

Chapitre I

Diagnostic des défauts dans la machine asynchrone

I.1 Introduction

Les machines électriques tournantes occupent une place prépondérante dans tous les secteurs industriels. Les machines asynchrones triphasées à cage d'écuréuil sont les plus fréquemment utilisées grâce à leur robustesse, leur simplicité de construction et leur coût bas. Néanmoins, celles-ci subissent au cours de leur durée de vie un certain nombre de sollicitations externes ou internes qui peuvent les rendre défaillantes. Les contraintes industrielles en fiabilité, maintenabilité, disponibilité et sécurité des équipements sont par ailleurs très fortes. C'est pourquoi le monde industriel est fortement intéressé par un ensemble de techniques permettant de déterminer l'état de santé de ces machines.

Plus généralement, la surveillance et le diagnostic en génie électrique remettent en cause les concepts et les outils traditionnels utilisés en conception et commande des machines électriques tournantes. La modélisation des machines asynchrones triphasées à cage d'écuréuil en vue de la surveillance et du diagnostic s'insère dans ce contexte.

I.2 La maintenance [5]

La maintenance est définie comme étant « *toutes les activités destinées à maintenir ou à rétablir un bien dans un état ou dans des conditions données de sûreté de fonctionnement, pour accomplir une fonction requise. Ces activités sont une combinaison d'activités techniques, administratives et de management.* ».

Maintenir, c'est donc effectuer des opérations (dépannage, graissage, visite, réparation, amélioration...etc.) qui permettent de conserver le potentiel du matériel, pour assurer la continuité et la qualité de la production. Bien maintenir, c'est assurer ces opérations pour que le coût global soit optimum. La figure représente le diagramme des différents concepts de maintenance et les évènements associés.

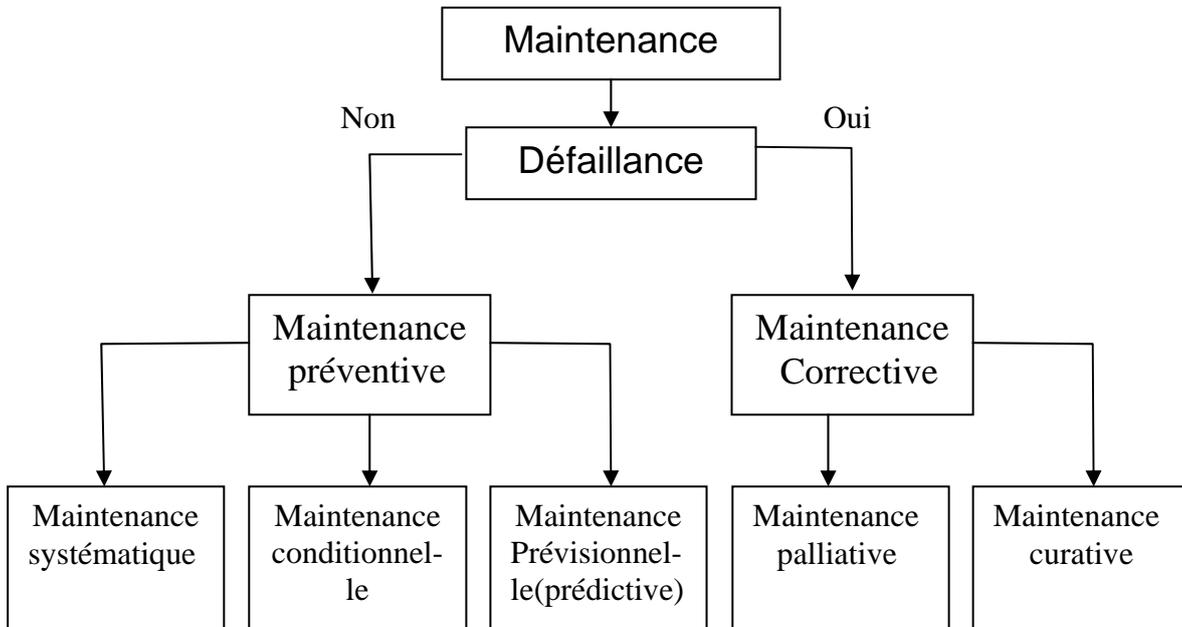


Figure I.1: Diagramme des différents concepts de maintenance

Maintenance corrective

« Ensemble des activités réalisées après la défaillance du bien, ou la dégradation de sa fonction pour lui permettre d'accomplir une fonction requise, au moins provisoirement : ces activités comportent notamment la localisation de la défaillance et son diagnostic, la remise en état avec ou sans modification, le contrôle du bon fonctionnement. »

- **Maintenance préventive**

« Maintenance ayant pour objet de réduire la probabilité de défaillance ou de dégradation d'un bien ou d'un service rendu. Les activités correspondantes sont déclenchées selon un échéancier établi à partir d'un nombre prédéterminé d'usage (maintenance systématique), et/ou des critères prédéterminés significatifs de l'état de dégradation du bien ou du service (maintenance conditionnelle). »

1. Maintenance préventive systématique

« Ce type de maintenance comprend l'ensemble des actions destinées à restaurer, en totalité ou partiellement, la marge de résistance des matériels non défaillants. Ces tâches sont décidées en fonction du temps ou de la production, sans considération de l'état des matériels à cet instant. »

2. Maintenance préventive conditionnelle

« Ce type de maintenance comprend toutes les tâches de restauration de matériels ou de composants non défectueux, entreprises en application d'une évaluation d'état et de la comparaison avec un critère d'acceptation préétabli (défaillance potentielle). »

3. Maintenance prévisionnelle (prédictive)

« C'est une maintenance préventive subordonnée à l'analyse de l'évolution surveillée de paramètres significatifs de la dégradation du bien. Elle permet de planifier les interventions. »

Mon travail consiste à effectuer une maintenance prédictive ` à la demande ´ plutôt que d'effectuer une maintenance systématique (méthode traditionnelle). Cela évite de faire des changements de pièces qui dans 90 % des cas se font de manière prématurée. Cela permet aussi de prévoir une intervention lors d'un arrêt de production programmé ou, si le cas le nécessite, lors d'un arrêt d'urgence toujours moins pénalisant qu'un arrêt forcé. De plus, les réparations avant incident sont plus faciles à exécuter et moins coûteuses (en temps d'intervention et en matériel). Il est aussi important de savoir qu'un défaut non traité peut entraîner des dégradations encore plus importantes.

Le concept hautement stratégique de maintenance prédictive qui a poussé des chercheurs à y contribuer diversement, nécessite la connaissance des grandeurs significatives à mesurer pour avoir une image aussi proche que possible de l'état de la machine. Le système de suivi de la machine devrait pouvoir :

- interférer le moins possible avec le système (les grandeurs peuvent-elles être mesurées " en ligne ? ", problème de sécurité,...),
- être capable de suivre plusieurs grandeurs,
- être évolutif,
- être pilotable à distance,
- pouvoir stocker les données pour permettre une analyse tendancielle.

Quant à la stratégie adoptée, elle consiste à :

- recenser les défauts et les pannes pouvant se produire,
- trouver les grandeurs mesurables liées à ces défauts,
- choisir la méthode la plus proche des critères définis ci-dessus,

- définir les seuils "d'alarme " à partir desquels il faudra intervenir.

I.3 Techniques de contrôle en ligne (non destructif)

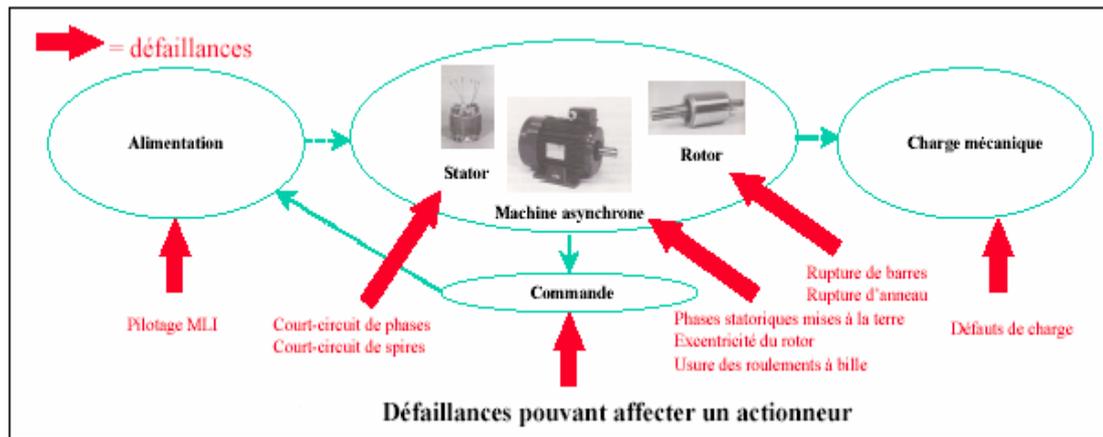


Figure I.2 : Différentes défaillances pouvant affecter une machine asynchrone [10]

Les entraînements électriques utilisent de plus en plus les moteurs asynchrones à cause de leur robustesse, leur puissance massique et leur faible coût de construction, mais il arrive que ces machines présentent des pannes (défauts) électriques ou mécaniques. Des études statistiques nous révèlent que certaines pannes sont plus fréquentes que d'autres, ce qui nous amène à axer notre étude vers un type de défaut le plus courant. Parmi les pannes majeures, nous trouvons les suivantes :

1. Les cassures de barres et de portions d'anneaux des cages

La détection de ces défaillances est rendue difficile par le fait que lors de leurs apparitions, la machine continue de fonctionner. Ces défauts ont, par ailleurs, un effet cumulatif. Le courant que conduisait une barre cassée, par exemple, se répartit sur les barres adjacentes. Ces barres sont alors surchargées, ce qui conduit à leurs ruptures, et ainsi de suite jusqu'à la rupture d'un nombre suffisamment important de barres pour provoquer l'arrêt de la machine. Elles provoquent aussi une dissymétrie de répartition de courant au rotor et des à-coups de couples, ceci va générer des vibrations et l'apparition de défauts mécaniques.

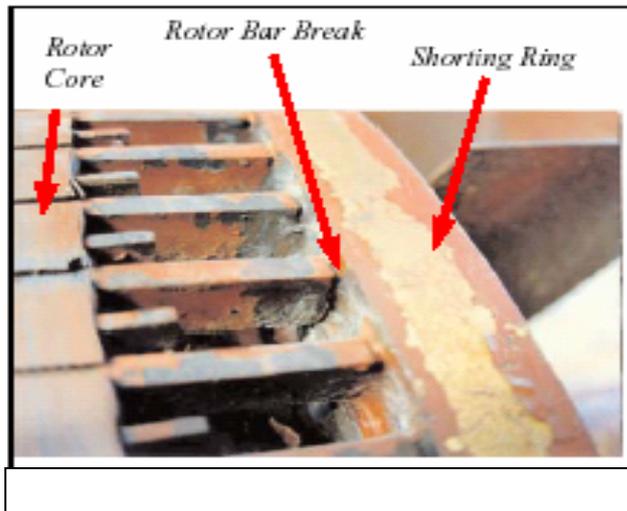


Figure I.3 : Barre cassé au niveau du rotor [12]

2. Les courts-circuits internes

un court-circuit entre phases provoquerait un arrêt net de la machine. Cependant, un court-circuit au bobinage près du neutre ou entre spires n'a pas un effet aussi radical. Il conduit à un déséquilibre de phases, ce qui a une répercussion directe sur le couple. Ce type de défauts perturbe aussi sensiblement les commandes développées sur la base du modèle de Park (hypothèse d'un modèle équilibré).

3. Les décharges partielles

Ce phénomène naturel, dû aux décharges dans les isolants entre conducteurs ou entre conducteurs et la masse, s'amplifie avec le vieillissement des isolants. Il est pratiquement imperceptible dans les isolants neufs par les moyens de mesures classiques car son effet n'est pas discernable par rapport aux bruits de mesure. Sa présence précède l'apparition des courts-circuits entre phases ou entre phases et masse lorsque ces décharges partielles ont suffisamment détérioré les isolants.

4. Dissymétrie du rotor

Celui-ci provoque la variation de l'entrefer dans le moteur, une répartition non homogène des courants dans le rotor et le déséquilibre des courants statoriques. Le déséquilibre des efforts sur les barres génère un couple global non constant.

Les défauts qui se produisent au niveau du rotor et leurs effets sur les signaux électriques (courant, couple, flux), mécaniques (vibrations) et chimiques (dégagement d'ozone, composition de l'huile des paliers) de la machine asynchrone sont importants et intéressent actuellement de plus en plus les chercheurs vu les gros progrès

réalisés au niveau du stator et vu les études statistiques qui indiquent des pourcentages élevés des défauts qui se produisent au niveau du rotor. Par exemple, une étude statistique effectuée en 1988 par une compagnie d'assurance allemande de systèmes industriels sur les pannes des machines asynchrones de moyenne puissance (de 50 kW à 200 kW), a montré que : 22 % des défauts sont des défauts rotoriques.

Les méthodes traditionnelles de détection de défauts reposent sur des prélèvements statistiques ou des essais destructifs effectués sur des échantillons à tester : diagnostic de l'isolation, mesures vibratoires, tests chimiques,

Toutes ces techniques exigent un arrêt total des machines nécessitant une main d'œuvre qualifiée et induisant une perte de production donc un préjudice économique, ce qui justifie l'intérêt des recherches menées aujourd'hui en vue d'aboutir à une surveillance non destructive (en ligne) qui permet de détecter à temps le 1^{er} défaut, donc éviter les dysfonctionnements ainsi que les opérations de maintenance lourdes et coûteuses associées.

Ces méthodes de C.N.D (contrôle non destructif) se sont concrétisées grâce surtout aux outils de modélisation, des techniques de traitement de signal, ...

Les principales techniques de C.N.D sont:

- Contrôle d'étanchéité (détection de fuites, trous, porosité,..)
- Ressuage (détection de discontinuité matière ouverte, contrôle de l'état de surface, ...)
- magnétoscopie (détection de défauts superficiels sur matériaux ferromagnétiques, arbre, anneaux, ...)
- Radiographie (détection de inhomogénéité en épaisseur, fissures, corrosion, ...)
- Ultra sons (contrôle de défauts internes, fissures, cordons de soudure, ...)
- Courants de Foucault (détection : anomalies dans la conductivité électrique ou dans la perméabilité magnétique, variation de composition d'un alliage,
- Thermiques (détection d'anomalies de transmission de chaleur au sein de la matière, ...)
- Emission acoustique (détection d'écoulement de fluide, rupture par fatigue, déformation plastique, ...)
- Holographie (détection du manque de liaisons, vibration de faible amplitude, ...)
- Analyse de signature (détection d'anomalies au niveau des masses, vibrations, ...)

I.4 Les approches usuelles de détection

On va présenter deux méthodes utilisées en diagnostic de systèmes physiques :

Méthodes sans modèle analytique,

Méthodes basées sur les modèles analytiques.

I.4.1 Méthodes sans modèle analytique

I.4.1.1 Analyse fréquentielle (Filtrage)

Une première approche du traitement du signal repose sur l'analyse fréquentielle (transformée de Fourier). Elle est bien évidemment très utilisée pour la détection de phénomènes périodiques comme en analyse vibratoire. L'analyse du spectre des signaux issus des capteurs permet de déterminer très efficacement

l'état de l'installation sous surveillance. Les signaux sont ici tout d'abord analysés en état normal de fonctionnement. Ensuite, toute déviation des caractéristiques fréquentielles d'un signal est reliée à une situation de panne (le problème, c'est qu'un changement de consigne modifie les caractéristiques fréquentielles et cela n'a rien d'un défaut).

I.4.1.2 Redondance matérielle

Cette méthode consiste à multiplier physiquement les capteurs critiques d'une installation.

Un traitement des signaux issus des éléments redondants effectue des comparaisons et distingue l'élément défectueux en cas d'incohérence. Cette méthode est pénalisante en termes de poids, puissance consommée, volume et coût (d'achat et de maintenance). Elle est donc essentiellement réservée aux cas où la continuité de service est obligatoire (e.g. l'aérospatiale, le nucléaire). En effet, elle apporte l'avantage, une fois la défaillance détectée et localisée, de pouvoir utiliser la partie de l'équipement encore saine mais cette technique ne s'applique généralement que sur des capteurs.

I.4.1.3 Capteurs spécifiques (capteurs-détecteurs)

Des capteurs spécifiques peuvent également être utilisés pour générer directement des signaux de détection ou connaître l'état d'un composant. Par exemple, les capteurs de fin de course, d'état de fonctionnement d'un moteur ou de dépassement de seuils sont largement employés dans les installations industrielles.

I.4.1.4 Réseaux de neurones artificiels

Quand la connaissance sur le procédé à surveiller n'est pas suffisante et que le développement d'un modèle de connaissance du procédé est impossible, l'utilisation de modèle dit « boîte noire » peut être envisagée. Pour cela des réseaux de neurones artificiels (RNA) ont été utilisés. Un RNA est en fait un système informatique constitué d'un nombre de processeurs élémentaires (ou nœuds) interconnectés entre eux qui traite -de façon dynamique- l'information qui lui arrive à partir des signaux extérieurs.

I.4.2 Méthodes basées sur les modèles analytiques

La plupart des méthodes de détection et de diagnostic en ligne s'appuient sur des les mesures.

Il existe des méthodes qui utilisent plus de connaissances que celles apportées par les seuls capteurs physiques. Ces connaissances peuvent en particulier provenir de la connaissance du comportement entrée /sortie d'un procédé ou des processus qui en gouverneraient l'évolution. Cette connaissance est généralement exprimée sous forme de modèles mathématiques.

Parmi les différentes méthodes de détection utilisant des modèles mathématiques, nous trouverons principalement l'espace de parité, les observateurs et l'estimation paramétrique.

I.4.2.1 Espace de parité

Son nom provient du domaine de l'informatique où le contrôle de parité se faisait dans les circuits logiques. Le principe de la méthode est la vérification de la consistance existante entre les entrées et les sorties du système surveillé

I.4.2.2 Observateurs

Par la suite, nous ferons référence à la stratégie appelée par certains auteurs « par observateurs » ou encore « en boucle fermée » par opposition aux méthodes en boucle ouverte, qui correspondent à celles de l'espace de parité décrit précédemment.

I.4.2.3 Estimation paramétrique

L'approche d'estimation paramétrique mesure l'influence des défauts sur les paramètres et non plus, comme précédemment, sur les variables du système physique.

Le principe consiste à estimer en continu des paramètres du procédé en utilisant les mesures d'entrée/sortie et en l'évaluation de la distance qui les sépare des valeurs de référence de l'état normal du procédé .

L'estimation paramétrique possède l'avantage d'apporter de l'information sur la taille des déviations. Toutefois, un des inconvénients majeurs de la méthode réside dans la nécessité d'avoir un système physique excité en permanence. Ceci pose des problèmes pratiques dans le cas de procédés dangereux ou fonctionnant en mode stationnaire. De plus, les relations entre les paramètres mathématiques et physiques ne sont pas toujours inversibles de façon unitaire, ce qui complique la tâche du diagnostic basé sur les résidus.

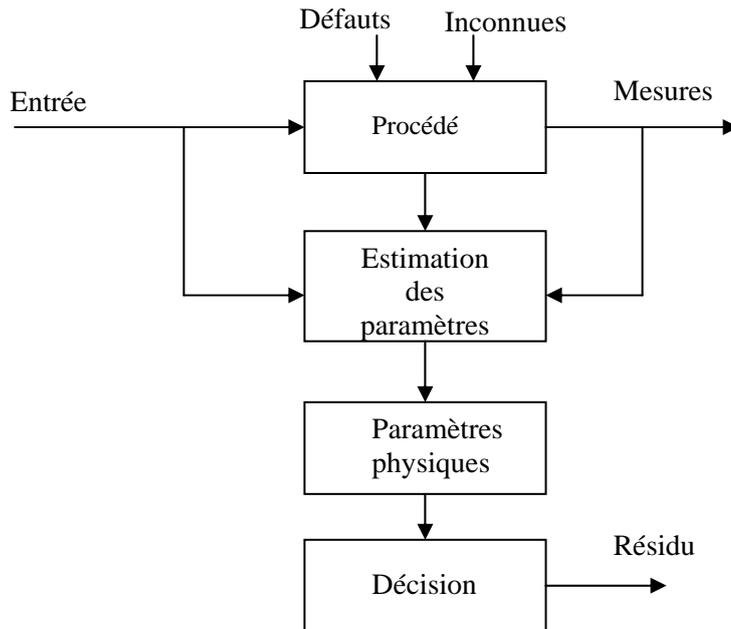


Figure I.4 : Estimation paramétrique pour la détection et le diagnostic de défauts

I.5 Description des différentes méthodes d'analyse

Le diagnostic en ligne de défauts rotoriques dans les machines asynchrones en vue d'aboutir à une maintenance prédictive a poussé les chercheurs à mettre au point diverses techniques. La majorité de ces travaux se sont basés sur la signature de grandeurs externes telles que (courant, couple) utilisant la théorie de champs tournants et celle des circuits électriques.

Durant la décade passée, les équipes de **Williamson et Smith** ont basé leur étude faite en régime permanent sur la détection des signaux modulés à une fréquence double du glissement ($2 \cdot g \cdot f_s$) apparaissant lors de dissymétries rotoriques suite à des défauts de cage.

Ils ont utilisé le schéma multi- enroulement équivalent, où chaque maille électrique est assimilée à un enroulement monophasé générant deux champs tournant en sens inverse à la fréquence ($g \cdot f_s$) par rapport au rotor, donc à la fréquence de **Delerio** [10] :

$$f_k = f_s [(k/p) \cdot (1-g) + g]$$

Où

k : rang harmonique

p : nbre de paire de pôles

g : le glissement

f_s : fréquence fondamentale

Par rapport au stator. Ils ont constaté une diminution des courants statoriques ainsi que du couple et une surcharge en courant dans les barres voisines au défaut.

Ils ont conclu aussi qu'il est difficile de détecter la première barre cassée à cause de la faible amplitude de la raie de défaut.

T.Boumegoura [3] « *recherche de signature électromagnétique des défauts dans une machine asynchrone et synthèse d'observateurs en vue du diagnostic* » a fait une étude sur les effets des défauts de la machine asynchrone et a proposé une approche qui repose sur la surveillance de paramètres de modèles comportementaux de la machine, sensible aux défauts : Les résistances rotoriques d'un modèle triphasé, l'inductance magnétisante et la résistance rotorique d'un modèle diphasé.

Des outils de détection des défauts rotoriques, basés sur des observateurs de Kalman et grand gain étendu adaptés aux systèmes non- linéaires ont été synthétisés pour tracer les paramètres précédents.

S. Amrane [7] a envisagé une surveillance en ligne des machines (concept de maintenance prédictive) et s'est particulièrement intéressée à la détection de défauts de cages de moteurs d'induction, en utilisant une approche analytique basée sur la signature des grandeurs externes. Pour améliorer le diagnostic, elle a proposé un mode de surveillance actif par action sur les grandeurs d'entrée et de sortie du système.

D. Gaétan, H. Razik [9] ont développé une technique maintenant répandue qui est l'« *analyse de la signature du courant du moteur* » en vue de la détection d'une panne électrique ou mécanique. Ils ont mis l'accent sur la détection d'un défaut au rotor, rupture partielle ou non d'une barre de la cage d'écureuil ou d'une portion d'anneau, par l'analyse spectrale du courant absorbé au réseau électrique.

Jufer et Abdellaziz [16] ont proposé un schéma multi- enroulement équivalent à la cage rotorique tenant compte de l'influence du stator par le biais de sources de potentiel équivalentes à l'effet du bobinage en utilisant la théorie des deux axes.

Ils ont mis en évidence le même phénomène de modulation en amplitude du courant statorique à $(2.g.f_s)$, mais le champ d'application de leur méthode se trouve limité par le fait qu'ils ne considèrent que des défauts concentrés suite à un phénomène d'avalanche ne touchant que les barres adjacentes au défaut : surcharge du courant direct (i_d) en cas de barres cassées et surcharge du courant transversal (i_q) en cas de rupture d'anneaux.

E.Ritchie, X.Deng and T.Jokinen [15] ont fait une étude en régime dynamique utilisant le schéma multi- enroulement avec référentiel lié au rotor.

Les résultats de simulation de la cage saine concordent très bien avec ceux de l'expérience, le modèle étant limité en cas de rupture de barres. Ils ont proposé d'affecter à la résistance de la barre cassée une valeur finie au lieu d'une valeur infinie pour prendre en compte les courants inter-barres.

Roland Casimir [2] « *diagnostic des défauts des machines asynchrones par reconnaissance des formes* » a fait une approche qui est basée sur l'utilisation des méthodes de reconnaissance des formes. Un vecteur de paramètres, appelé vecteur forme, est extrait de chacune des mesures effectuées sur la machine. Les règles de décisions utilisées permettent de classer les observations, décrits par le vecteur forme, par rapport aux différents modes de fonctionnement connus avec ou sans défauts.

Des défauts ont été créés au rotor et au stator de la machine asynchrone, alimentée soit à partir du réseau, soit par le biais d'un onduleur de tension.

Les procédures de décisions, basées sur la règle des **k**- plus proches voisins et sur le calcul direct des frontières, ont été utilisées pour détecter les défauts. Ces algorithmes ont montré l'efficacité de l'application de la reconnaissance des formes au diagnostic.

Vas, Filippetti ont proposé des modèles de $(N+3)$ mailles et deux axes (d et q) à partir d'un schéma multi-circuits pour la simulation de la cage saine et celle en défaut des machines asynchrones en régime transitoire moyennant la résistance R_r et l'inductance L_r équivalentes. Leur choix de signature du défaut de cage s'est porté sur la composante directe (i_{ds}) du courant statorique qui n'était faible que pour un nombre élevé de barres cassées.

Dorell, Paterson ont opté pour l'analyse spectrale du courant de phase statorique. Ils ont constaté que :

La fréquence $(1-2.g.f_s)$ domine lorsque la tension est réduite ou si l'inertie est grande la fréquence $(1+2.g.f_s)$ domine lorsque la tension est élevée si l'inertie est faible.

I.6 Conclusion

D'après l'état de l'art des méthodes utilisées pour l'identification et le diagnostic des défauts de la machine asynchrone à cage d'écureuil, dans sa partie rotorique, on a constaté que : Les défauts dans la partie rotorique de la machine asynchrone occupent une partie importante dans le domaine du diagnostic.