

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne démocratique et populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

01 سعد دحلب جامعة البليدة
Université SAAD DAHLAB de BLIDA 01

كلية التكنولوجيا
Faculté de Technologie

قسم الآلية و الالكتروتقني
Département d'Automatique et Electrotechnique



Mémoire de Master

Option Électrotechnique

Spécialité Machines
Électriques

Présenté par

LOUKAL TAREK

&

HATCHANE HAMZA

SURVEILLANCE DES MOTEURS ASYNCHRONE PAR LES MACHINES A
VECTEURS DE SUPPORT (SVM)

Promoteur : **HACHELAF RADOUANE**

Année Universitaire 2021-2022.

ملخص :

تستخدم الآلات غير المتزامنة على نطاق واسع في الصناعة وأصبحت صيانتها مصدر قلق دائم. في الواقع ، بغض النظر عن استخدامها ، يمكن أن تكون المحركات موقعا لمجموعة متنوعة من الأعطال.

في هذا السياق ، يتمثل عملنا في تطوير أداة كاملة قادرة على توفير تشخيص موثوق. يعتمد نهجنا سمحت لنا قاعدة البيانات الحقيقية بالتحقق من أهمية (SVM) على استخدام آلات المتجهات الداعمة. هذه الطريقة عندما يتم تشغيل المحرك غير المتزامن بواسطة الشبكة الكلمات الدالة:

آلات غير متزامنة تشخيص الخطأ دعم آلات ناقلات (SVM) ؛ برنامج التدفق ثنائي الأبعاد

Résumé :

Les machines asynchrones sont largement utilisées dans l'industrie et leur maintenance est devenue une préoccupation permanente. En effet, quelle que soit son utilisation, les moteurs peuvent être le siège d'une variété importante de défaillances.

Dans ce contexte, notre travail consiste à mettre au point un outil complet capable de fournir un diagnostic fiable. Notre approche est basée sur l'utilisation des machines à vecteurs de support (Support Vector Machine (SVM)). Une base de données réelle nous a permis de vérifier la pertinence de cette méthode lorsque le moteur asynchrone est alimenté par le réseau.

Mots clés : Les machines asynchrone ; diagnostic des défauts; machines à vecteurs de support (SVM) ; Logiciel Flux 2D.

Abstract:

Asynchronous machines are widely used in industry and their maintenance has become a permanent concern. Indeed, whatever its use, engines can be the seat of a wide variety of failures.

In this context, our work consists in developing a complete tool capable of providing a reliable diagnosis. Our approach is based on the use Support Vector Machine (SVM). A real database allowed us to check the relevance of this method when the network powers the asynchronous motor.

Key words :

Asynchronous machines; fault diagnosis; support vector machines (SVM); 2D Flux software.

SOMMAIRES

| | |
|--|-------------------|
| Introduction générale | 1 |
| Chapitre I | Généralité |
| 1 Introduction | 3 |
| 2 Exploitation des moteurs asynchrones | 3 |
| 3 Description de la machine asynchrone | 3 |
| 3.1 Le stator | 3 |
| 3.2 Le rotor | 4 |
| 3.3 Les organes mécaniques | 5 |
| 4 Principe de fonctionnement d'un moteur asynchrone | 6 |
| 5 Etude statistique des défaillances de la machine asynchrone | 6 |
| 5.1 Défaillances statoriques | 7 |
| <i>5.1.1 Défauts d'isolant dans un enroulement</i> | 8 |
| <i>5.1.2 Court-circuit entre spires</i> | 8 |
| <i>5.1.3 Court-circuit entre phases</i> | 9 |
| <i>5.1.4 Court-circuit phase/bâti</i> | 9 |
| <i>5.1.5 Défauts de circuit magnétique</i> | 10 |
| 5.2 Défaillances au rotor | 10 |
| <i>5.2.1 Ruptures de barres</i> | 11 |
| <i>5.2.2 Ruptures d'anneaux</i> | 11 |
| <i>5.2.3 Excentricité statique et dynamique</i> | 12 |
| 5.3 Défaillances mécaniques | 13 |
| <i>5.3.1 Défauts roulements</i> | 13 |
| 6 Méthodes de modélisation des machines asynchrones | 14 |
| 6.1 Modélisation par les équations magnétiquement couplées (CEMC) | 15 |

SOMMAIRES

| | | |
|-----|--|----|
| 6.2 | Méthode des réseaux de perméances (RNM) | 16 |
| 6.3 | Méthode des éléments finis (MEF) | 17 |
| 7 | Présentation des différentes méthodes de diagnostic : | 17 |
| 7.1 | L'estimation de paramètres physiques | 17 |
| 7.2 | L'estimation d'état | 18 |
| 7.3 | Traitement de signaux | 18 |
| | 7.3.1 Analyse spectrale | 18 |
| | 7.3.2 Analyse cepstrale | 19 |
| | 7.3.3 Les méthodes de détection de fréquences connues | 19 |
| | 7.3.4 Méthodes temps – fréquence | 19 |
| | 7.3.5 Méthode temps-échelle | 19 |
| 8 | Technique de traitement de signal utilisées dans le diagnostic | 19 |
| 8.1 | Transformée de Fourier rapide (FFT) | 19 |
| 9 | Diagnostic de la machine par l'application des méthodes de l'intelligence artificielle | 21 |
| 9.1 | Systèmes experts | 21 |
| 9.2 | Réseaux de neurones artificiels(RNA) | 22 |
| 9.3 | Logique floue | 23 |
| 9.4 | Réseaux neuro-floue | 23 |
| 10 | Conclusion | 24 |

Chapitre II Modélisation de MAS par éléments finis

| | | |
|---|---|----|
| 1 | Introduction | 26 |
| 2 | Principe de la méthode des éléments finis | 29 |
| 3 | Présentation et structure du logiciel de résolution Flux 2D | 29 |

SOMMAIRES

| | | |
|----------|--|-----------|
| 4 | Etapes de création d'un modèle sain de la MAS | |
| | À cage d'écureuil avec Flux 2D | 29 |
| 4.1 | Construction géométrique | 29 |
| 4.2 | Génération du maillage | 29 |
| 4.3 | Résolution | 29 |
| 4.4 | Exploitation des résultats | 30 |
| 5 | Application et simulation de la MAS | 30 |
| 6 | Couplage avec les équations de circuit | 33 |
| 7 | Résultats graphiques | 33 |
| 7.1 | Fonctionnement sain de la MAS | 33 |
| 7.2 | Fonctionnement en défaut (Court-circuit) de la MAS | 36 |
| 8 | Interprétations | 42 |
| 9 | Conclusion | 42 |

Chapitre III Machine à Vecteurs De Support Et Simulation

| | | |
|------------|---|-----------|
| 1 | Introduction | 43 |
| 2 | Notion de détection | 43 |
| 3 | Notion de classification | 43 |
| 3.1 | Classificateur linéaire | 44 |
| 3.1.1 | Procédure de descente de gradient | 45 |
| 3.1.2 | Algorithme de perceptron | 45 |
| 3.1.3 | Algorithme des moindres carrés | 46 |
| 3.1.4 | Machines à vecteurs de support (SVM) linéaire | 46 |
| 3.2 | Classificateur non linéaire | 46 |

SOMMAIRES

| | | |
|--------------|---|-----------|
| 4 | Les machines à vecteurs de support | 47 |
| 4.1 | Définition | 47 |
| 4.2 | Initialisation et principe d'utilisation | 48 |
| 4.3 | Les SVM et les méthodes multi-classes | 53 |
| 4.3.1 | Un contre tous | 53 |
| 4.3.2 | Un contre un | 54 |
| 5 | Simulation | 54 |
| 5.1 | Introduction | 54 |
| 5.2 | Application sur les machine a vecteur de support | 54 |
| 6 | Conclusion | 57 |
| | Conclusion générale | 59 |
| | Bibliographie | |

REMERCIEMENT

Tout d'abord, on remercie le bon dieu qui nous a donné le courage, volonté, patience, santé durant nos années d'études.

Nous tenons à remercier également nos parents respectifs pour tous les sacrifices qu'ils ont voulu bien consentir à notre égard tout le long de notre cursus universitaire.

En guise de remerciement, nous adressons en particulier notre reconnaissance et gratitude à notre promoteur Mr HACHELAF, et aussi Mr KOUCHIH et Mr BELAZZOUG pour, leur aide, patience, disponibilité et pour la supervision éclairée tout au long de la rédaction de ce mémoire.

Nous remercions les membres du jury, pour l'honneur qu'ils nous ont faits, en acceptant de nous évaluer sur notre travail.

Nos remerciements vont également à tous les enseignants de L'Université SAAD DAHLEB BLIDA et particulièrement à ceux du département d'Automatique et Electrotechnique.

On remercie également toute personne ayant contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Liste des Notations et Symboles

MAS : Machine asynchrone.
CEMC : La Méthode des circuits électriques magnétiquement couplés.
RNM : La méthode des réseaux de permanées.
CIE : Le Modèle à circuits internes équivalents.
MEF : Méthode des éléments Finis.
FFT : (Fast Fourier Transform).
Exc : Excentricité.
CC : Court-circuit.

\vec{H} : Le champ magnétique(A/m)

\vec{E} : Le champ électrique(V/m)

\vec{B} : L'induction magnétique (T)

\vec{J} : La densité du courant total (A/m²)

μ : Perméabilité magnétique (H/m)

σ : Conductibilité électrique (Ω^{-1}/m^{-1})

ϵ : Permittivité électrique [F/m]

ρ : Densité de charge volumique[C/m³]

R : Résistance d'une phase statorique [Ω]

L : Inductance de fuite statorique [H]

Lm: Inductance de magnétisation [H]

In : Courant nominale du moteur [A]

ns : La vitesse de synchronisme tr /s

nr : La vitesse mécanique tr /s

P : Nombre de pair de pole

Nn : La vitesse nominale du moteur tr /min

Pn : Puissance utile nominale du moteur [W]

Q : Puissance réactive absorbé par le moteur [W]

M : Couple utile du moteur [N.m]

Cem : Couple électromagnétique nominale [N.m]

Liste des Figure

| | |
|--|----|
| Figure I.1 : Schéma représentative du stator..... | 4 |
| Figure I.2 : Schéma d'un rotor..... | 4 |
| Figure I.3 : Rotor à cage | 5 |
| Figure.I.4. Proportion du défaut | 7 |
| Figure.I.5. Répartition des pannes sur les machines de faibles et moyennes puissances | 7 |
| FigureI.6 : Représentation des différents défauts statiques possible..... | 8 |
| FigureI.7 : Court-circuitent respire | 9 |
| Figure I.8 : Ruptures de barres..... | 11 |
| Figure I.9 : Excentricité statique et dynamique.... | 12 |
| Figure I.10 Déférentes défaillances des roulements à billes..... | 14 |
| Figure I.11 : Réseau de perméances élémentaire autour d'encoche statorique | 16 |
| Figure I.12: Représentation temporelle vers fréquentielle..... | 20 |
| Figure II.1 Enchaînement des étapes dans Flux 2D® | 30 |
| Figure II.2 : La géométrie de la machine asynchrone..... | 31 |
| Figure II.3 : Affectation des régions surfaciques..... | 32 |
| Figure II.4 : discrétisation de maillage..... | 32 |
| Figure. II.5 : Circuit représentant les effets d'extrémités liés à La géométrie..... | 33 |
| Figure II.6: Les Courants statoriques au niveau des résistances; R-1, R-2, R-3 | |

| | |
|---|----|
| Pour moteur sain..... | 34 |
| Figure II.7: Vitesse de rotation moteur sain..... | 35 |
| Figure II.8: Couple électromagnétique Moteur sain..... | 36 |
| Figure II .9 : Circuit équivalent en présence de défaut..... | 37 |
| Figure II.10: Vitesse de rotation moteur en default (court-circuit)..... | 38 |
| Figure II.11: Le courant de phases 1 statoriques en court-circuit..... | 39 |
| Figure II.12: Les Courants statoriques superposé au niveau des résistances ; (R-1 en CC), R-2, R-3 Moteur en défaut | 40 |
| Figure II.13: Couple électromagnétique pour moteur en défaut | 41 |
| Figure III.1. Hyperplans séparateurs | 48 |
| Figure III.2. Différents éléments pour l’hyperplan..... | 49 |
| Figure III.3. Changement de l'espace des données..... | 52 |

Liste des Tableaux

| | |
|--|----|
| Tableau II.1 : Paramètres globales de la machine..... | 31 |
| Tableau III.1. les valeurs des 3 classes | 56 |

INTRODUCTION GENERALE

Les machines asynchrones sont largement utilisées dans l'industrie et leur maintenance est devenue une préoccupation permanente. En effet, quelle que soit son utilisation, les moteurs peuvent être le siège d'une variété importante de défaillances.

Les différents défauts pouvant intervenir dans des machines asynchrones ont des causes variées. On peut classer ces défaillances en deux catégories principales : les défauts d'origine interne au moteur (Court-circuit du bobinage statorique, cassures de barres et/ou cassures de portion d'anneaux, défauts de roulements,) et les défauts d'origine externe (Défaits d'alimentation,) .

Le diagnostic précoce des machines électriques permet de détecter et de localiser ces défauts pour garantir la fiabilité des moteurs et de planifier les actions de maintenance. Les différentes méthodes de diagnostic reposent sur la comparaison des spectres des grandeurs mesurables de la machine (courant statorique, flux,)

Actuellement, l'utilisation des techniques dites de l'Intelligence Artificielle (réseaux de neurones, logique floue,) ont prouvé leur grande efficacité en matière de diagnostic des machines électriques.

Dans ce contexte, notre travail consiste à mettre au point un outil complet capable de fournir un diagnostic fiable. Notre approche est basée sur l'utilisation des machines à vecteurs de support (Support Vector Machine (SVM)). Une base de données réelle nous a permis de vérifier la pertinence de cette méthode

Dans le premier chapitre nous allons présenter la constitution de la machine asynchrone et aussi leurs différentes défaillances qui peuvent se produire sur ce type de machine ainsi qu'une rappelle sur les méthodes de modélisation de la machine asynchrone triphasée à cage en présence des défauts. on définira également, les techniques de diagnostic par Intelligence Artificielle (IA) et on donnera leurs apports dans la résolution de cette problématique.

Le deuxième chapitre sera consacré à la présentation du modèle de simulation par la méthode des éléments finis, sous logiciel Flux 2D®, pour analyser et le comportement de la machine en absence et en présence de défaillances.

INTRODUCTION GENERALE

Dans le troisième chapitre , nous définirons les différents types de classification (linéaire et non linéaire). Ainsi, nous insisterons, tout particulièrement, sur la machine à vecteurs en introduisant sa théorie et son algorithme de fonctionnement. L'accent est mis sur la capacité de cette approche dans les problèmes multiclassés.

INTRODUCTION
GENERALE

je dédie ce modeste travail à :

- ❖ *A mes très chers parents. Aucun hommage ne pourrait être à la hauteur de l'amour dont ils ne cessent de me combler. Que dieu leur procure bonne santé et longue vie, ma mère la source de tendresse et l'exemple de dévouement qui n'a pas cessé de m'encourager et de prier pour moi, et mon père source de courage et d'inspiration qui a autant sacrifié afin de me voir devenir ce que je suis, merci mes parents !*
- ❖ *A ma sœur et mon frère.*
- ❖ *A toute ma famille sans exception.*
- ❖ *A tous mes amis (es), mes cousins (es).*
- ❖ *A toute la promotion 2022 de master 2 machines électriques.*
- ❖ *Pour finir je souhaite aussi remercier tous ceux qui ont contribué de près ou de loindans mon parcours éducatif et universitaire en particulier, je vous dis merci.*

HATCHANE

Je voudrais en premier lieu dédier ce travail

à mes parents :

*J'aimerais remercier tout spécialement une femme au très
grand cœur pour sa confiance en moi, ses
encouragements, son dévouement, sa patience, son aide,
ma mère*

Et mon père Ahmed

Et Aussi

*A une femme qui, grâce à elle, je suis arrivé à ce stade là :
ma femme*

*A mon frère et mes sœurs pour son soutien qui déborde
d'amour et d'affection*

Et Mes Enfants Aymen Amir et Rayan

LOUKAL

je dédie ce modeste travail à :

- ❖ *A mes très chers parents. Aucun hommage ne pourrait être à la hauteur de l'amour dont ils ne cessent de me combler. Que dieu leur procure bonne santé et longue vie, ma mère la source de tendresse et l'exemple de dévouement qui n'a pas cessé de m'encourager et de prier pour moi, et mon père source de courage et d'inspiration qui a autant sacrifié afin de me voir devenir ce que je suis, merci mes parents !*
- ❖ *A ma sœur et mon frère.*
- ❖ *A toute ma famille sans exception.*
- ❖ *A tous mes amis (es), mes cousins (es).*
- ❖ *A toute la promotion 2022 de master 2 machines électriques.*
- ❖ *Pour finir je souhaite aussi remercier tous ceux qui ont contribué de près ou de loindans mon parcours éducatif et universitaire en particulier, je vous dis merci.*

HATCHANE

Conclusion Générale

1 Introduction

Dans la première partie du chapitre précédent, nous avons vu les différents défauts dans la machine asynchrone ainsi que les signatures de ses défauts. Dans la deuxième partie, nous avons définis les méthodes de diagnostic de la machine asynchrone par l'application des méthodes de l'intelligence artificielle. Dans ce chapitre, nous allons focaliser sur l'une de ses méthodes appelée machine à vecteur de support (SVM) et ces performances dans les applications de classification et de détection. Dans ce contexte, nous introduirons en premier lieu la théorie des SVM. Ensuite, nous citerons ses apports par rapport aux méthodes classiques dans le domaine du diagnostic.

2 Notion de détection

La détection consiste à décider entre deux hypothèses : présence ou absence de défauts (problème à deux classes). On peut détecter le défaut si on aperçoit des résidus de Ce dernier. Ces résidus sont obtenus en comparant l'état réel à un modèle. Lorsque le modèle est confondu au système (aucune erreur de modélisation) les pertes seront strictement égales à zéro, alors c'est le fonctionnement normal, différent de zéro en présence de pannes (on prend en considération les fausse alarmes). Donc, la détection sert à déclencher une alarme lorsqu'un résidu, au moins, est différent de zéro. Les résidus qui signifient la présence d'un écart entre le modèle et le système réel ne sont plus parfaitement égaux à zéro même dans l'absence des défauts [19].

3 Notion de classification :

La classification est un problème de décision sur l'appartenance d'une observation à une classe prédéfinie parmi deux ou plus. C'est une technique de regroupements de données en classes où le classificateur établi une répartition de l'ensemble des données. On trouve deux contexte de méthodes de classification : celles supervisés (classe d'appartenance connue) et d'autres non supervisés, donc on parle ici de deux modes d'apprentissage des données.

Pour l'apprentissage supervisé la sortie désirée est parfaitement connue et le classificateur est guidé. Donc ce type d'apprentissage consiste à comparer le résultat obtenu avec celui désiré et on cherche à minimiser la différence par l'ajustement des poids de connexions.

Le deuxième mode d'apprentissage est le non supervisé. Pour ce type, le classificateur modifie ces paramètres en tenant compte seulement des informations locales. En effet on ne propose pas de sorties désirées préétablies et le modèle s'ajuste aux données en supposant que tous les informations nécessaires existent dans les données d'entrées.

Par ailleurs, la classification est divisée en deux grandes familles : linéaire et non linéaire. Plusieurs études [33,10] ont été faites sur les différents outils de classification et leurs efficacités. On trouve parmi ces deux types du classificateurs, les algorithmes de perceptron, algorithme des moindres carrées, procédure de Ho-Kashyap, procédure de descente de gradient et les machines à vecteurs de support. Pour tous ces méthodes on cherche à minimiser une fonction critère pour arriver à résoudre le problème de classification.

Dans la suite nous définissons les différents algorithmes de classification précédemment citées selon la famille à laquelle ils appartiennent (linéaire ou non linéaire).

3.1 Classificateur linéaire

Le terme de classificateurs linéaire représente une famille de classement statique. Les classificateurs linéaires sont simples à cause de leur fonction discriminante linéaire. On peut distinguer différents algorithmes de classification linéaire dont on cite les plus connus. On commence par la considération d'un problème à deux classes. On appelle ensemble

D'apprentissage avec $x \in \mathbb{R}^N$; $y \in \{-1,1\}$.

Le classificateur linéaire est décrit par une fonction linéaire des exemples

$$\mathcal{F}(x) = \langle w, x \rangle + b \quad (\text{III.1})$$

Avec w le poids de l'entrée x et b est le biais.

$\langle w, x \rangle$ décrit le produit scalaire entre w et x qui égale à $(w^t * x)$.

Dans cette partie, nous définissons quelques algorithmes d'apprentissage pour la classification linéaire. Un intérêt particulier est porté à la classification par machine à vecteur de support.

3.1.1 Procédure de descente de gradient

L'algorithme de descente de gradient est l'algorithme d'optimisation le plus simple [4]. Le principe de cet algorithme est de partir d'un point aléatoire puis se déplacer dans la direction de la plus forte pente. L'algorithme converge vers une solution qui présente le minimum local suite à un certain nombre d'itérations.

3.1.2 Algorithme de perceptron

Cet algorithme est créé par Rosenblatt en 1958. Il est utilisé dans différentes études [30,5] grâce à sa robustesse. En effet, le problème de classification se traduit par la minimisation de la fonction :

$$D(x) = -\sum_{n=1}^n y_i \langle w, x \rangle + b \quad (\text{III},2)$$

Avec : n est le nombre des entrées x , y_i est l'étiquette de données.

L'intérêt de cet algorithme, est de minimiser la somme des points mal classés :

$$\left\{ \begin{array}{l} y_i = 1 \text{ est mal classifié si } \langle w, x \rangle + b < 0 \\ y_i = -1 \text{ est mal classifié si } \langle w, x \rangle + b > 0 \end{array} \right. \quad (\text{III},3)$$

3.1.3 Algorithme des moindres carrés

L'algorithme des moindres carrés sont utilisées dans l'étude [31]. Il est adapté aux modèles linéaires car à l'aide de cette méthode les paramètres peuvent être directement calculables. Les valeurs ainsi calculées sont des estimations sans biais des valeurs réelles des paramètres. En particulier, les erreurs standard des paramètres s'expriment clairement comme des fonctions des erreurs. Les paramètres du modèle ne sont pas indépendants, tandis que les observations soient supposées indépendantes, et leur matrice de covariance peut se calculer explicitement. Les résidus ne sont pas indépendants, et leur matrice de covariance se calcule simplement. La variance des erreurs de mesure peut être jugée explicitement et sans biais.

3.1.4 Machines à vecteurs de support (SVM) linéaire

Les machines à vecteurs de support (*Support Vector Machines (SVM)*) font partie des réseaux de neurones artificiels. Elle repose sur la réalisation d'une fonction de décision.

3.2 Classificateur non linéaire

Naturellement, la plupart des données d'entrée ne sont pas linéairement séparables ce qui rend l'utilisation des outils de classification linéaires non équitable. Souvent le problème du non linéarité est ramené à un problème linéaire par projection des données d'entrée dans un espace où la surface de séparation est considérée linéaire. Donc on cherche à trouver une transformation de l'espace d'entrée vers un autre de plus grande dimension dans lequel les données sont linéairement séparables.

Dans ce contexte, la classification par les Réseaux de Neurones Artificiels (RNA) a fait l'objet de nombreux travaux à cause de leur capacité dans la résolution des problèmes non linéaires dès l'apprentissage. Il est démontré que les RNA ont la capacité d'approximer n'importe quelle fonction continue (avec une précision arbitraire).

Pour les réseaux de neurones, le problème peut être résolu différemment. Les MLP ou les réseaux de neurones RBF modélisent la fonction de séparation par la fixation d'un nombre de couches cachées selon la complexité du problème.

D'autre part, l'utilisation des SVM non linéaires nous ramène à définir une nouvelle fonction appelé fonction noyau ou Kernel. Cette fonction aide à transformer le problème dans l'espace linéaire et par suite toutes les règles définies pour les SVM linéaires seront valables. Cette fonction est exprimée par un produit scalaire dans un nouvel espace à partir de données principales. La fonction noyau est définie par :

$$K(x_i, x_j) = \langle \phi(x_i), \phi(x_j) \rangle \quad (\text{III.4})$$

Avec ϕ est la projection des données de l'espace initial dans le nouvel espace. ϕ est non linéaire.

Différent auteurs [5,9] ont montré que la connaissance de la fonction K ramène à utiliser ϕ sans avoir à le connaître directement. Cette méthode facilite l'étude du problème puisque la détermination de la fonction ϕ est loin d'être évidente.

4 Les machines à vecteurs de support

4.1 Définition

La machine à vecteur de support, introduite par Vladimir Vapnik en 1995, est une méthode de classification supervisée dont on connaît la forme de surface séparatrice. Cette méthode correspond à estimer les paramètres de cette surface et à optimiser la décision. La SVM est appelée méthode à noyau. Elle est inspirée des théories statistiques de l'apprentissage et elle repose sur l'existence d'un classificateur linéaire dans un espace approprié. Initialement, la machine à vecteur de support est utilisée pour résoudre des problèmes de classification bi-classes faisant appel à un ensemble de données pour apprendre les paramètres du modèle. Certains chercheurs justifient l'importance des machines à vecteur de support dans la résolution des problèmes de classification par la théorie de classement c'est-à-dire si l'échantillon d'apprentissage est linéairement séparable, il semble naturel de séparer parfaitement les éléments des deux classes de telle sorte qu'ils soient le plus loin possible de la frontière choisie.

4.2 Initialisation et principe d'utilisation

Pour bien comprendre la théorie des SVM, on commence par définir les notions de base. En effet, le but d'un classificateur est de séparer les données en différentes catégories. Pour les SVM, ce séparateur est appelé « hyperplan ». [5] L'hyperplan est une frontière linéaire qui sépare les deux classes donc sa détermination résout le problème. La difficulté rencontrée se résume par l'existence de plusieurs hyperplans pouvant séparer les données en deux classes. Cette multitude des frontières valides a été résolue lors de développement de l'algorithme des SVM en choisissant l'hyperplan optimal (Figure III.1).

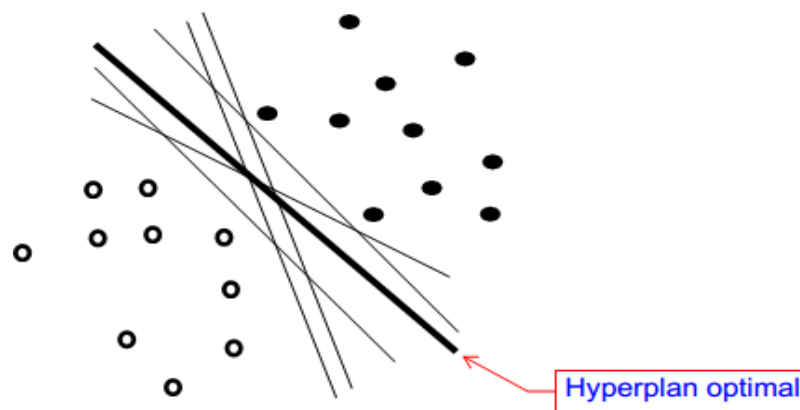


Figure III.1. Hyperplans séparateurs [5]

Les points les plus proches de l'hyperplan sont appelés les vecteurs de support. Seuls ces vecteurs sont utilisés pour déterminer cette frontière.

Dans ce qui suit, on appelle l'étiquettes des classes ($i \in \{1,2\}$) et x_i présentent les données d'apprentissage(ou observations). On définit l'équation de l'hyperplan par :

$$\begin{aligned} h(x) &= \langle w, x \rangle + b & (III.5) \\ &= w^t x + b = 0 \end{aligned}$$

Donc on obtient le système d'équation suivant qui décrit la méthode de classification :

$$\begin{cases} w^t x + b > 0 \text{ Si } y_i = 1 \\ w^t x + b < 0 \text{ Si } y_i = -1 \end{cases} \quad (III.6)$$

Les études [5, 9,17] sur la machine à vecteur de support ont montré que l'hyperplan optimal parmi l'ensemble des hyperplans valides est celui qui est au milieu des points des deux classes d'exemples. Par suite, on introduit la notion de la marge qui est la distance entre les points (qui présentent les données) des deux classes les plus proches entre eux mesurée perpendiculairement au séparateur. Le principe des SVM est d'adapter l'hyperplan qui maximise la marge entre ce dernier et les points de la base d'apprentissage c'est-à-dire qu'on cherche un hyperplan dont la distance aux exemples est maximale. On parle donc d'un séparateur à vaste marge (Figure III.2).

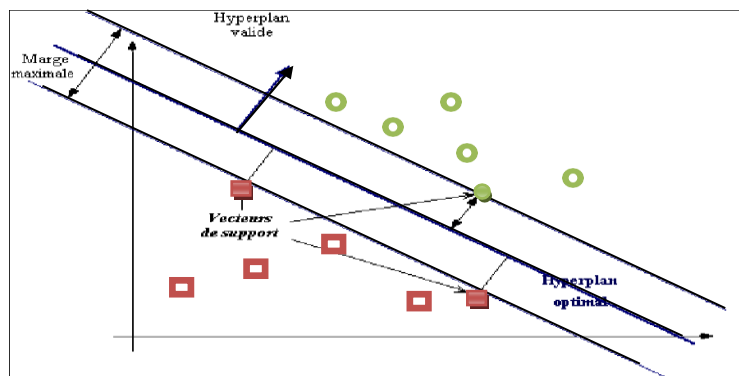


Figure III.2. Différents éléments pour l'hyperplan [17]

Le classement d'un nouvel exemple sera plus sécurisé pour une marge maximale. On définit une fonction $f(x)$ appelée fonction de décision définie par :

$$\begin{cases} f(x_i) = \langle w^t, x \rangle + b = \sum_{j=1}^p w_j x_{ij} + b > 0 \quad \forall x_i \in \Omega_1 \\ f(x_i) = \langle w^t, x \rangle + b = \sum_{j=1}^p w_j x_{ij} + b < 0 \quad \forall x_i \in \Omega_2 \end{cases} \quad (\text{III.7})$$

Avec $\Omega_1 = \left\{ \frac{x_i}{y_i} = 1 \right\}$, $\Omega_2 = \left\{ \frac{x_i}{y_i} = -1 \right\}$ et p est le nombre d'observations, Pour déterminer la classe à laquelle appartient un exemple il suffit de déterminer le signe de $f(x)$.

Soit D l'univers des réalisations possible tel que :

$$D = \{(x_i, y_i), \dots, (x_n, y_n)\} \quad \text{Avec}$$

$$x_i \in \mathbb{R}^N \quad \text{Et} \quad y_i \in \{1, -1\}.$$

La distance entre un point (une donnée) et l'hyperplan est définie par la relation (2.8):

$$d = \frac{|w \cdot x + b|}{\|w\|} \quad (\text{III.8})$$

Cette distance permet d'exprimer la marge qui vaut $\frac{2}{\|w\|}$

Donc le but sera de maximiser cette marge afin de trouver l'hyperplan optimal pour la séparation. La maximisation $\frac{2}{\|w\|}$ de signifie qu'on minimise $\|w\|$ donc ça revient à minimiser $\|w\|^2$ (on travaille avec $\|w\|^2$ pour qu'on évite l'apparition d'une constante dans la représentation du problème).

Ce principe peut être reformulé comme suivant :

$$\left\{ \begin{array}{l} \min \frac{1}{2} \|w\|^2 \\ \text{Sous contrainte } \forall i y_i (\langle w, x_i \rangle + b) \geq 1 \end{array} \right. \quad (\text{III.9})$$

Ce problème peut être résolu en utilisant la technique d'optimisation standard de la Programmation Quadratique (QP). Les études faites par Cristian ni et al ont introduit la formulation Lagrangienne qui transforme les contraintes citées précédemment par des contraintes sur le multiplicateur de Lagrange. Par conséquent, on introduit le multiplicateur de Lagrange α_i appelées aussi variables duales tel que :

$$\left\{ \begin{array}{l} L_{prim} = \frac{1}{2} \|w\|^2 - \sum_{i=1}^N \alpha_i [y_i (\langle w, x_i \rangle + b) - 1] \\ \alpha_i \geq 0 \end{array} \right. \quad (\text{III.10})$$

Cette fonction permet de déterminer les paramètres de fonction de décision (w et b) en faisant la dérivée du Lagrangien par rapport à ces variables. En faisant le dérivé de L_{prim} la valeur optimale notée \hat{w} sera égale à (III.11).

$$\hat{w} = \sum_{i=1}^N \alpha_i x_i y_i \quad (\text{III.11})$$

Cette expression permet d'introduire la formulation duale de Lagrangien tel que :

$$L_{dual} = \sum_{i=1}^N \alpha_i - \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \alpha_i \alpha_j y_i y_j \langle x_i, x_j \rangle \quad (\text{III.12})$$

Sous les contraintes :

$$\begin{cases} \mathbf{0} \leq \alpha_i \leq C, \forall i \\ \sum_{i=1}^N \alpha_i y_i = \mathbf{0} \end{cases} \quad (\text{III.13})$$

(C) est le paramètre de régulation qui détermine les écarts acceptables (plage d'erreurs) pour la perte de la fonction.

Pour les vecteurs de support les α_i sont non nuls.

Dans la réalité la linéarité n'est pas toujours le cas. Généralement, pour séparer les données on doit disposer d'une frontière séparatrice non linéaire et par suite l'utilisation de classificateur à vaste marge n'est plus possible. Donc on cherche à construire une surface séparatrice telle qu'il atteint à vérifier la condition et la contrainte (2.9). En effet, la notion de la marge douce développe un ensemble $\{\xi_i\}_{i=1}^N$ appelé variables de relaxation. Ces variables permettent d'accepter des erreurs sur les contraintes. Par suite, la maximisation de la marge est soumise aux contraintes suivantes[17] :

$$\begin{cases} \forall i y_i (\langle w, x_i \rangle + b) \mathbf{1} - \xi_i \\ \xi_i \geq \mathbf{0} \end{cases} \quad (\text{III.14})$$

Donc, pour trouver l'hyperplan optimal, ce qui revient à déterminer la valeur de marge, il suffit de résoudre l'équation suivante :

$$\min_{b, w, \xi} \frac{1}{2} \|w\|^2 + C \sum_{i=1}^N \xi_i \quad (\text{III.15})$$

Néanmoins, pour qu'on puisse utiliser les SVM, il faudra changer la dimension de l'espace de données (Figure III.3) qui s'appelle espace de ré-description dont la dimension est plus grande.

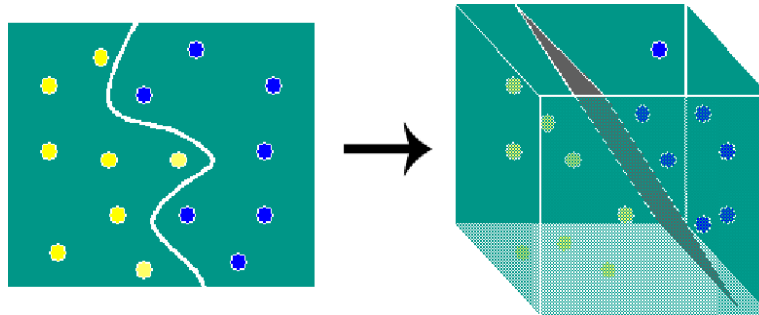


Figure III.3. Changement de l'espace des données [17]

Dans ce nouvel espace, il est très possible de trouver un hyperplan séparateur optimal. Par conséquent, on a passé d'un problème de séparation non linéaire dans le premier espace à un problème de séparation linéaire dans cet espace. Cette transformation est réalisée via la fonction noyau (kernel) notée K .

$$\mathbf{k}(x_i, x_j) = \langle \phi(x_i), \phi(x_j) \rangle \quad (\text{III.16})$$

Selon la condition du Mercer, le noyau K définit un produit scalaire si et seulement si $\mathbf{G} = \left(\mathbf{k}(x_i, x_j) \right)_{i,j=1,\dots,N}$ est définie positive c'est-à-dire $\forall \mathbf{v} \in \mathbb{R}^n \mathbf{v}^T \mathbf{G} \mathbf{v} \geq 0$ (toutes les valeurs propres de \mathbf{G} soient positives). Cette fonction permet de savoir si la fonction K est un noyau ou pas mais elle ne donne aucune idée sur la fonction ϕ .

Les fonctions noyaux les plus connues et les plus utilisées sont :

Polynomial, RBF (Radial Basic Fonction), Sigmoid, Linéaire

4.3 Les SVM et les méthodes multi-classes

Dans tout ce qui précède nous avons détaillé la théorie des SVM tout en considérant un problème avec deux classes. En générale, les données à classer présentent plus que deux catégories donc il sera évident de chercher une méthode de traitement et d'apprentissage des données pour qu'on puisse faire la classification.

Dans cette partie on introduit les techniques utilisées et qui permettent d'exploiter l'algorithme décrit précédemment.

4.3.1 Un contre tous

La méthode « un contre tous », proposée par Vapnik, consiste à construire N modèles du classificateur SVM. C'est une généralisation du cas binaire. Pour cette technique chaque classe sera opposée à l'autre c'est-à-dire qu'on aura deux classes : une désigne la $k^{\text{ème}}$ classe et l'autre présente les $N-1$ classes restantes tous groupés dans une seule classe. Ainsi, nous entraînons autant de classificateurs SVM binaires que de classes. Par conséquent, on associe à chaque classe un hyperplan h_k et une fonction de décision f_k dans le but de séparer les données de la classe k de l'ensemble des autres classes. Lors de chaque classification les données seront attribuées soit à +1 (une donnée qui appartient bien à la classe k), soit à -1 (une donnée qui appartient à une des autres classes).

Afin de classer une nouvelle donnée, nous devons la disposer à l'ensemble de tous les classificateurs. Le classificateur qui retourne la valeur +1 comme étiquette est celui qui attribue la donnée à sa classe.

Les inconvénients de cette technique se résument par :

- Réalisation de N classificateurs (perte au niveau du coût et du temps),
- Il est possible que plus qu'un classificateur retourne +1 et dans ce cas on n'arrive pas à déterminer la classe à laquelle appartient le nouvel exemple,
- Si aucun classificateur ne donne +1, la donnée est non classée, ce qui signifie que les classificateurs n'arrivent

pas à reconnaître l'exemple ou il s'agit d'une nouvelle classe qui n'est pas une des N classes appris par le système

4.3.2 Un contre un

La technique de « un contre un » consiste à construire $\frac{N(N-1)}{2}$ classificateurs binaires en confrontant les classe une à une. En phase de test, pour classer une nouvelle donnée, il faut l'analyser par chaque classificateur et un vote majoritaire permet de décider qu'elle est sa classe.

Conséquemment, la classe attribuée à l'exemple à classer est celle que la majorité de classificateurs aura prédite.

Si on note x_i l'exemple à classer et h_{ij} le classificateur SVM séparant la classe C_i et la classe C_j et donnant l'étiquette attribué à l'exemple à classer, alors le label donné à x_i peut-être notée comme étant le $card(\{h_{ij}(x_i)\} \cap \{k\}; i < j)$ L'inconvénient majeur de cette technique est qu'elle peut donner une égalité de vote entre deux classes ce qui ramène à une ambiguïté lors de classification.

5 SIMULATION

5.1 Introduction

L'analyse spectrale est certainement la méthode la plus naturelle pour le diagnostic des défauts. En règle générale, la seule grandeur intéressante accessible au stator est le courant et l'intérêt de son analyse spectrale est de pouvoir détecter et identifier l'élément défectueux en fonction de sa fréquence.

Les courant statorique nous a permis d'identifier les signatures fréquentielles causées par court-circuit. L'analyse de l'amplitude des harmoniques d'espace dans le spectre du courant statorique donne des informations supplémentaires non négligeables pour le diagnostic des défauts.

5.2 Application sur les machine a vecteur de support

En premier temps, on cherche à apprendre le système les différentes classes selon une base de données retenue pour l'apprentissage. Donc, nous devons

apprendre à la machine un ensemble d'observations selon des modes de fonctionnement précises.

Puisque nous sommes en apprentissage supervisée, chaque observation doit être liée à une étiquette pour que le système puisse calculer les paramètres qui servent pour le test et pour qu'il puisse classer tout nouvel exemple.

Après l'apprentissage, la machine crée un modèle dont les paramètres servent à la classification des nouvelles observations.

Pour le test des performances de la machine et pour déterminer sa capacité à classer tout les données de test, on dispose d'un model (sortie de l'apprentissage) et d'un ensemble de paramètres qui sont le type de SVM, type de la fonction noyau, le paramètre gamma, le paramètre de régulation et le degré du polynôme pour une fonction noyau polynomiale.

D'autre part, pour arriver à évaluer la capacité des SVM utilisées, nous proposons deux méthodes de présentation : la première présente les données tel qu'elles doivent être données (on suppose qu'on connaît l'étiquette de l'observation auparavant) et la deuxième présente les données tel qu'elles sont prédites par la machine.

Les étiquettes associées à chaque observations sont données par un vecteur appelé 'label_prediction' ce qui permet d'identifier les signaux mal classés.

La séparation en 3 classes est interprétée par 3 zones d'identifications :

- Zone en 1: correspondant aux signaux de types N : fonctionnement avec moteur sain,
- Zone en 2 : correspondant aux signaux de types D : fonctionnement avec moteur défaillant (Court-circuit dans la phase 1 statorique)
- Zone en rouge : correspondant aux signaux de types S : fonctionnement avec moteur défaillant (déséquilibre).

Nous avons collecter nous donner pour chaque cas dans le tableau III.1 :

| | Valeurs collecter | | | Nombre des Observations par classées |
|---------------|-------------------|--------|--------|--|
| Moteur sain | 7.274 | 7.274 | 7.274 | 7 |
| | 4.063 | 4.063 | 4.063 | |
| | 8.647 | 8.647 | 8.647 | |
| | 10.789 | 10.789 | 10.789 | |
| | 11.527 | 11.527 | 11.527 | |
| | 13.043 | 13.043 | 13.043 | |
| | 30.274 | 30.274 | 30.274 | |
| Court-circuit | 7.506 | 7.068 | 7.261 | 13 |
| | 7.745 | 6.863 | 7.258 | |
| | 7.992 | 6.661 | 7.265 | |
| | 8.247 | 6.462 | 7.283 | |
| | 8.511 | 6.267 | 7.312 | |
| | 8.782 | 6.077 | 7.352 | |
| | 9.062 | 5.893 | 7.404 | |
| | 9.351 | 5.715 | 7.467 | |
| | 9.648 | 5.546 | 7.543 | |
| | 9.955 | 5.387 | 7.631 | |
| | 10.27 | 5.238 | 7.731 | |
| | 10.595 | 5.103 | 7.844 | |
| | 10.929 | 4.983 | 7.97 | |
| desiquilibre | 4.458 | 12.331 | 9.231 | 13 |
| | 4.534 | 12.064 | 9.079 | |
| | 4.619 | 11.797 | 8.931 | |
| | 4.713 | 11.533 | 8.789 | |
| | 4.816 | 11.269 | 8.65 | |
| | 4.927 | 11.007 | 8.517 | |
| | 5.045 | 10.746 | 8.39 | |
| | 5.171 | 10.487 | 8.267 | |
| | 5.303 | 10.229 | 8.151 | |
| | 5.441 | 9.972 | 8.04 | |
| | 5.585 | 9.717 | 7.935 | |
| | 5.735 | 9.464 | 7.837 | |
| | 5.89 | 9.213 | 7.745 | |

Tableau III.1. les valeurs des 3 classes

Donc nous avons $n = 33$, ou n est le nombre total des données

Et la matrice d'apprentissage X ,

X_{app} = les valeurs (moteur sain ,court-circuit , desiquilibre)

Et la matrice d'apprentissage Y

Y_{app} = (1 pour les valeurs du moteur sain

2 pour les valeurs du moteur defaiffallant (cout-circuit)

3 pour les valeurs du moteurs defaillant (desequilibre)

Après avoir lancer le programme nous avons eu 100% de classicification

Et pour connaitre si notre methode fonctionnent suite a l'apprentissage qui été realiser ,nous avons fait un test ont inserent d'autres valeurs des deux cas du moteur defaillant dans la matrice Xtest et nous avons recu le resultats via Ypred

Ypred : Y prediction

Donc on introduit 5 valeurs a Xtest et le resultats a Ypred est 100%, c'est-à-dire quil a classer chaq'une de ces valeurs a ces defauts respectives ,montrent que la machine à vecteurs de supports donne un résultat très intéressant. En effet, nous avons un taux de reconnaissance très élevé pour les différents modes de classifications.

6 Conclusion

Dans ce chapitre, après avoir définit la notion de classification, nous avons présenté de façon plus au moins succincte la théorie des machines à vecteurs de support. L'accent a été mis sur ses caractéristiques et ses paramètres pour des problèmes multidimensionnels. Et nous avons appliqué l'algorithme de la machine à vecteurs de support SVM pour la classification des défauts de la machine asynchrone.

1 Introduction:

La MAS a été largement exploitée dans le domaine industriel. Ayant une technologie simple, la MAS peut être adoptée dans la plupart des applications liées aux entraînements électriques. Cependant, cette machine souffre d'une dynamique très complexe en raison de la présence d'un fort couplage entre les circuits inducteurs, c'est-à-dire les circuits créant principalement le champ magnétique dans la machine et statorique et rotorique. Une autre difficulté rencontrée lors de la modélisation de la machine asynchrone est la non-linéarité de son circuit magnétique. En effet, la machine asynchrone standard est, généralement, modérément saturée durant son fonctionnement normal. [15].

La modélisation des phénomènes électromagnétiques passe, respectivement, par la résolution des équations de Maxwell associées aux conditions de passage entre deux milieux différentes du point de vue diélectrique et/ou magnétique et des conditions aux limites. La résolution de ces modèles d'équations aux dérivés partiels spatio-temporelles nécessite l'emploi des méthodes numériques performantes telles que la méthode des éléments finis. Elle permet, outre de vaincre la complexité technique et la réduction des coûts et délais de conceptions, d'améliorer la qualité des machines.

Nous nous intéressons dans cette étude, à la modélisation du comportement électromagnétique des machines asynchrones en régime transitoire et son implantation dans un code de calcul par les éléments finis. [15].

Dans les machines électriques les équations qui régissent le champ électromagnétique sont les équations de Maxwell associées aux relations :

Constitutives du milieu considéré. On les définit comme suit :

$$\overrightarrow{\text{rot}}\vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (\text{II-1})$$

$$\overrightarrow{\text{rot}}\vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (\text{II-2})$$

- Les relations de la conservation des flux:

$$\mathit{div}\vec{D} = \rho \quad (\text{II-3})$$

$$\mathit{div}\vec{B} = 0 \quad (\text{II-4})$$

- La relation régissant les propriétés des matériaux magnétiques:

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} \quad (\text{II-5})$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (\text{II-6})$$

- La relation de la loi d'Ohm :

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (\text{II-7})$$

Où,

\vec{H} : Le champ magnétique(A/m)

\vec{E} : Le champ électrique(V/m)

\vec{B} : L'induction magnétique (T)

\vec{J} : La densité du courant total (A/m²)

μ : Perméabilité magnétique (H/m)

σ : Conductibilité électrique (Ω^{-1}/m^{-1})

ϵ : Permittivité électrique [F/m]

ρ : Densité de charge volumique[C/m³]

2 Principe de la méthode des éléments finis

La méthode des éléments finis peut être définie comme une méthode d'approximation des équations aux dérivées partielles qui régissent les phénomènes physiques et leurs conditions aux limites.

Le principe bien connu de la méthode est de discrétiser le domaine d'étude en de multiples éléments puis de résoudre localement, dans chacun de ceux-ci, les équations associées à la formulation retenue.

Les inconnues élémentaires sont alors définies par une combinaison linéaire, pondérée par des polynômes d'interpolation. La précision du calcul est liée à la finesse du maillage et au degré de ces polynômes. Leurs coefficients ne dépendent que de la géométrie et de la discrétisation.

Finalement, on obtient après assemblage un système matriciel d'équations, pouvant tenir compte de certaines non linéarités, comme celle intervenant dans les matériaux ferromagnétiques [27].

3 Présentation et structure du logiciel de résolution Flux 2D

Le Flux 2/3D est développé (en collaboration avec le G2ELab, fusion du Laboratoire d'Electrotechnique de Grenoble, du Laboratoire d'Électrostatique et Matériaux Diélectrique et du Laboratoire de Magnétisme du Navire) et distribué en France par la société CEDRAT S.A. C'est un logiciel complet ayant l'avantage de permettre le couplage avec les équations de circuits [25].

Flux2D® est un logiciel de modélisation par éléments finis prenant en compte les phénomènes magnétiques et thermiques et permettant des régimes évolutifs. C'est donc un logiciel parfaitement adapté à nos besoins. Nous ne détaillerons pas son fonctionnement car des tutoriaux sont très bien conçus et ce n'est pas le propos. Le logiciel permet de calculer et de visualiser les grandeurs utiles à l'ingénieur, pour des dispositifs bidimensionnels ou à symétrie de révolution comportant des matériaux à caractéristiques linéaires ou non, isotropes ou non. C'est un logiciel complet ayant l'avantage de permettre le couplage avec les équations de circuits ainsi que l'ajout d'une région surfacique particulière dite " bande de roulement " pour l'étude des machines tournantes avec différentes positions du rotor, sans avoir à modifier la géométrie et le maillage [25].

Les principaux modules permettant la simulation de tous systèmes physiques à l'aide de FLUX 2D sont présentés :

➤ **Module Construction :**

Permet, à travers plusieurs modules, de définir la géométrie et le maillage du dispositif à étudier (geometry & physics), de choisir et de construire une banque de matériaux (Materials database) et de définir le schéma et les données du circuit électrique (Circuit).

➤ **Module Solving Process :**

Constitué principalement d'un module de résolution 2D (Direct) des différents modèles usuels de l'électromagnétisme et des problèmes thermiques.

➤ **Module Analysis :**

Permet, entre autres, de tracer les équipotentielles ou les lignes de flux, le maillage, la géométrie et les courbes 2D ou 1D selon un chemin prédéfini. Il permet aussi de calculer des grandeurs globales telles que le couple ou la force appliqués à un contour fermé, les inductions, les flux, les inductances, etc.

4 Etapes de création d'un modèle sain de la MAS à cage d'écureuil avec Flux 2D

Pour notre modèle on veut créer une MAS à cage d'écureuil dans un état sain, pour cela on doit passer par ces étapes :

4.1 Construction géométrique

La première étape pour construire une MAS, est de créer une entité stator qui est fixe et une entité rotor mobile. Chaque pièce créée, doit être affectée vers l'une de ces deux entités ou la laisser aire ou vide.

Le stator contient des encoches où sont enroulés les 3 conducteurs bobinés en cuivre.

4.2 Génération du maillage

Pour simuler la MAS, il faut impérativement mailler le modèle créé.

4.3 Résolution

Après la vérification du maillage et la vérification physique du modèle créé, on définit les paramètres de simulation que ce soit : le temps de résolution de 1 second avec un pas de $1 \cdot 10^{-4}$.

4.4 Exploitation des résultats

La dernière étape est l'exploitation des résultats obtenus du modèle sain de la MAS, deux types de résultats : résultats graphiques où on trouve les propriétés magnétiques et physiques de la machine comme la distribution du champ magnétique et la vitesse de rotation, et aussi les résultats numériques qui donnent des chiffres exacts sur les grandeurs mises à calculer.

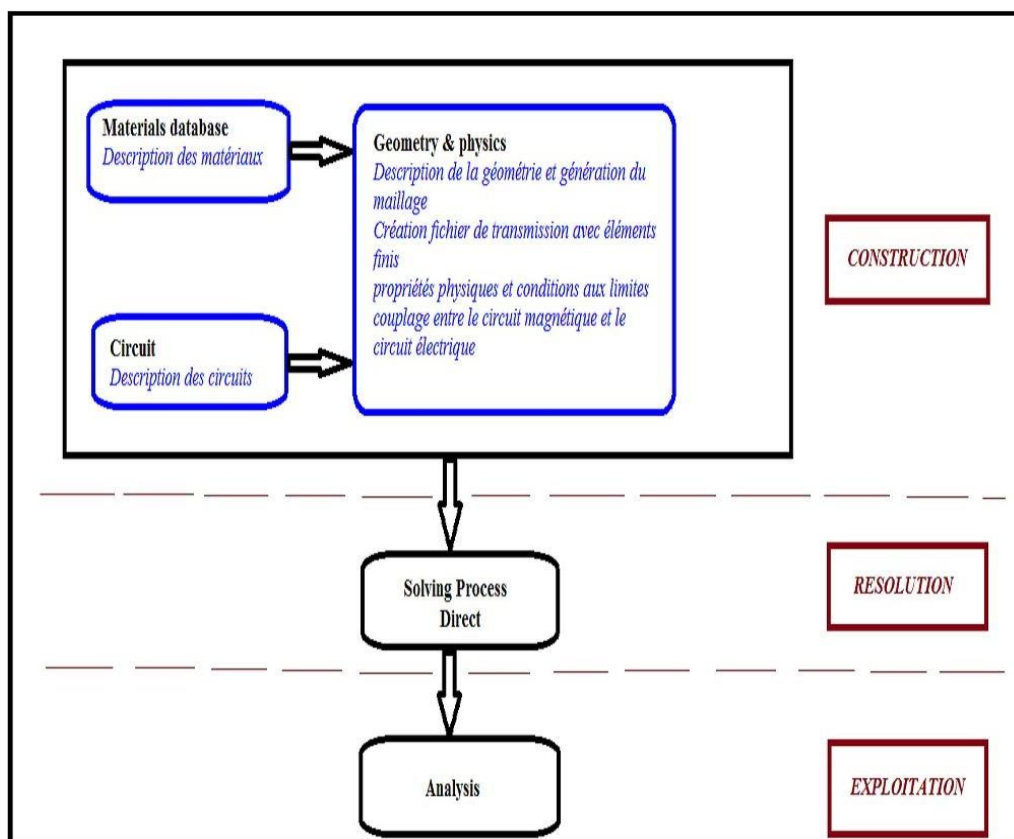


Figure II.1 Enchaînement des étapes dans Flux 2D®

5 Application et simulation de la MAS

On obtient une machine asynchrone à partir de rembobinage de la machine asynchrone qui a les caractéristiques suivantes :

| Partie | Paramètre | Valeur | Unité |
|--------|---------------------------|--------|-------|
| Stator | Nombre de phases | 3 | |
| | Nombre d'encoches | 36 | |
| | Diamètre interne | 120 | mm |
| | Diamètre externe | 212 | mm |
| Rotor | Diamètre externe | 119 | mm |
| | Diamètre interne | 40 | mm |
| | L'épaisseur de l'entrefer | 0.5 | mm |
| | Nombre de barres | 32 | |

Tableau II.1 : Paramètres globales de la machine

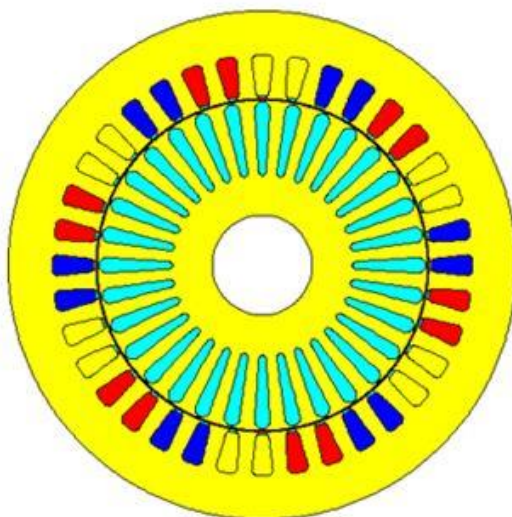


Figure II.2 : La géométrie de la machine asynchrone

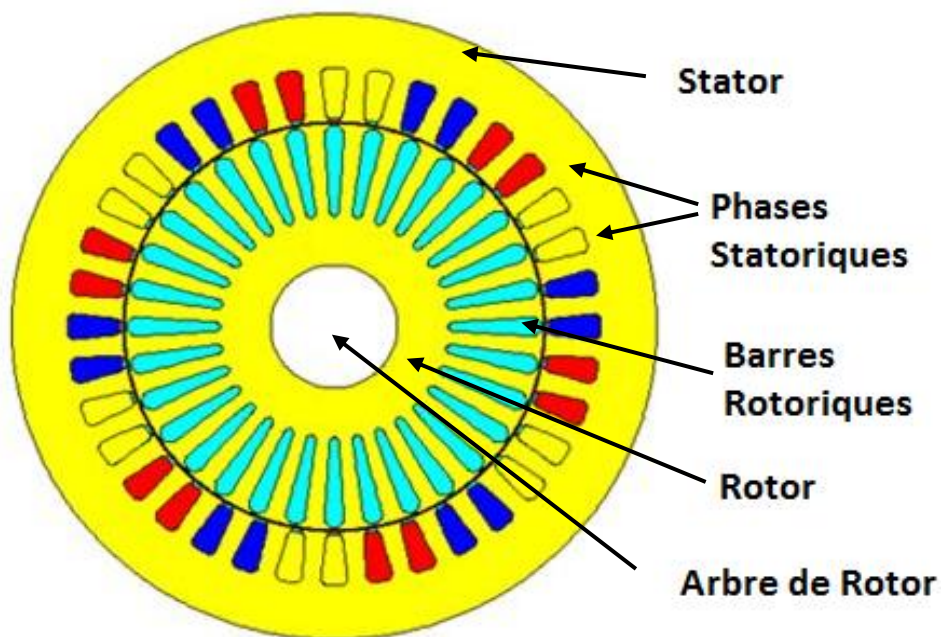


Figure II.3 : Affectation des régions superficielles

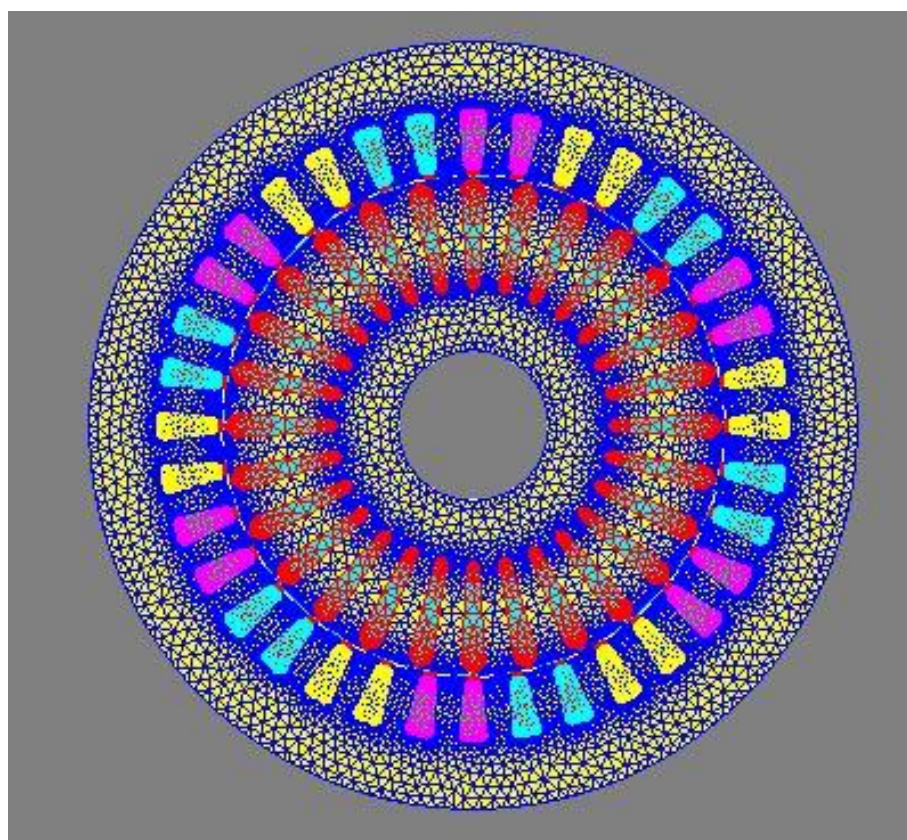


Figure II.4 : discrétisation de maillage

Le maillage est plus dense au voisinage de l'entrefer puisque dans cette région se développe l'énergie électromagnétique. Par contre le maillage est plus grossier vers l'arbre et vers l'extérieur de la culasse pour alléger les temps de calcul sans perte sensible d'information. Le circuit électrique

6 Couplage avec les équations de circuit :

Pour représenter fidèlement le moteur, il faut tenir compte des effets d'extrémités (inductance, résistance de tête de bobine et d'anneau de court-circuit). Le circuit électrique, (Figure II.6), représentant : les sources de tension d'alimentation (V1, V2, V3), Les bobinages statoriques (B1, B2, B3, B4, B5 B36), les Inductances, (L1, L2, L3), les résistances (RA1, RA1, RA1).

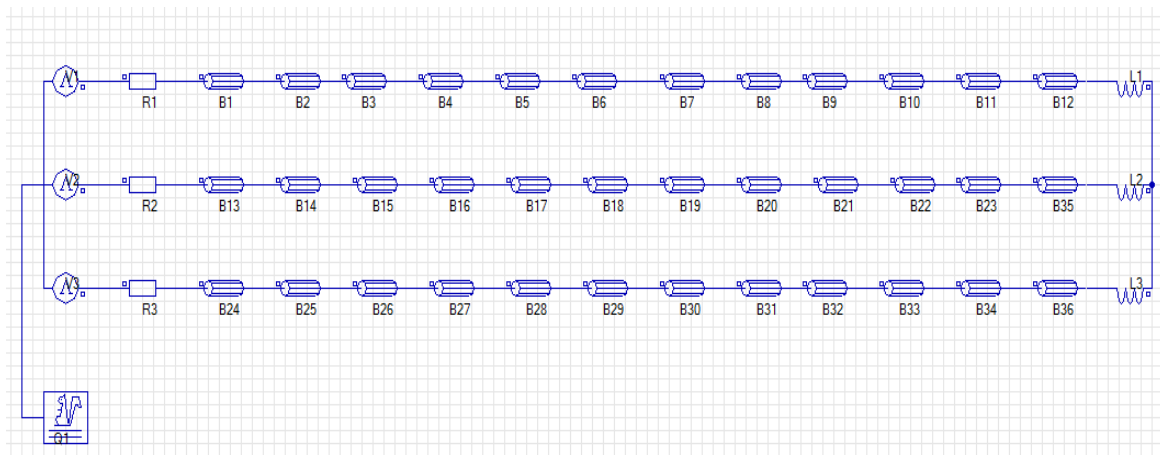


Figure. II.5 : Circuit représentant les effets d'extrémités liés à la géométrie.

7 Résultats graphiques

7.1 FONCTIONNEMENT SAIN DE LA MAS :

Les simulations par logiciel FLUX-2D sur machine saine, a donné les résultats suivants :

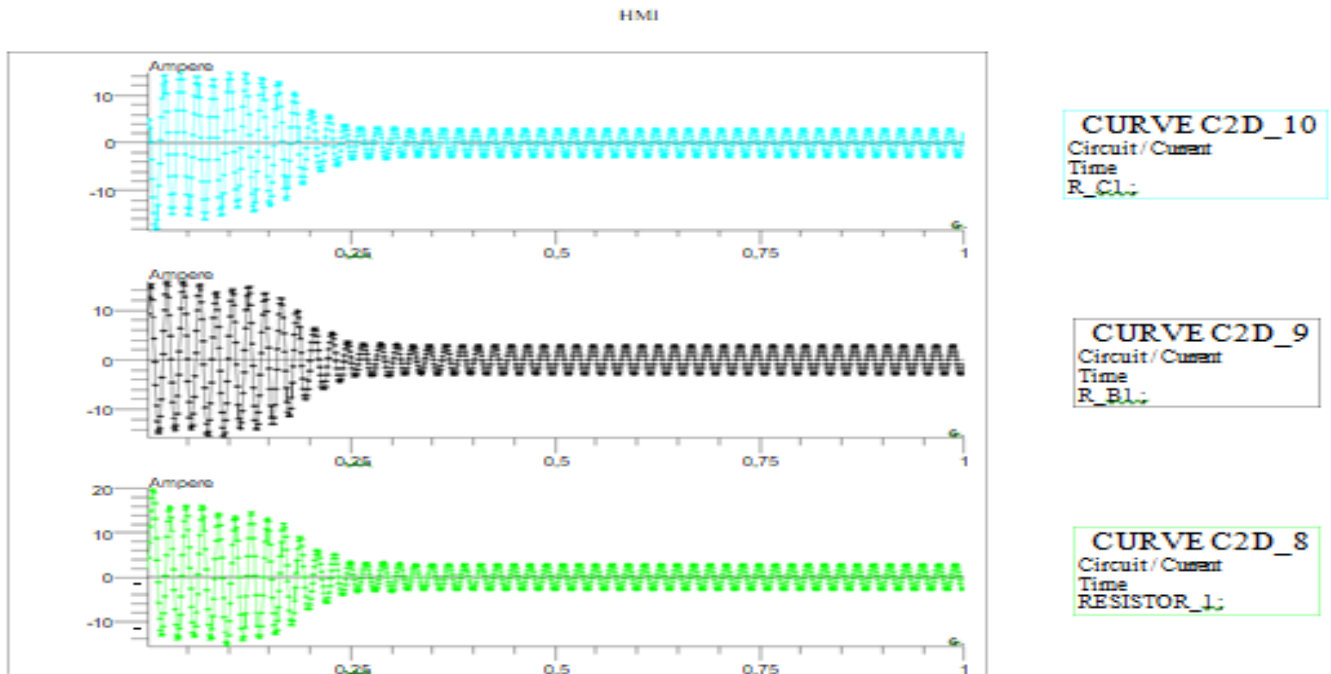


Figure II.6: Les Courants statoriques au niveau des résistances; R-1, R-2, R-3

Pour moteur sain

La figure II.7 représente l'évolution des courants statoriques en fonction du temps, étant donné que le rotor est initialement à l'arrêt, le régime transitoire se manifeste par des amplitudes de courants qui atteignent des valeurs maximales allant jusqu'à 20A et qui dure 0.2s, par la suite, le régime permanent s'établit et se traduit par la chute des courants avec des oscillations sinusoïdales autour de la valeur nulle.

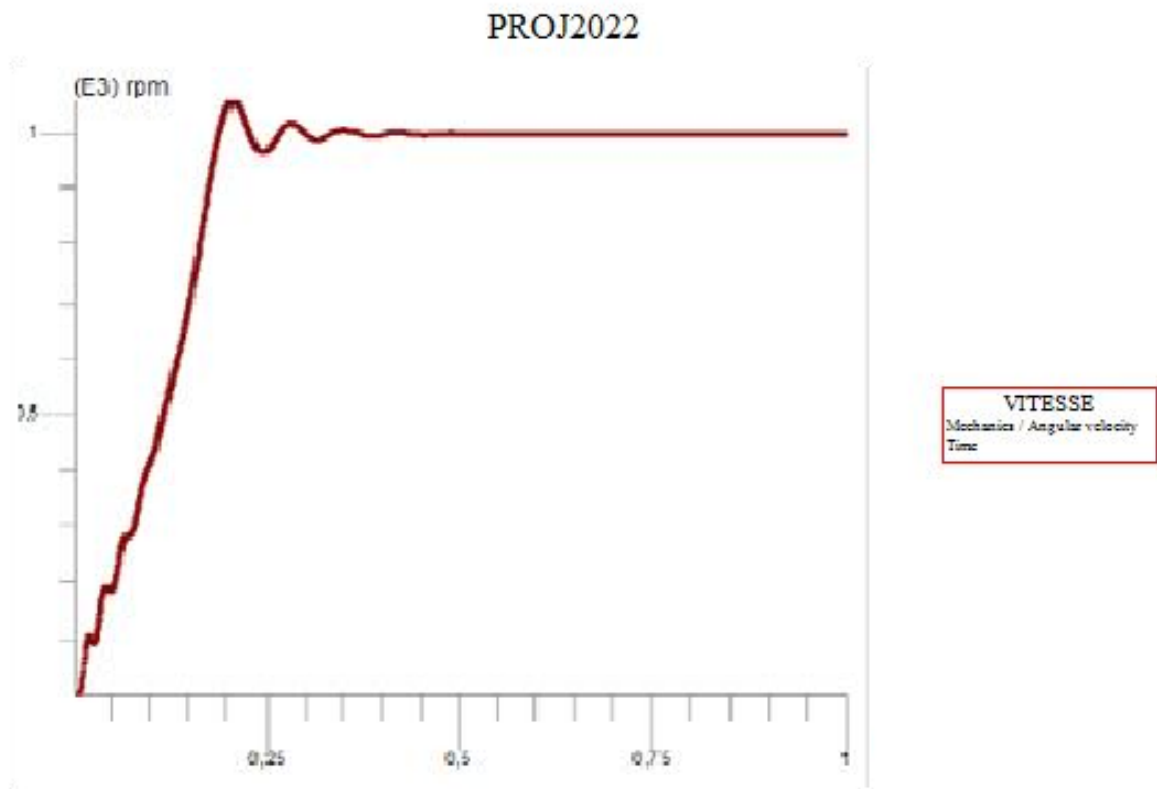


Figure.II.7: Vitesse de rotation moteur sain

La figure II.7 représente l'évolution de la vitesse de rotation de la machine, aux premiers instants du démarrage la vitesse augmente de 0 à 1 rpm dans un intervalle de 0.5s, atteignant ainsi le régime permanent, on voit très bien que cette vitesse s'approche de celle du synchronisme ce qui est connu pour le fonctionnement de la machine à vide.

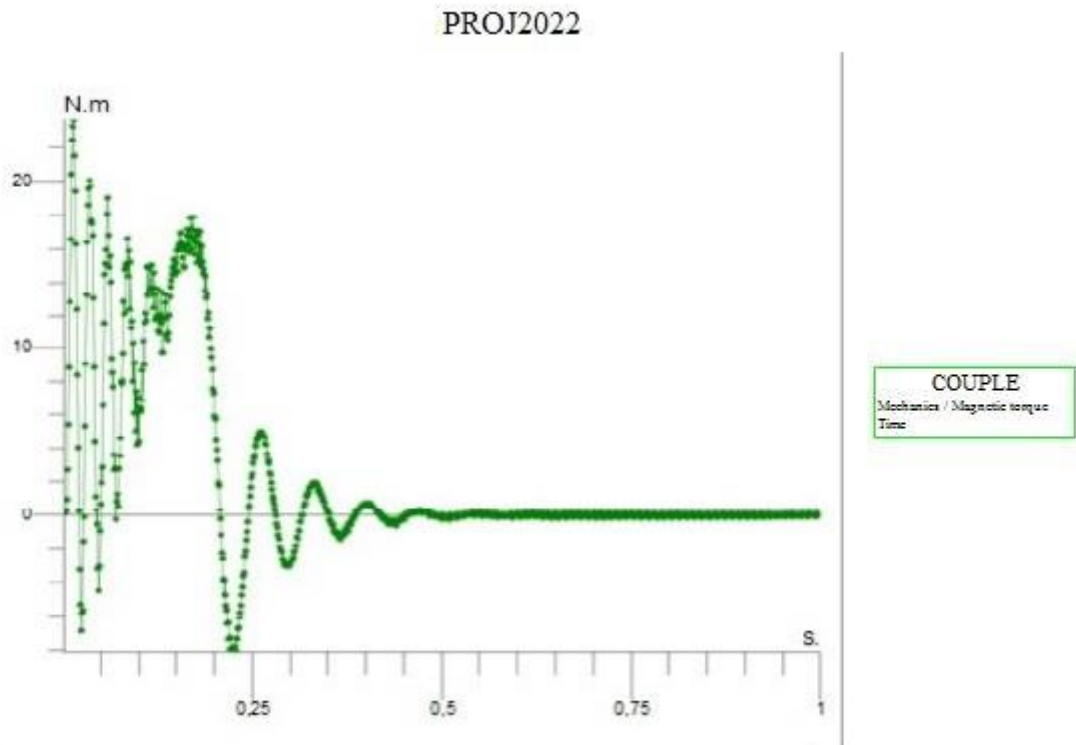


Figure II.8: Couple électromagnétique Moteur sain

La figure II.8 représente l'évolution du couple électromagnétique, le régime transitoire qui dure 0.5s, se manifeste par des oscillations amorties autour de 17 Nm et pouvant atteindre une valeur maximale de 24 Nm.

7.2 Fonctionnement en défaut (Court-circuit) de la MAS :

Le défaut du court-circuit dans le stator est causé par la dégradation de l'isolation due aux vibrations des conducteurs d'encoches et les divers frottements qui en résultent, suite à de grandes sollicitations de la machine, accélérant ainsi, l'usure des isolants, mais il reste que le facteur principal est le vieillissement de l'isolation, est l'échauffement anormal des bobinages. Dans ce mode de défaut on se propose de donner les résultats des simulations de la machine asynchrone avec une

phase affectée par le défaut de court-circuit de différents pourcentages dans le but de bien voir son effet sur les grandeurs électriques.

Dans le cas de la présence de défaut dans la machine asynchrone on a effectué une modification sur le circuit, ceci par l'ajout des Switch (S1, S2) au niveau des ligne 1. S1 fermé à certain instant (0.5s et il s'ouvre à 0.9s) est ceci a différent couple :

Circuit électrique en mode défaut :

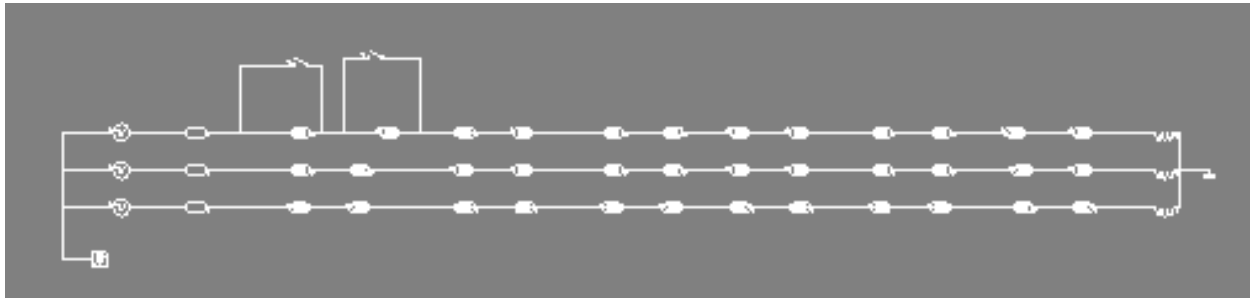
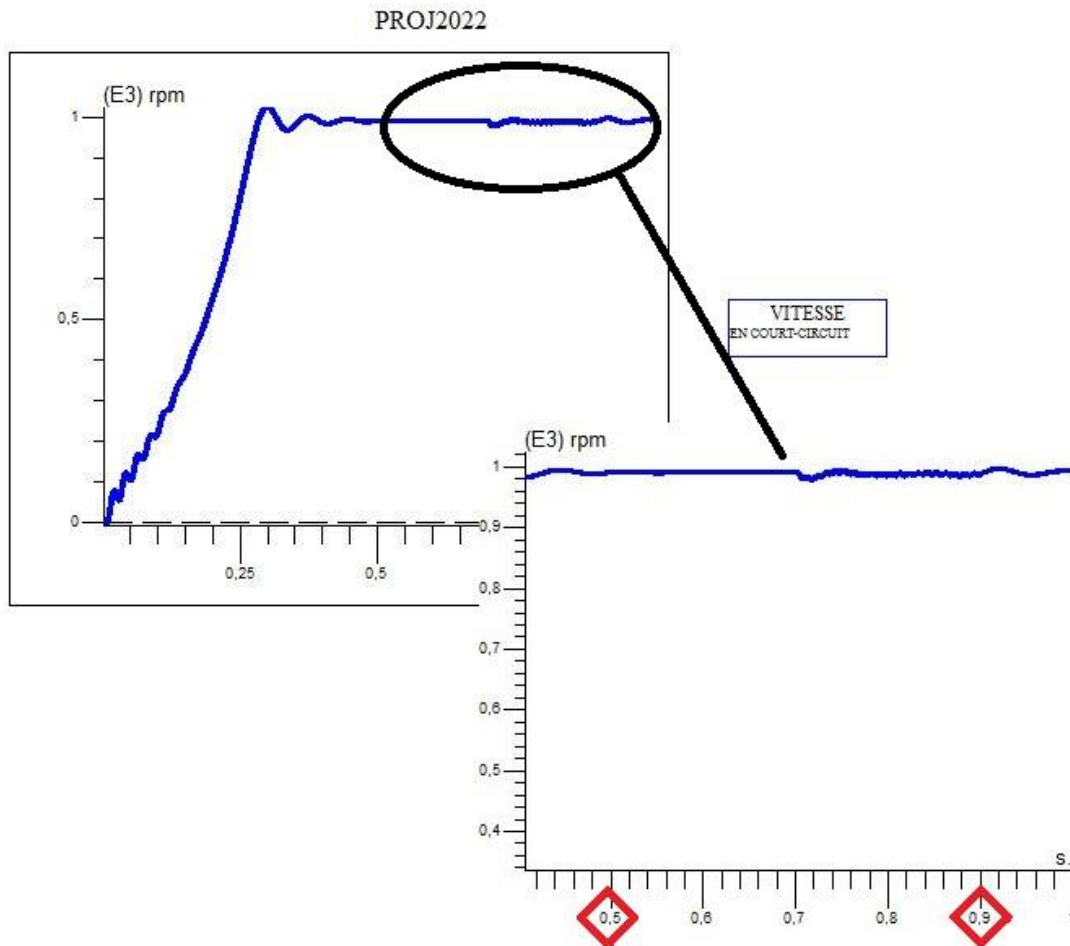


Figure II .9: Circuit équivalent en présence de défaut

Les simulations par logiciel FLUX-2D sur machine en défaut, a Donné les résultats suivants :



Figurell.10: Vitesse de rotation moteur en défaut (court-circuit)

Les simulations montrent que ce défaut entre $t=0.5s$ à $t=0.9s$ à une influence significative sur la mécanique du rotor, qui se traduit par une perturbation car en court-circuit il engendre une augmentation de la vitesse de rotation de la machine.

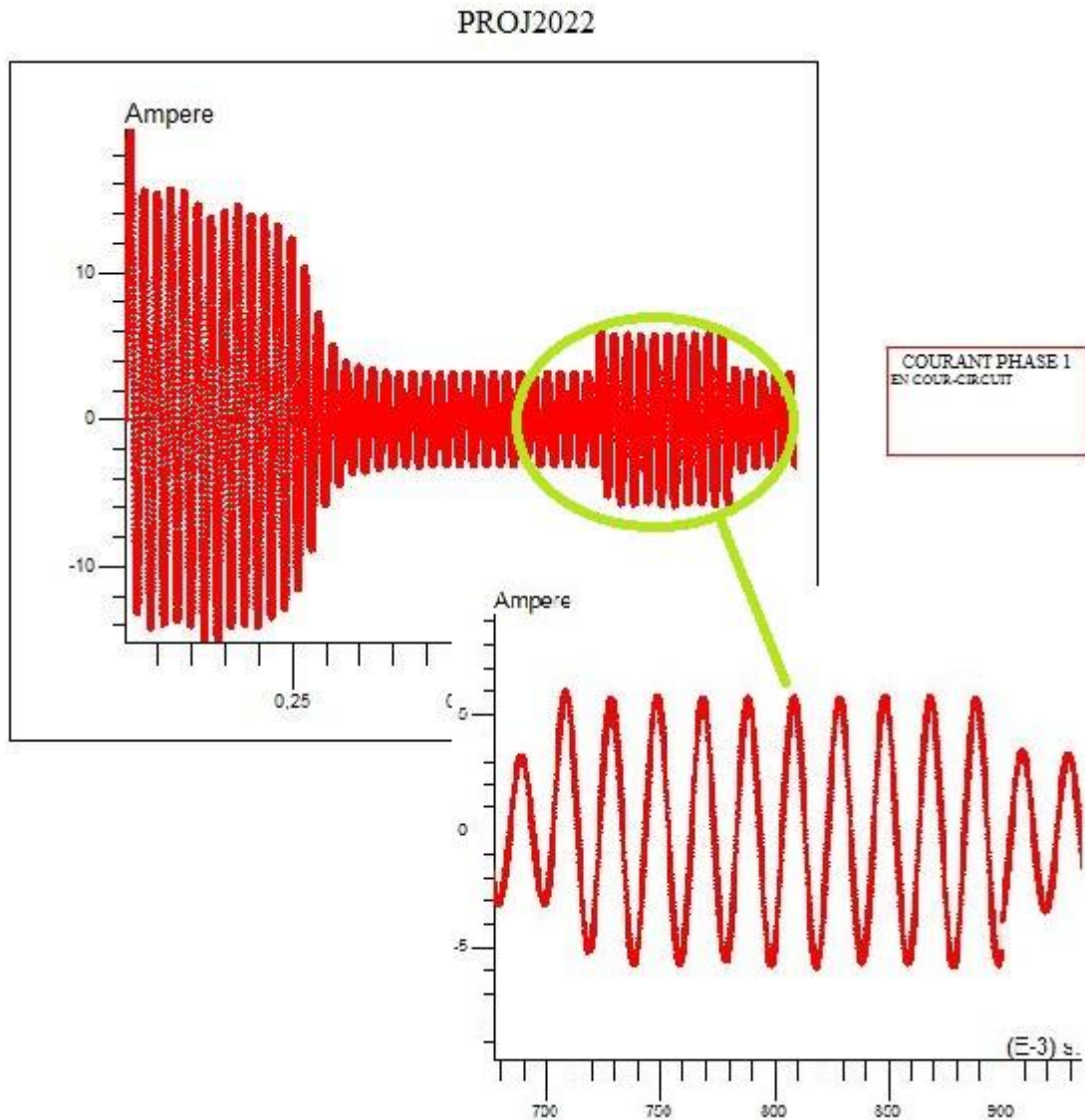


Figure 11: Le courant de phases 1 statoriques en court-circuit

Le court-circuit statoriques du côté de l'alimentation est un défaut à effet radical sur une chaîne d'entraînement, il induit des courants très forts dans les conducteurs d'alimentation qui cause leurs fusions et la disjonction par les protections.

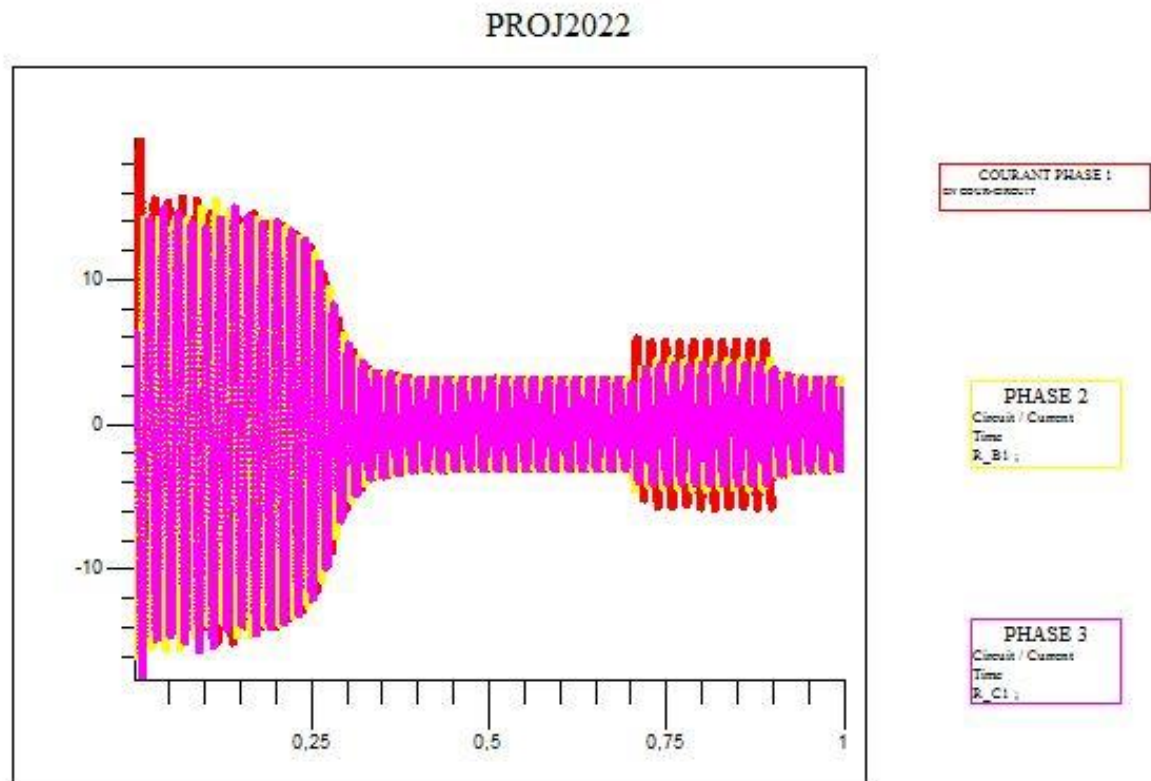


Figure II.12: Les Courants statoriques superposé au niveau des résistances ;
(R-1 en CC), R-2, R-3 Moteur en défaut

Le figure II.12 représente les résultats de simulation de la machine asynchrone au Les courants résultants sont des courants sinusoïdaux, Nous constatons l'évolution des courants statoriques en présence de défauts statoriques que le moteur subit de l'instant $t=0.7s$ a $0.9s$ pour le courant de phase 1 ; est qui dépasse les **4 ampères** pour le régime stationnaire (permanent).

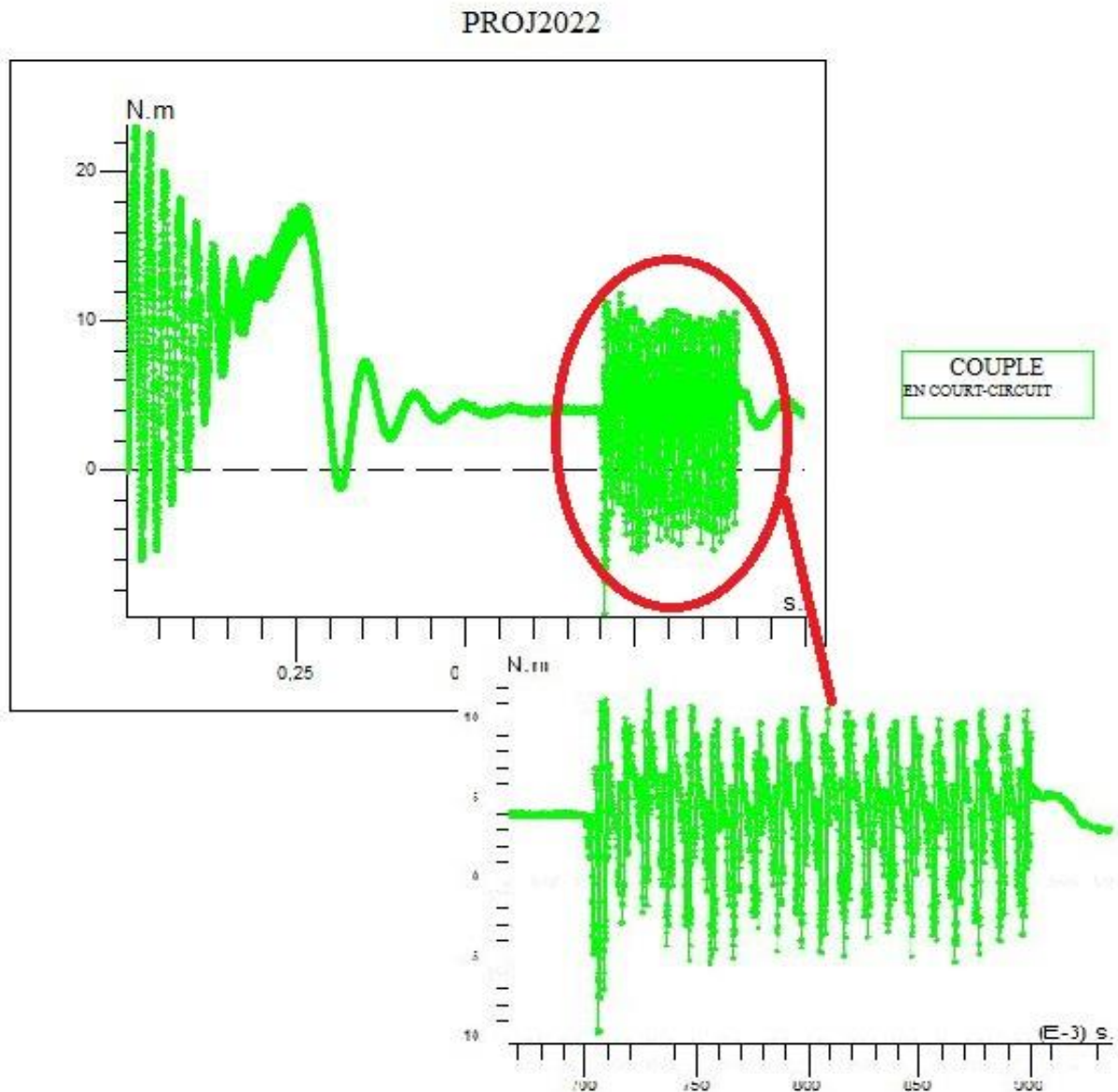


Figure II.13: Couple électromagnétique pour moteur en défaut

Les simulations révèlent que, lors de la création du défaut de court-circuit d'une même phase, nous remarquons que ces ondulations croissent avec l'augmentation du nombre de spires en court-circuit, sans que cela change la valeur moyenne du couple par rapport à sa valeur en régime sain.

8 Interprétation

Nous présentons sur les figures (II.10, II.11, II.12, II.13) l'évolution temporelle des grandeurs de la machine asynchrone lorsque nous passons d'un fonctionnement sain à un fonctionnement défaut. Pour analyser l'effet de court-circuit sur ces grandeurs, où nous l'avons fait sur le moteur au niveau de lignes de phases 1, nous avons choisi de la rendre du défaut à l'instant $t=0.5$ secondes et pour obtenir des résultats plus précis, nous avons opté pour différents couples à partir de 0 N.m, 2, et 4 N.m sur la phase 1

9 Conclusion

Dans ce deuxième chapitre, nous avons présenté le principe de la méthode des éléments finis. Puis on est passé à la présentation et structure du logiciel de résolution Flux 2D ; Et on a détaillé les étapes d'un modèle sain de la machine asynchrone à cage d'écureuil et du couplage de circuit magnétique avec le circuit électrique extérieur d'alimentation.

A la fin de ce chapitre nous avons fait une application et simulation de la machine asynchrone et présenter les résultats graphiques en absence et en présence de défaut

1 Introduction:

La machine asynchrone, grâce aux différents avantages qu'elle présente, est l'une des plus utilisés dans le domaine de puissance. En effet, le développement des variateurs de vitesse a favorisé les machines asynchrones en permettant de varier la vitesse de rotation dans une plus large gamme.

L'objectif de ce premier chapitre est de donner une idée exhaustive des différentes défaillances du moteur asynchrone à cage et de définir les signatures de ces défauts. Nous introduirons ensuite, les méthodes de diagnostic des machines électriques.

Enfin, nous mettons l'accent sur les méthodes externes et plus particulièrement l'apport des techniques dites de l'intelligence artificielle (IA) dans ce domaine.

2 Exploitation des moteurs asynchrones :

Les entraînements à vitesse variable ont pris ces dernières années une importance considérable dans l'industrie et dans la recherche. Dans ce contexte, la machine asynchrone est devenue la plus utilisée pour la variation de vitesse de processus industriels également de la chaîne de traction.

Dans cette partie, on cherche à décrire succinctement la constitution des machines asynchrones triphasées en détaillant en particulier le rotor à cage qui sera utilisé dans les expérimentations.

3 Description de la machine asynchrone :

La machine asynchrone comporte deux parties principales: stator et rotor séparés par un entrefer.

3.1 Le stator :

Le stator est la partie fixe basée sur un circuit magnétique (Figure I.1). Le champ magnétique tournant est créé par la partie statorique (appelé inducteur).



Figure I.1 : Schéma représentative du stator

Le stator d'un moteur asynchrone triphasé est constitué de trois enroulements placés en périphérie. Il est constitué de tôles d'acier qui sont assemblées les unes aux autres pour former le circuit magnétique statorique et dans les quelles sont placés les bobinages [23]. Une fois l'étape d'assemblage terminée, les enroulements statoriques sont placés dans les encoches. Les enroulements peuvent être insérés de manières imbriquées, ondulées ou encore concentriques.

L'isolation entre les enroulements électriques et les tôles d'acier s'effectue à l'aide de matériaux isolants qui peuvent être de différents types suivant l'utilisation de la machine asynchrone.

3.2 Le rotor :

Le rotor est la partie mobile de la machine. C'est la partie centrale du moteur qui est solidarisée à l'arbre de transmission (Figure I.2).



Figure I.2 : Schéma d'un rotor

La structure d'un circuit magnétique rétorque est basée sur des tôles d'acier qui sont, en général, de même origine que celles utilisées pour la construction du stator. Ces enroulements peuvent être soit « à cage » soit « bobinés ». Les rotors bobinés sont construits.

De la même manière que le bobinage statorique (insertion des enroulements dans les encoches rétorques). Pour les rotors à cage d'écureuil, les enroulements sont constitués de barres de cuivre pour les moteurs à grande puissance ou d'aluminium pour les moteurs de faible puissance. Ces barres sont court-circuitées à chaque extrémité par deux anneaux dits "de court-circuit", eux aussi fabriqués en cuivre ou en aluminium. Elles sont, souvent, légèrement inclinées par rapport à l'axe du moteur pour diminuer les oscillations de couple.

Nous nous intéressons dans la suite de ce travail aux défauts affectant les rotors à cage (Figure I.3):

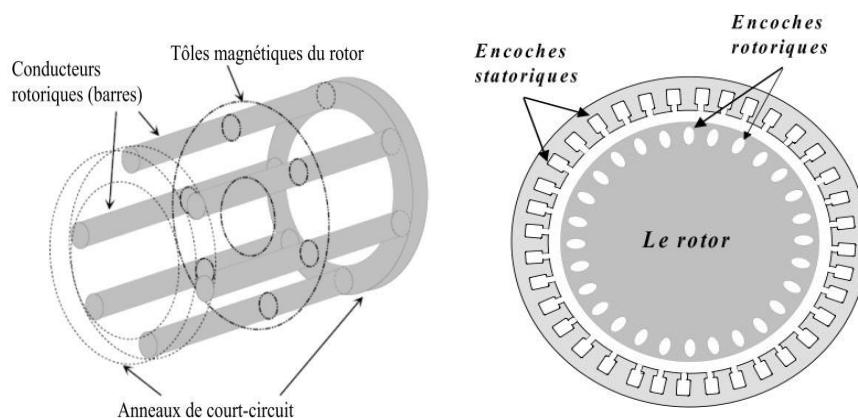


Figure I.3 : Rotor à cage [8]

3.3 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) [3].

4 Principe de fonctionnement d'un moteur asynchrone :

Le moteur asynchrone est appelé moteur induit puisque son fonctionnement est basé sur la création d'un courant induit dans un conducteur lorsque celui-ci coupe les lignes de force d'un champ magnétique. D'autre part on peut parler de deux régimes de machine asynchrone: statique et dynamique.

Pour le régime statique, on étudie les formes d'onde des signaux (courants, tensions et couple) pour différents modes d'alimentation, de variables d'entrée et les caractéristiques électromécaniques en régime permanent sinusoïdal à amplitude et fréquence variables pour différents choix de fonctionnements.

En régime dynamique, on s'intéresse à une modélisation autour d'un point de fonctionnement. On s'intéresse au positionnement des pôles et des zéros en vue de définir les conditions de stabilité et de réponse non minimale de phase.

Quelques soit le régime de fonctionnement, les moteurs peuvent être le siège de plusieurs types de défaillances.

5 Etude statistique des défaillances de la machine asynchrone :

Les défaillances peuvent être d'origines diverses, électriques, mécaniques ou bien encore magnétiques. Leurs causes sont multiples et peuvent se classer en trois groupes [6]:

- Les générateurs de pannes ou initiateurs de défauts : surchauffe du moteur, défaut électrique (court-circuit), survoltage d'alimentation, problème d'isolation électrique, usure des éléments mécaniques (roulements à billes), rupture de fixations, etc.
- Les amplificateurs de défauts : surcharge fréquente, vibrations mécaniques, Environnement humide, échauffement permanent, mauvais graissage, vieillissement, etc.

- Les vices de fabrication et les erreurs humaines : défauts de fabrication, composants défectueux, protections inadaptées, mauvais dimensionnement de la machine, etc. Une étude statistique, effectuée en 1988 par une compagnie d'assurance allemande de systèmes industriels [7] sur les pannes des machines asynchrones de moyenne puissance de 50kW à 200 kW) a donné les résultats suivants figure (I.4):

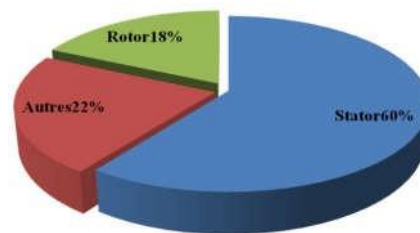


Figure.I.4. Proportion du défaut [7].

La répartition des pannes dans les différentes parties du moteur est présentée sur la figure (I.5).

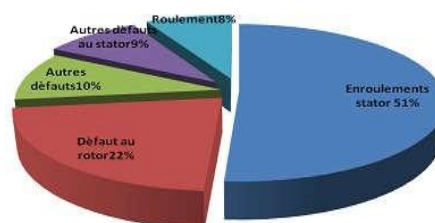


Figure.I.5. Répartition des pannes sur les machines de faibles et moyennes puissances [8].

5.1 Défaillances statoriques:

Ces défauts sont généralement liés à la dégradation de l'isolation électrique.

Ils sont généralement connus comme des défauts de court-circuit d'une phase à la terre, court circuits entre spires de la même phase ou de court-circuit entre phases.

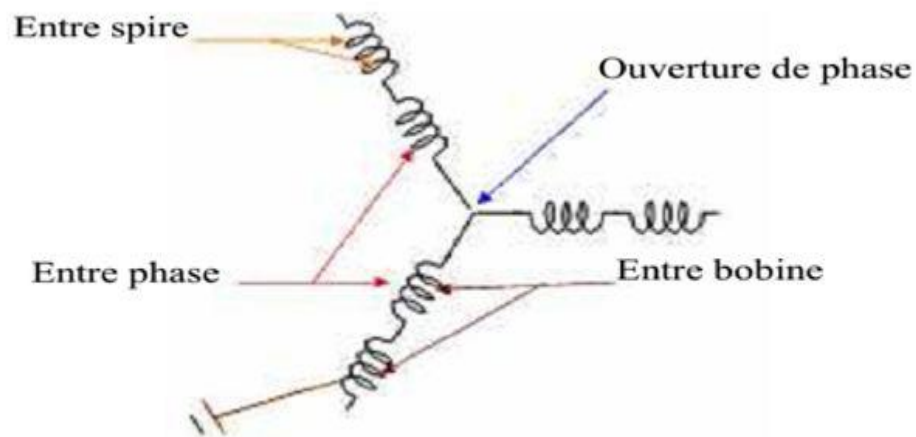


Figure I.6 : Représentation des différents défauts statoriques possible

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

5.1.1 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. Les différentes causes pour ce type de défaut sont

5.1.2 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 statorique 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.



Figure 1.7 : Court-circuit entre phases [8].

5.1.3 Court-circuit entre phases :

Ce type de défaillance peut arriver en tout point du bobinage, cependant une analyse de l'incidence de ce défaut sur le système.

L'apparition d'un court-circuit (fig. 1.7) 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.

5.1.4 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.

5.1.5 Défaits 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.

5.2 Défaillances au rotor :

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

- Thermique (surcharge,)
- Electromagnétique (force en $B_2(t)$,)
- 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 :

5.2.1 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 [14], [20].



Figure I.8 : Ruptures de barres [9]

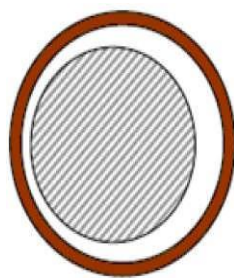
5.2.2 Ruptures d'anneaux :

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 différentiels entre les barres et les anneaux. Comme il est difficile de le détecter [7], 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.

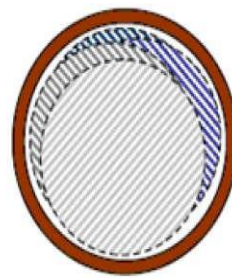
La rupture d'une portion d'anneau déséquilibre la répartition des courants dans les barres rotoriques et de ce fait, engendre un effet de modulation d'amplitude sur les courants statorique similaire à celui provoqué par la cassure de barres.

5.2.3 Excentricité statique et dynamique :

Parfois, la machine électrique peut être soumise à un décentrement du rotor 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).



Excentricité statique



Excentricité dynamique

(Plusieurs positions du rotor au cours de la rotation)

Figure I.9 : Excentricité statique et dynamique.

Trois cas d'excentricité [22], [12] 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.

5.3 Défaillances mécaniques :

5.3.1 Défaits roulements :

Les roulements à billes jouent le rôle d'interface électromécanique entre le stator et d'assurer une bonne rotation du rotor. Dans l'article [24], l'auteur présente la plupart des défauts survenant dans les roulements des moteurs à induction ainsi que les raisons de leur vieillissement. Comme il a été présenté précédemment, ce type de défaut est le plus fréquent sur les machines de fortes puissances. Il est généralement lié à l'usure du roulement et plus précisément une dégradation des billes, ou de la bande de roulement. Ses causes possibles :

- L'usure due au vieillissement
- La température de fonctionnement élevée
- La perte de lubrification et l'huile contaminée (par des paillettes métalliques issues de la dégradation des billes ou de la bande de roulement)
- Le défaut de montage
- Les courants d'arbres (court-circuit)

Les conséquences directes de cette défaillance sur les roulements sont :

- Des trous dans les gorges de roulement intérieures et extérieures
- L'attaque des billes

- La corrosion due à l'eau
- Défaut de graissage, problème dû à la température

Décollement, effritement de surface provoqué par une surcharge

Cassure dans la cage



Trous et corrosion dans les gorges



Vieillessement des billes

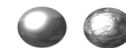


Figure I.10 Différentes défaillances des roulements à billes [13].

Sur le système, ce type de défaut se traduit par des oscillations du couple de charge, une apparition de pertes supplémentaires et un jeu entre la bague interne et la bague externe du roulement entraînant des vibrations par les déplacements du rotor autour de l'axe longitudinale de la machine. Dans le cas le plus défavorable, la présence d'un roulement défectueux peut amener au blocage du moteur.

6 Méthodes de modélisation des machines asynchrones :

Nous exposons les principales méthodes de modélisation fine de la machine asynchrone à cage défectueuse comme la méthode circuits internes équivalents, la méthode des circuits électriques magnétiquement couplés, la méthode des réseaux de perméances ainsi que la méthode des éléments finis.

Nous allons, dans ce qui suit, commencer par décrire chacune des méthodes de modélisation fine de la machine asynchrone défectueuse.

6.1 Modélisation par les équations magnétiquement couplées (CEMC) :

Dans la modélisation par les équations des circuits électriques magnétiquement couplés (CEMC), les enroulements constituant le stator et rotor sont représentés par un circuit électrique équivalent, forme par une inductance en série avec une résistance

Par ailleurs, même si la méthode des CEMC ne permet pas la prise en compte de certains phénomènes complexes (saturation, effet de peau, etc.), il est possible de corriger le modèle par le biais de coefficients globaux pouvant renseigner sur leur influence sur les grandeurs globales.

Ainsi, malgré ses faiblesses, l'approche de modélisation par CEMC offre un bon compromis en termes de précision, de temps de calcul et d'adaptation à la modélisation de la plupart des défauts d'origine électromagnétique de la machine asynchrone.

L'écriture du modèle triphasé de la machine asynchrone par l'approche des CEMC est basée sur un certain nombre d'hypothèses dont les principales sont les suivantes :

- Le fer (les tôles) est de perméabilité infinie.
- Les pertes par courants de Foucault sont négligeables.
- Les courants inter-bars sont négligeables (tôles magnétiques rotoriques isolées des barres et des anneaux de la cage).
- La première hypothèse peut cependant être partiellement contournée par l'introduction de l'onde fondamentale de saturation dans l'expression de la perméance de l'entrefer. Permettant ainsi la prise en compte de la chute de tension magnétique (f.m.m.) dans le fer **[16]**.

- Quant à la troisième hypothèse, il faut dire qu'elle est partagée par toutes les méthodes de modélisation tant les courants inter-bars sont difficiles à prendre en compte de façon locale.

6.2 Méthode des réseaux de perméances (RNM) :

La méthode des réseaux de perméances [32] est basée sur la décomposition du circuit magnétique étudié en tubes de flux, chaque tube étant caractérisé par sa perméance.

A partir de cette décomposition, on construit un réseau de perméances, similaire à un circuit électrique, où les grandeurs mises en jeu sont le flux et les différences de potentiels magnétiques. Les sources de forces magnétomotrices (f.m.m) sont obtenues par la modélisation des couplages avec les circuits électriques externes. Dans le cas particulier de la machine asynchrone, les sources de f.m.m sont placées dans les dents statoriques et rotoriques et leurs valeurs dépendent directement du courant dans les bobinages concernés.

Ainsi, la machine asynchrone peut être décomposée en une association de circuits élémentaires, composés d'une dent, d'une encoche et de la portion de culasse concernée. Un circuit élémentaire est modélisé par trois perméances (perméance de dent, perméance de culasse et perméance de fuite de pied d'encoche) et une source de (f.m.m) (Figure. I.11).

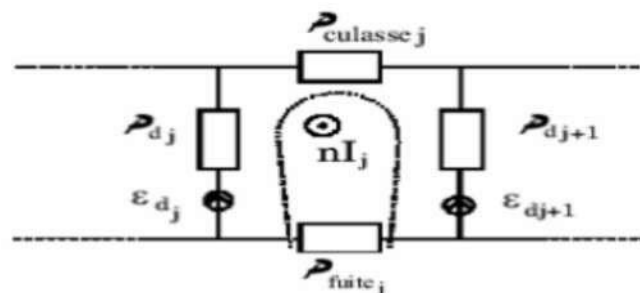


Figure I.11 : Réseau de perméances élémentaire autour d'encoche statorique [17].

Toutes les valeurs de perméances sont calculées par le biais d'une simulation avec la méthode des éléments finis en magnéto-statique et il est possible de prendre en compte la saturation magnétique. La mise en équations, l'obtention et la

résolution du système d'équations différentielles non linéaires qui décrit le comportement électromagnétique et dynamique du système, ont déjà été présentées dans [18] ainsi que le logiciel de simulation par réseaux de perméances couplés électriquement (SiRe PCE) qui a été développé dans l'environnement MATLAB.

6.3 Méthode des éléments finis (MEF) :

Si la méthode des réseaux de perméances permet d'introduire la saturation des matériaux magnétiques dans la modélisation de la machine asynchrone en présence de défauts augmentant du coup la précision du modèle par rapport à la méthode CEMC, la méthode des éléments finis, quant à elle, nous affranchit de la plupart des hypothèses simplificatrices habituelles lors de la modélisation des machines électriques tournantes.

Cependant, compte tenu de sa grande consommation en temps de calcul, la MEF, dans le domaine du diagnostic de la machine asynchrone, est souvent utilisée dans le but de comprendre et de quantifier les conséquences locales d'un défaut sur les différents constituants de la machine [16, 29].

Ainsi et à titre d'exemple, la MEF est une méthode très bien adaptée à l'étude des effets locaux du défaut de rupture de barres de la cage rotorique. De même, la MEF sert à mieux appréhender les impacts magnétiques et thermique locaux du défaut de court-circuit inter-spores dans les phases statoriques.

7 Présentation des différentes méthodes de diagnostic :

Il existe une variété de techniques de diagnostic et de détection des défauts. On présente dans ce qui suit quelques-unes qui concernent la détection des défauts machine plus précisément les

7.1 L'estimation de paramètres physiques

La détection et la localisation des défaillances par estimation paramétrique consistent à identifier les paramètres structuraux d'un modèle de connaissance, puis d'extraire le paramètre physique du système à partir des lois de connaissance. Le point essentiel du diagnostic par identification paramétrique est le choix du modèle. De ce choix dépend le type de défaut que l'on pourra détecter sur la machine. En effet pour détecter et localiser un défaut au stator ou au rotor, il faut que ce dysfonctionnement puisse être discriminé au niveau des paramètres physiques estimés.

7.2 L'estimation d'état

La détection de défauts par estimation d'état a surtout été étudiée avec le modèle de PARK.

Les techniques de détection de défauts les plus répandues en automatique reposent sur la génération de résidus à partir d'un modèle de fonctionnement sain. Différentes approches, que l'on peut classer sous le terme générique d'estimation d'état, ont été étudiées et évaluées par plusieurs méthodes :

- Banc d'observateur à entrées inconnues avec découplage non linéaire, sur la base du modèle de Park.
- Observateur d'état à mode glissant.
- Génération de résidus par projection des équations du modèle de Park dans l'espace départie.

En diagnostic, l'objectif est d'estimer les variables d'état du système à partir d'un modèle de comportement parallèle rebouclé de façon à s'affranchir essentiellement des problèmes d'initialisation des grandeurs d'état. Ces grandeurs estimées sont comparées aux grandeurs mesurées afin de détecter le dysfonctionnement dans le système surveillé.

7.3 Traitement de signaux

Pour effectuer le diagnostic d'une installation, les opérateurs de maintenance analysent un certain nombre de symptômes tels que le bruit, la température, les vibrations, etc.

En s'appuyant sur leur expérience. Ces symptômes ne sont que la manifestation flagrante d'une modification des caractéristiques temporelles et fréquentielles d'un certain nombre de grandeurs mesurables.

Toutes les méthodes de traitements de signal disponibles pour le diagnostic des machines tournantes peuvent être classées dans cinq groupes différents :

7.3.1 Analyse spectrale

L'analyse spectrale est certainement la méthode la plus naturelle pour le diagnostic des barres cassées. En règle générale, la seule grandeur intéressante

accessible au stator est le courant et l'intérêt de son analyse spectrale est de pouvoir détecter et identifier l'élément défectueux en fonction de sa fréquence.

7.3.2 Analyse cepstrale

Le cepstre est une anagramme du mot 'spectre' la raison de ce choix tient à ce qu'on obtient le cepstrum en effectuant une analyse spectrale supplémentaire sur le spectre fréquentiel du signal observé. Le cepstre est plus particulièrement utilisé dans les analyses vibratoires des machines tournantes. Les principales applications concernent la détection des défauts dans les roulements, les turbines ou encore les engrenages [28].

7.3.3 Les méthodes de détection de fréquences connues

Ces méthodes reposent sur le principe que les défauts se caractérisent par l'apparition ou le renforcement d'une raie à une fréquence fixe ou proportionnelle à la vitesse de rotation de la machine.

7.3.4 Méthodes temps – fréquence

Les méthodes d'analyse temps – fréquence ont été développées pour l'étude des signaux non stationnaires.

Plus généralement elles s'appliquent à des signaux dont le contenu fréquentiel ou les propriétés statistiques évoluent au cours du temps. Pour décrire cette évolution temporelle il faut réaliser une analyse spectrale évolutive.

7.3.5 Méthode temps-échelle

Ce mode de représentation est utilisé pour détecter des phénomènes qui se déroulent sur des échelles de fréquence différentes rencontrées dans un signal.

8 Technique de traitement de signal utilisées dans le diagnostic

8.1 Transformée de Fourier rapide (FFT)

Considérons le signal $X(t)$ à temps continu. Si X est à énergie finie, sa transformée de Fourier à la fréquence f est la suivante [34]:

$$X(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) e^{-2\pi f t} dt \quad (I.1)$$

Son inverse est donné par 0 :

$$x(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} X(f) e^{-2\pi f t} df \quad (I.2)$$

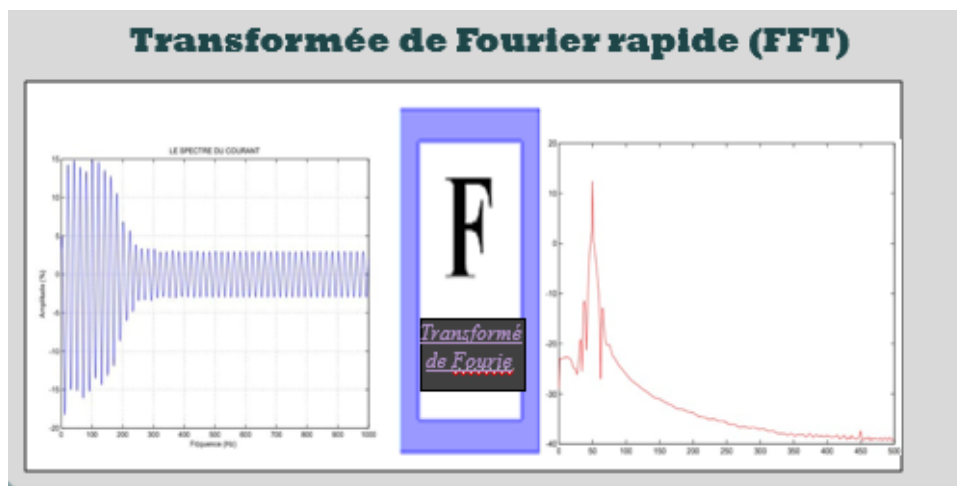


Figure I.12: Représentation temporelle vers fréquentielle

La transformée de Fourier rapide (FFT) est un algorithme de calcul rapide de la transformée de Fourier discrète. L'algorithme de base de cette transformée utilise un nombre de points N égal à une puissance de 2, ce qui permet d'obtenir un gain en temps de calcul,

Par rapport à un calcul avec la transformée de Fourier discrète, de $\frac{N}{\log_2(N)}$ cette transformation fait clairement ressortir le contenu fréquentiel du signal $x(t)$. En effet, la FFT décompose le signal $x(t)$ sur une base de vecteurs propres

sinusoïdaux $\{e^{2\pi fkt}\}$ ou $f \in \mathbf{R}$

Malheureusement, ceci convient pour des signaux stationnaires dont les propriétés statistiques sont invariantes dans le temps. Cependant, en pratique la grande majorité des signaux rencontrés sont non stationnaires et la notion de décomposition sur une somme infinie d'exponentielles complexes propres à la FFT s'avère inadéquate.

Pour mieux décrire ce type de signaux, on fait appel à des représentations faisant intervenir conjointement le temps et la fréquence. Le changement ainsi opéré nous permettra d'analyser les lois du comportement fréquentielle du signal au cours du temps. Dans le cas de l'existence de sauts d'impulsions ou de changements de

fréquence par exemple, la FFT ne permet pas de localiser ces événements transitoires qui surviennent dans le signal [34], [36]. Ces phénomènes sont non stationnaires et du fait qu'ils sont brefs et souvent à caractère oscillatoire, leur contenu spectral est difficile à mettre en évidence.

Pour résoudre ce problème, GABOR (1964) a introduit la transformée de Fourier à court terme qui se base sur le fenêtrage (Windowing). Il s'agit de segmenter en tranche de temps fixes le signal à analyser et d'appliquer par la suite la Transformée de Fourier à chaque tranche. La suite logique pour la résolution de ce problème a été l'élaboration d'un puissant outil localisé en temps et en fréquences dénommé la transformée en Ondelettes (Wavelets transforme).

9 Diagnostic de la machine par l'application des méthodes de l'intelligence artificielle

La surveillance des machines asynchrones est sans aucun doute la meilleure solution pour garantir la détection précoce des défauts. Dans cette partie, on cherche à décrire l'apport des méthodes de l'intelligence artificielle (IA) pour le diagnostic des défauts des machines asynchrones triphasés. Ces outils sont utilisés pour améliorer le diagnostic. Ils contribueront, par l'analyse des signatures, à détecter, localiser et à suivre l'évolution du défaut.

L'intelligence artificielle, apparue en 1956, peut se définir comme la recherche de moyens susceptibles de permettre à une machine d'exécuter des fonctions normalement associées à l'intelligence humaine : compréhension, raisonnement, dialogue, adaptation, apprentissage...

L'IA comprend différentes techniques telle que : systèmes experts, réseaux de neurones, logique floue et réseaux neuro-floue. Plusieurs études [11,30] ont permis de mettre en évidence l'apport de ces techniques pour l'amélioration de la fiabilité du diagnostic des machines asynchrones.

9.1 Systèmes experts

Cet outil permet la modélisation de l'approche des experts dans un domaine précis. Ces systèmes sont utilisés principalement lorsque le mode de la représentation de la reconnaissance est de type symbolique.

Un système expert est composé principalement de deux parties : base de reconnaissance contenant les règles et les données du problème et un moteur d'inférence qui représente l'organe de résolution et élabore la solution la mieux adaptée. Cette technique a été l'objet de plusieurs études [28, 6] grâce à sa simplicité.

9.2 Réseaux de neurones artificiels(RNA)

C'est un modèle de calcul inspiré des neurones biologiques. Cette approche fait l'objet de plusieurs recherches dans des domaines variés, tel que l'approximation, la classification, grâce à ses caractéristiques essentiellement les facultés d'apprentissage et de généralisation. L'utilisation de cette technique est intéressante pour le diagnostic avec signature externe. Elle est composée de deux phases : phase d'apprentissage et phase de test.

Pour la phase d'apprentissage, il est nécessaire d'avoir une base des exemples de bon fonctionnement et de défauts. Dans la phase suivante, phase de test, le système doit reconnaître pas seulement ce qui a appris mais aussi il doit avoir la faculté de connaître des nouveaux exemples.

Pour le diagnostic des machines électriques, plusieurs architectures de réseaux de neurones ont été utilisées et elles ont donné des résultats intéressants. On peut citer parmi ces architectures celles qui sont les plus utilisées : le Perceptron Multicouche (Multi Layer Perceptron MLP), les réseaux de Fonctions à Base Radiales (Radial Basis Fonctions RBF), les cartes de Kohonen (Self Organisation Mapp SOM) et les machines à vecteurs de support (*Support Vector Machines SVM*).

Ainsi, Felippeti [12] utilise le perceptron multicouche (*Multi Layer Perceptron MLP*) pour le diagnostic des défauts de machine. Cette approche est développée pour une machine à induction en utilisant comme paramètres d'entrée les tensions instantanées et les courants.

Cependant, Mesbahi et Benyettou ont utilisé les réseaux de Fonctions à Base Radiale (*RBF*) pour la reconnaissance de l'environnement d'un robot mobile.

Les travaux de [1,21] développent la mise en œuvre des cartes de Kohonen (*Self Organisation Map SOM*) pour le diagnostic de l'étendu d'un défaut rotorique et les défauts de roulements. Grâce à la capacité d'apprentissage non supervisé des

SOM, ils ont mis en évidence la capacité de ces cartes pour mettre en œuvre un outil de rejet afin de détecter les mesures aberrantes et l'apparition des nouvelles défaillances.

Néanmoins, l'inconvénient majeur de ces techniques est de trouver la structure idéale, la taille de réseau et l'architecture convenables.

9.3 Logique floue

La logique floue permet la représentation des connaissances imprécises et incertaines. Elle permet de définir une appartenance graduelle d'un élément à une classe c'est-à-dire qu'un élément peut appartenir à une classe et son complémentaire. Ainsi l'appartenance de l'objet à une classe est définie par un degré d'appartenance entre 0 et 1. Ce degré peut être déterminé en utilisant une fonction d'appartenance tel que : la fonction triangulaire, trapézoïdale ou gaussienne, etc.

Pour la mise en œuvre d'un contrôleur flou, il est nécessaire de suivre les étapes suivantes :

- Fuzzification : Cette étape décrit le passage des entrées physiques aux variables linguistiques par l'introduction des fonctions d'appartenance.
- Inférence : La deuxième étape consiste à rédiger la base des règles. Les règles écrites présentent l'ensemble des expressions basées sur la logique ou les connaissances de l'expert. Ces règles sont généralement de type *SI ...ALORS...*
- Defuzzification : c'est le passage des variables linguistiques aux entrées physiques. Donc, chaque information floue sera traduite en une sortie physique précise. Michel [24] applique la logique floue dans la commande des machines synchrones à aimant permanent.

9.4 Réseaux neuro-floue

C'est une combinaison des réseaux de neurones avec la logique floue. Cette combinaison a des bénéfices pour le diagnostic de la machine asynchrone en intégrant la capacité d'apprentissage des réseaux de neurones avec la capacité de raisonnement logique de la logique floue.

Cependant, les études faites dans [13,2] ont utilisé les réseaux neuro-floue pour la reconnaissance de montants numériques de chèques arabes et la prédiction des défaillances. Des études ont montré la flexibilité de cette technique.

10 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons montré les principaux éléments de la constitution d'une machine asynchrone qui peuvent présenter des défaillances induisant a un arrêt de la machine, aussi des études statistiques ont été présentées pour illustrer l'impact de ces défauts dans le domaine industriel, Ainsi les différentes méthodes de modélisation et de diagnostic de la machine asynchrone ont été présentées. Enfin, à travers plusieurs travaux, nous avons montré l'utilité des techniques de l'Intelligence Artificielle pour le diagnostic et la détection précoce des défauts.

Chapitre III

Machine à Vecteurs De Support Et Simulation

CHAPITRE II

Modélisation de MAS par éléments finis

CHAPITRE I

Généralité

- [1] T.Aroui « *Diagnostic de défauts de machines électriques* », thèse de doctorat, Ecole Nationale d'Ingénieurs de Sfax, Janvier 2009.
- [2] N.E.AYAT, M.CHERIET, C.Y.SUEN « *Un système neuro-flou pour la reconnaissance du montants numériques de chèques arabes* ».
- [3] L. Kerszenbaum et C. F. Landy, "The existence of large inter bar currents in the three phase squirrel cage motors with rotor-bar and en-ring faults" *IEEE Transactions on Power Apparatus Systems*, Vol. PAS-103, n°7, pp.1854- 1862, July 1984.
- [4] J.Beaudry « *Système neuronal pour le positionnement et la classification d'éléments visuels d'un terrain de soccer robotisé* », Laboratoire de mécatronique, DGÉ, ÉPM Montréal, Québec, Canada.
- [5] M.Bentoumi « *Outils pour la détection et la classification. Application au diagnostic de défauts de surface de rail* »,2004.
- [6] P. O'Donnell, "Report of large reliability survey of industrial and commercial installations, Part 1", *IEEE Transaction on Industry Applications*, Vol. IA 21, N°4, July/august 1985 pp 853 – 864.
- [7] "Présentation des avaries. Machines électriques tournantes" cahier des préventions. CP2, Allianz, 1988.
- [8] O. V. Thorsen, M. Dalva, "A survey of fault on induction motors in offshore oil industry, petrochemical industry, gas terminals, and oil refineries" *IEEEET transactions on Industry Applications*, Vol.31, no.5, pp.1186-1196, September 1995.
- [9] S.Canu « *SVM et machines à noyaux* ».Ecole d'été du GRETSI – Peyresq, 2010.
- [10] P.Comon « *Classification supervisée par réseaux multicouches* », 1992.
- [11] J.Daniel.Zucker « *introduction à l'intelligence artificielle* », Laboratoire LIP6,2001.

- [12] V. Devanneaux, H. Kabbaj, B. Dagues et J. Faucher, "An accurate model of squirrel cage induction machines under static, dynamic or mixed eccentricity" Proc. IEEE SDEMPED 2001 – Symposium on diagnostics for electric machines, power electronics and drives, pp.121-126, 1-3 September 2001 Grado , Italia
- [13] R.Gouriveau, M.EL-Koujok, N.Zerhouni, *Spécification d'un système neuro-flou de prédiction de défaillances à moyen terme* ».
- [14] M. S. Naït-Saïd, M. E. H. Benbouzid et A. Benchaib, "Detection of broken bars in induction motors using an extended kalman filter for rotor resistance sensor less estimation" *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol.15, no 1, pp.66-70, Mars 2000
- [15] Toliyat H. A. and Lipo T. A., « Transient analysis of cage induction machines under stator, rotor bar and end ring faults », *IEEE Trans. Energy Conversion*, vol. 10, n°2, June 1995, pp. 241-247.
- [16] G. Barakat « Synthèse de plusieurs méthodes de modélisation et de diagnostic de la machine asynchrone à cage en présence de défauts ». Article de synthèse des travaux de huit laboratoires dans l'opération " Détection de Défauts et Diagnostic des Actionneurs" du thème "Sûreté - Fiabilité", p3, 2005.
- [17] M.Hasan, F.Boris « SVM : Machines à Vecteurs de Support ou Séparateurs à Vastes Marges »,2006.
- [18] Derrhi M., « Modélisation de la machine asynchrone par réseaux de perméances, validation par le diagnostic», *Thèse de doctorat, Université de Picardie Jules Verne*, 2000.
- [19] B.Karanayili, M.F.Rahman, C.Grantham « Induction motor parameter determination technique using artificial neural networks ». *Electrical Machines and Systems*, 2008. ICEMS 2008.

-
- [20] N. M. Elkasabgy, A. R. eastham, G. E. Dawson, "Detection of broken bars in the cage rotor on an induction machine" IEEE Transactions on Industry Applications, Vol.28, no.1, Part 1, pp. 165-171, Jan.-Fév. 1992
- [21] N.Klii « *Utilisation des cartes de Kohonen pour la classification des défauts des machines asynchrones* », avril 2012.
- [22] T. J. Sobczyk, A. Izvorski, "Recognition of rotor eccentricity of induction motor based on the Fourier spectra of phase currents" Proc. ICEM'98, pp. 408 – 413, Vol1, September 2 - 4 1998 Istanbul Turkey
- [23] Touhami O., N. Lahcene, R. Ibtouen, and M. Fadel. *Diagnosis of induction machi rotor defects from an approach of magnetically coupled multiple circuits. In IEEE Proceedings of the 38th Southeastern Symposium on System Theory Tennessee Technological University, pp. 1992–1996, Cookeville, TN, USA, March 5-7 2006.*
- [24] A. H. Bonnet, "Cause and analysis of Anti-Friction Bering Failures in A.C Induction Motors" IEEE Transactions on Industry Application, pp 14 - 23, Sept/Oct 1993
- [25] Boumegoura T. *Recherche de signature électromagnétique des défauts dans une machine asynchrone et synthèse d'observateurs en vue du diagnostic. PhD thesis, Ecole centrale de Lyon, France, 2001.*
- [26] Bouzida A. and M.A. Boumaza. «*Diagnostic de défauts au rotor par l'approche de l'estimation paramétriques*». *Thèse d'ingénieure, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, Join 2005.*
- [27] Benabida F. and M. Ouadah. «*Diagnostic de défauts au stator et au rotor par estimation paramétrique de la machine asynchrone `a cage d'écureuil*». *Thèse d'ingénieurs, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, Juin 2006. ENP 2008 67*
- [28] Toliyat H. A. and Lipo T. A., « *Transient analysis of cage induction machines under stator, rotor bar and end ring faults* », IEEE Trans. Energy Conversion, vol. 10, n°2,

June 1995, pp. 241-247.

[29] Bangura J.F., Demerdash N.A., « *Diagnosis and characterization of effects of broken bars and connectors in squirrel-cage induction motors by time-stepping coupled finite element-state space modeling approach* », *IEEE Trans. on Energy Conversion*, vol.14, n°4, December 1999, pp.1167-1176.

[30] M.Parizeau « *Le perceptron multicouche et son algorithme de rétropropagation des erreurs*». Université Laval, 2004.

[31] L.S.Resende, J.M.Romano, M.G.Bellanger « *Un algorithme de moindres carrés rapide robuste pour traitement adaptatif d'antenne avec contraintes* ».

[32] Jerance N., Rostaing G., Rognon J.-P., Foggia A., « *Induction machine modeling by reluctance network for fault diagnostic* », *Proc. of electrimacs'02*, Montréal, Canada, 18th - 21st August, 2002.

[33] F.Sebastiani « *Text Categorisation* »,2002.

[34] E. Oran Brigham, "Fast Fourier transform and its applications," Prentice Hall, 1988.

[35] J. Cusido, L. Romeral, J. A. Ortega, J. A. Rosero, A. Garcia, "Fault detection in induction machines using power spectral density in wavelet decomposition," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 55, No. 2, pp. 633–643, Feb. 2008.

[36] S. H. Kia, H. Henao, G. A. Capolino, "Diagnosis of broken-bar fault in induction machines using discrete wavelet transform without slip estimation," *IEEE Transactions on Industry Application*, Vol. 45, No. 4, pp. 107– 121, Jul/ Aug.

Bibliographies

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne démocratique et populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

01 سعد دحلب جامعة البليدة
Université SAAD DAHLAB de BLIDA 01

كلية التكنولوجيا
Faculté de Technologie

قسم الآلية و الالكتروتقني
Département d'Automatique et Electrotechnique



Mémoire de Master

Option Électrotechnique

Spécialité Machines
Électriques

Présenté par

LOUKAL TAREK

&

HATCHANE HAMZA

SURVEILLANCE DES MOTEURS ASYNCHRONE PAR LES MACHINES A
VECTEURS DE SUPPORT (SVM)

Promoteur : **HACHELAF RADOUANE**

Année Universitaire 2021-2022.