $cc$  est DM

Règle 5 : si  $CC1$  M et  $CC2$  H alors  $cc$  est DM

Règle 6 : si  $CC1$  H et  $CC2$  M alors  $cc$  est DG

Règle 7 : si  $CC1$  H et  $CC2$  H alors  $cc$  est DG

### 3.4 defuzzification :

La méthode centroïde a été employée pour le processus de defuzzification. Bien que d'autres méthodes de defuzzification aient été essayées, la méthode centroïde était celle qui a produit les meilleurs résultats. Des fonctions trapézoïdales et de triangulaire-forme d'adhésion ont été également définies pour la variable de rendement  $cc$ . La

gamme de rendement pour cette variable est définie en tant qu'étant l'intervalle [0-10] divisé en 4 sections comme décrit dans le tableau 2. Comme peut être vu dans figure 12. 10 Afin d'examiner l'exécution des cas développés de système brouillé en particulier, les mêmes valeurs mesurées ont été alimentées aux variables d'entrée CC1 et CC2 et les résultats comparés à la correspondance ont obtenu expérimentalement. Les résultats obtenus avec les systèmes brouillés peuvent être vus dans le deuxième et la troisième colonne du tableau III et des valeurs correspondantes pour la variable de rendement cc est montrée dans la quatrième colonne. Les valeurs linguistiques associées sont dans la cinquième colonne de ce Tableau. De ces résultats il peut conclure que les systèmes brouillés mettent en boîte fiable détectent le court-circuit dans l'enroulement de phase de la machine considérée.

| Sortie flou         | Etat de machine | Court circuit (%) |
|---------------------|-----------------|-------------------|
| $0 \leq CC \leq 1$  | Sain            | 0%                |
| $1 \leq CC \leq 3$  | Défaut mineur   | 2%                |
| $3 \leq CC \leq 6$  | Défaut major    | 5%                |
| $6 \leq CC \leq 12$ | Défaut grave    | 9%                |

*Tableau 2* La relation entre l'état de la machine et la sortie floue.

On peut citer les relations directe entre les variables d'entrées et celles des sorties qui sont présentées dans le tableau suivant :

|      | Entree |       | Sortie |
|------|--------|-------|--------|
|      | CC1    | CC2   | CC     |
| Sain | 0.199  | 0.118 | 0.75   |
| 2%   | 0.279  | 0.314 | 2.49   |
| 5%   | 0.597  | 0.575 | 5.5    |
| 9%   | 0.861  | 0.827 | 8.06   |

*Tableau 3* Les relations entre les variables d'entrées et les sorties.

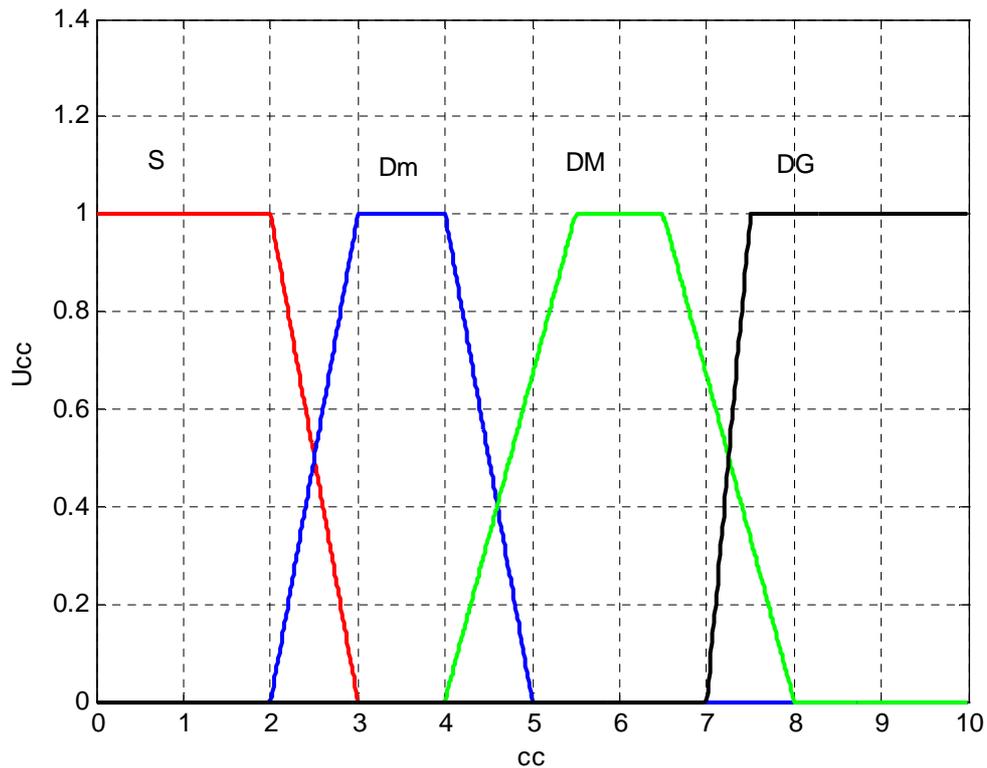


Figure 12 la fonction d'appartenance de sortie cc.

#### 4.Conclusion :

Ce chapitre présent l'application de la technique de la logique floue pour la détection et la classification de défauts de courts-circuits internes dans les enroulements statorique de moteur asynchrone. Les défauts des courts-circuits sont détectés et caractérisés par rapports au spectre fréquentielle du courant statorique. Les résultats de simulation de détection et de diagnostic de défaut sont affichés et commentés. La méthode appliquée a montré l'efficacité pendant que les résultats de la simulation correspondent aux prévus au système développé. Les résultats ont obtenu actuel un grand degré de fiabilité, qui leur permet d'être employés comme outil de surveillance pour les moteurs asynchrone.

### **CONCLUSION ET PERSPECTIVE.**

Nous avons fait état d'une méthode permettant la surveillance d'une machine asynchrone triphasée lorsqu'un défaut statorique apparaît. Pour cette surveillance, nous avons présenté un modèle de la machine asynchrone qui permet d'étudier le phénomène répercuté sur le courant statorique. L'analyse spectrale de ce courant statorique a permis de détecter et de quantifier les raies présentes sur le spectre du courant. La valeur du défaut survenue sur la partie statorique grâce à l'analyse de l'amplitude et de la fréquence des raies présentes sur le spectre du courant par la technique de la logique floue. De plus, il a été montré que l'utilisation de la logique floue était indispensable pour permettre une classification fiable du défaut statorique.

Cette étude de défaut de court circuit statorique s'effectue aisément sur une machine à cage d'écureuil lorsque la phase statorique présente un court circuit entre spire.

Cette détection de court circuit permet donc d'intervenir sur le moteur où le stator est défaillant avant qu'un dysfonctionnement total de la machine asynchrone soit engendré.

Vu l'apport appréciable qu'a présentée le diagnostic de la MAS par la technique de la logique floue, il apparaît intéressant de compléter cette étude par une implantation de la stratégie développée pour un processus réel. Les résultats obtenus doivent aussi être étendus d'une part à d'autres types de défaut dans cette machine électrique telles que les défauts rotoriques et, d'autre part, à d'autres machines asynchrones comme la machine asynchrone à rotor bobinée ou à double stator.

Il sera aussi utile de développer cette technique de diagnostic pour qu'elle soit capable d'aller au loin dans le domaine de la localisation de défaut afin d'accélérer l'intervention en cas de défaillance surtout pour les machine à double alimentation ou à double stator. Là où il y a plus d'un seul bobinage triphasé.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

---

### REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] N. Amar 'Conception d'Observateurs Robustes pour le Diagnostic des Processus Energétiques' thèse de magistère 2009, université de Annaba
- [2] V. Daniel 'manuel DE génie Electrique ' Edition DUNOD.
- [3] L. Lasne 'Notions de base et machines électriques 'Edition DUNOD.
- [4] W. Théodore 'Electrotechnique ' Edition de boeck.
- [5] O. Ondel 'diagnostic par reconnaissance des formes : application à un ensemble convertisseur – machine asynchrone' thèse de Doctorat 2006.
- [6] B. Tarek 'recherche de signature électromagnétique des défauts dans Une Machine Asynchrone ET Synthèse D'Observateurs en Vue Du Diagnostic' thèse de Doctorat 2001.
- [7] G. Didier ' Modélisation et diagnostic de la machine asynchrone en présence de défaillances' thèse de Doctorat 2004.
- [8] S. M. A. Cruz 'Stator winding fault diagnosis in three-phase using synchronous motors, by the extended Park's vector approach' IEEE Trans. Ind. Applicat 2000.
- [9] J. Ragot 'Diagnostic des systèmes linéaires' collection pédagogique d'automatique.
- [10] P. Sylvain 'intelligence artificielle et diagnostic' université de Valenciennes (UMR CNRS 8530).
- [11] F. Fiorenzo 'Recent Developepments of induction motor Drives Fault diagnosis using AI Techniques' IEEE VOL 47.NO .5.OCTOBER 2000.
- [12] Y. B. Ivonne ' Fault Diagnosis Using Neural Technique Based on the Simulation Results of Stator Faults for a Three-Phase Induction Motor Drive System' IEEE.
- [13] L. Baghli 'Modélisation Et Commande Des Machines Asynchrone', Cours De Commande IUFM De Lorraine UHP 2005.
- [14] J. P Caron, J P Hautier, 'Modélisation Et Commande De La Machine Asynchrone', Edition Technip, Paris 1995.
- [15] F. Barrêt 'Régime Transitoire Des Machines Tournantes Electriques', Collection Des Etudes De Recherches Edition Eyrolles, Paris 1982.
- [16] B. OUAHID' contribution à l'analyse des onduleurs multi niveaux fonctionnement symétrique et asymétrique' mémoire de magistère 2005.
- [17] G. Harley 'Transient Model for Induction Machines with Stator Winding Turn Faults' IEEE 2000.
- [18] S. Jorge 'Model Based Stator Fault Detection in Induction Motors'2006 IEEE.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

---

- [19] R. Pascal 'Coupled Magnetic Circuit Method and Permeance Network Method Modeling of Stator Faults in Induction Machines' 2008 IEEE.
- [20] B.S 'Diagnosis by Parameter Estimation of Stator and Rotor Faults Occurring in Induction Machines' 2006 IEEE.
- [21] S. Bachir, "Contribution au diagnostic de la machine asynchrone par estimation paramétrique," Thèse de doctorat, Dept. Elect. Eng., Univ. Poitiers, Poitiers, France, 2002.
- [22] Benbouzid, M.E.H.; Nejjari, H. (2001). A simple fuzzy logic approach for induction motors stator condition monitoring. Electric Machines and Drives Conference, IEMDC 2001. IEEE International, pp. 634 -639.
- [23] Caldara, S.; Nuccio, S.; Galluzzo, G.R.; Trapanese, M. (Maio 1997). ' A fuzzy diagnostic system: application to linear induction motor drives. Instrumentation and Measurement Technology Conference' IMTC/97 IEEE, Vol. 1, pp.:257-262.
- [24] B. Bouchon' La logique floue et ses applications' édition Wesley.
- [25] P. Luís Alberto' Motor Current Signature Analysis and Fuzzy Logic Applied to the Diagnosis of Short-Circuit Faults in Induction Motors' 2005 IEEE.
- [26] F. Mark 'current signature analysis to detect induction motor faults' IEEE Industry Applications Magazine July/August 2001.