

Diagnosis of Failures in an Induction Machine

(Effect of Number of Broken Bars)

Diagnostique Des Défaillances Dans Une Machine Asynchrone

(Effet De Nombre Des barres Cassées)

Boutebba Okba

Département d'électronique
Université Ferhat Abbas de setif-1
Laboratoire d'électronique de
puissance et commande industrielle
(LEPCI)
Sétif, Algerie
boutebbaokba@gmail.com

Semcheddine Samia

Département d'électronique
Université de Ferhat Abbas setif-1
Laboratoire d'électronique de
puissance et commande industrielle
(LEPCI)
Sétif, Algerie
samia.semchedine@univ-setif.dz

Talhaoui Hicham

Département d'électromécanique
Université de Bordj Bou Arreridj
laboratoire de LPMRN Bordj Bou
Arreridj, Algerie
th-34@hotmail.fr/
hichem.talhaoui@univ-bba.dz

Abstract— This article is part of the topic of surveillance, diagnosis and detection of anomalies of electric drives based on the squirrel cage induction machine in the presence of various faults in the rotor, more particularly the broken rotor bar fault. The spectral analysis of electromagnetic torque, speed and stator phase currents are an ideal tool for fault detection. On the one hand, it is shown that the broken rotor bar fault causes oscillations on the speed and the torque which result in vibrations in the rotation of the machine. On the other hand, for the stator current, the amplitude is no longer constant. These modulations which result in the presence of harmonics in the spectrum, where the appearance of the lateral rays in the vicinity of the fundamental which are used for the detection of broken rotor bar fault. To set up an effective detection technique, it is imperative to study the laws of variations of the amplitudes of these components as a function of the modulation frequency considered. Finally, the successful results obtained prove that the spectral analysis is able to detect the defect and the number of broken bars.

Keywords— Induction Machine, Diagnosis, Faults, Broken Rotor Bar, FFT, Spectral Analysis.

Abstract—Cet article s'inscrit dans la thématique de la surveillance, le diagnostic et la détection des anomalies des entraînements électriques à base de la machine asynchrone à cage d'écureuil en présence des divers défauts rotorique, plus particulièrement le défaut de cassures des barres rotorique, par analyse spectrale du couple électromagnétique, la vitesse et des courants statoriques. D'une part, on montre que les défauts de cassures des barres rotorique depuis leurs naissances entraînent des oscillations du couple et la vitesse à des fréquences caractéristiques du barre rotorique. D'autre part, un modèle de courant statorique prouve qu'en présence d'oscillations du couple, il existe des modulations de phase sur ces courants. Ces modulations se manifestent dans le domaine fréquentiel par l'apparition des composantes latérales sur le spectre du courant qui sont utilisées pour la détection des défauts de cassures des barres rotorique. Pour mettre en place une technique de détection efficace, il est impératif d'étudier les lois de variations des amplitudes de ces composantes en fonction de la fréquence de modulation considérée. Finalement, Les résultats réussis obtenus prouvent que l'analyse spectrale est capable de détecter le défaut et le nombre de barres cassées.

Mots clés—Machine asynchrone, Cage d'écureuil, Diagnostic, Défauts, Cassure des barres rotorique, analyse spectrale FFT

I. INTRODUCTION

La machine asynchrone (*MAS*) est la plus utilisée dans l'industrie en raison qu'elle présente de nombreux avantages tels que la puissance massique, robustesse, facilité de mise en œuvre, son faible coût, etc.... Malgré ses qualités des nombreuses défaillances peuvent apparaître sur la machine asynchrone à cage d'écureuil. Elles peuvent être électriques, mécaniques ou magnétiques [1]. Leurs causes, très variées parmi lesquels la rupture totale ou partielle de barre rotorique, portion d'anneau, défaut d'excentricité et court-circuit [2].

La naissance d'un défaut dans la machine asynchrone à cage lors de son fonctionnement n'implique pas l'arrêt instantané de la machine, mais il affecte directement les performances de la machine telles que le couple électromagnétique, les courants statorique, rotorique et la vitesse de rotation. Ces pannes occasionnent des pertes économiques considérables, il faut donc mettre en œuvre des systèmes de surveillance afin d'éviter les arrêts imprévus.

Dans une machine asynchrone, un défaut physique n'est pas évident à localiser avec des capteurs, surtout si le défaut se retrouve au rotor, à cause du mouvement de ce dernier. L'analyse par traitement du signal des grandeurs de ligne (courant, tension et puissance) peut donner une image réelle sur les déséquilibres qui se produisent dans la machine; cette analyse est basée sur les techniques telles que l'analyse par la transformée de Fourier fenêtrée et la technique de la logique floue. Ces études pour le but de retirer des informations qui sont contenues dans le signal d'origine, et permet de sélectionner parmi ces signaux ceux qui sont pertinents et exploitables pour le diagnostic. Donc la surveillance est un moyen de garantir le bon fonctionnement de trouver la cause des dysfonctionnements. Après la détection de défaut en passe à la maintenance qui joué le rôle d'éliminations des défauts.

Parmi toutes les méthodes utilisées ou proposées on se doit de prélever un ou plusieurs signaux pour : les traiter, les analyser, conclure à une défaillance ou non.

II. EFFETS MECANIQUES ET ELECTRIQUES DES DEFAUTS DE CASSURE DES BARRES ROTORIQUE

La rupture de barre est un des défauts les plus courants au rotor. La détérioration de ces barres réduit la valeur moyenne du couple électromagnétique C_e par l'augmentation de l'amplitude des oscillations[3], qui elles-mêmes provoquent des oscillations de la vitesse de rotation. Ce dernier engendre des vibrations mécaniques et donc, un fonctionnement anormal de la MAS. La grande amplitude de ces oscillations accélère la détérioration de la machine. Ainsi, le couple C_e diminue significativement (sensiblement) avec le nombre de barres cassées induisant un effet cumulatif de la défaillance.

Donc l'effet d'une rupture de barre rotorique croît rapidement, avec le nombre de barres cassées.

III. MODELE DE TAILLE REDUITE DE LA MACHINE ASYNCHRONE A CAGE :

Le modèle mathématique de la machine asynchrone est élaboré sur la base d'un certain nombre d'hypothèses simplificatrices fortes mais généralement admises[4]. En choisissant un référentiel lié au rotor, le modèle de taille réduite pour la machine asynchrone est présenté par [5][6].

$$\begin{bmatrix} L_{\sigma} & 0 & \frac{N_r M_s}{2} & 0 & 0 \\ 0 & L_{\sigma} & 0 & -\frac{N_r M_s}{2} & 0 \\ \frac{3}{2} M_s & 0 & L_{\sigma} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{3}{2} M_s & 0 & L_{\sigma} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & L_e \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_{ds} \\ I_{qs} \\ I_{dr} \\ I_{qr} \\ I_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{ds} \\ V_{qs} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} R_s & -\omega L_{\sigma} & 0 & \frac{N_r}{2} \omega M_s & 0 \\ \omega L_{\sigma} & R_s & -\frac{N_r}{2} \omega M_s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_r & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R_e \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ds} \\ I_{qs} \\ I_{dr} \\ I_{qr} \\ I_e \end{bmatrix} \quad (1)$$

Avec :

$$\begin{cases} L_{rc} = L_{rp} - M_{rr} + 2 \frac{L_e}{N_r} + 2L_e(1 - \cos \alpha) \\ R_r = 2 \frac{R_e}{N_r} + 2R_b(1 - \cos \alpha) \end{cases} \quad (2)$$

La matrice de la résistance de défaut devient le suivant :

$$[R_{rfdq}] = \begin{bmatrix} R_{rdd} & R_{rdq} \\ R_{rqd} & R_{rqq} \end{bmatrix} \quad (3)$$

Où les termes de la matrice $[R_{rfdq}]$ sont définis par les quatre expressions suivantes:

$$\begin{cases} R_{rdd} = 2R_b(1 - \cos \alpha) + 2 \frac{R_e}{N_r} + \frac{2}{N_r}(1 - \cos \alpha) \sum_k R_{bfk}(1 - \cos(2k-1)\alpha) \\ R_{rdq} = -\frac{2}{N_r}(1 - \cos \alpha) \sum_k R_{bfk} \sin(2k-1)\alpha \\ R_{rqd} = -\frac{2}{N_r}(1 - \cos \alpha) \sum_k R_{bfk} \sin(2k-1)\alpha \\ R_{rqq} = 2R_b(1 - \cos \alpha) + 2 \frac{R_e}{N_r} + \frac{2}{N_r}(1 - \cos \alpha) \sum_k R_{bfk}(1 + \cos(2k-1)\alpha) \end{cases} \quad (4)$$

Dans cette expression, l'indice k indique la barre cassée, la sommation concerne donc toutes les barres qui présentent un défaut.

Avec :

$$\alpha = p \frac{2\pi}{N_r} \quad : \text{ angle électrique entre deux mailles rotorique.}$$

k : caractérise la barre cassée.

R_{bfk} : Résistance de la barre défaillante k [Ω]

En ce qui concerne la partie mécanique, et par le passage de la transformation généralisée sur l'expression du couple, on obtient :

$$C_e = \frac{3}{2} P \cdot N_r M_{sr} (I_{ds} \cdot I_{qr} - I_{qs} \cdot I_{dr}) \quad (5)$$

La sous-matrice $[R_{rfdq}]$, relative de la résistance rotorique, est un très bon indicateur de la présence d'un défaut. En effet, si un défaut survient, les valeurs des résistances R_{rdd} et R_{rqq} sont différentes, notamment dans le cas de la machine saine ($R_{rdd} = R_{rqq}$). De plus, la valeur des termes R_{rdq} et R_{rqd} prennent une valeur différente de zéro, ce qui signifie la présence d'un défaut au rotor.

IV. RÉSULTAT DE SIMULATION

A l'aide d'un logiciel en utilisant MATLAB 2013a qui permet de mettre en évidence le comportement de la machine asynchrone. La résolution des équations différentielles obtenues est réalisée par la méthode de Runge-Kutta d'ordre 4.

Le tableau suivant présente les paramètres de la machine utilisée en simulation :

TABLE I. LES PARAMETRES DE LA MACHINE

puissance	$P_n = 1.1 \text{ Kw}$	$R_s = 7.58 \Omega$
tension	$V_n = 220 \text{ V}$	$R_r = 150 \mu\Omega$
Courant	$I_n = 4.6 \text{ A}$	$R_e = 150 \mu\Omega$
fréquence	$F_s = 50 \text{ Hz}$	$L_e = 0.1 \mu\text{H}$
Nbr de paire de pole	$p = 1$	$L_b = 0.1 \mu\text{H}$
Nbr de barres	$N_r = 16$	$L_{fs} = 26.5 \text{ mH}$
Nbr de spire par phase	$N_s = 160$	$K_0 = 0$
épaisseur d'entrefer	$e_0 = 0.2 \text{ mm}$	$J = 5.4 \cdot 10^{-3} \text{ Kgm}^2$

La **Fig. 1** présentent les résultats de simulation des grandeurs électriques et mécaniques du moteur asynchrone dans le cas de fonctionnement normal C.-à-d. à l'état sain. Le démarrage s'effectue à vide sous tension nominale $V_n = 220 \text{ V}$ avec une alimentation triphasée sinusoïdale équilibrée. À l'instant $t = 0.6 \text{ sec}$ nous procédons à un échelon de couple résistant nominal de $C_r = 3.5 \text{ Nm}$.

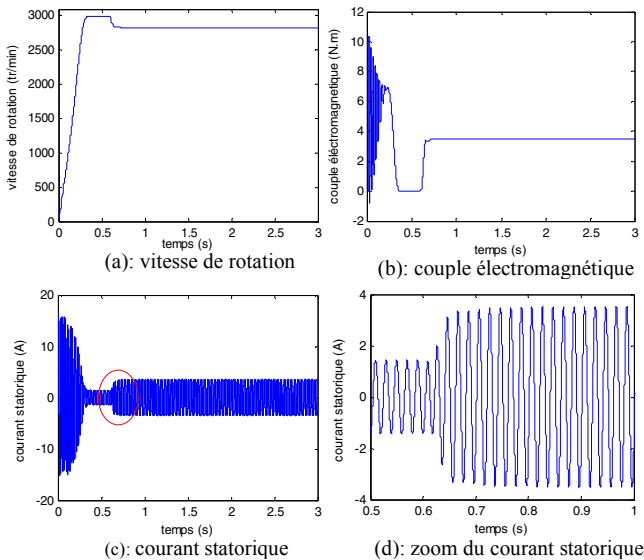


Fig. 1. Grandeur électrique et mécanique pour un régime de fonctionnement sain du moteur.

D'après les courbes de la **Fig. 1**, On note que le temps d'établissement des grandeurs électriques est rapide de l'ordre 0.23 sec.

Au démarrage le couple électromagnétique est fortement pulsatoire et atteint une valeur maximum de 10.4 N.m (**Fig. 1.b**), avant de se stabiliser par la suite autour d'une valeur qui sera presque zéro en régime de fonctionnement à vide $t=0.6$ sec.

on applique à l'instant $t = 0.6$ sec, un couple résistant nominal de $C_r=3.5$ N.m, d'après la (**Fig. 1.b**) on remarque que le couple électromagnétique rejoint sa valeur pour compenser cette sollicitation avec un temps de réponse quasiment instantanée, ce qui provoque une diminution de la vitesse de rotation (**Fig. 1.a**) à une valeur de 2830 Tr/min.

A. Cas d'un défaut de rupture de deux (la première et la seconde) barres rotorique

Pour mettre en évidence l'effet de nombre de barres cassées, nous simulons la rupture de deux barres (1ère et la 2ème barre), la première à l'instant $t = 1$ sec, la seconde barre à l'instant $t = 2$ sec (**Fig. 2**).

La **Fig. 2** montrent la variation du courant statorique, du couple électromagnétique, ainsi que la vitesse de rotation mécanique, en charge et lors de la rupture de la 1^{ère} barre puis de la seconde barre.

A l'instant $t=0.6$ sec, la machine a été soumise à un couple électromagnétique répond pour équilibrer le couple résistant, la vitesse chute alors à une valeur de 2830 tr/min et le courant augmente et atteint sa valeur nominale.

A $t=1$ sec, on provoque la rupture de la première barre, en augmentant sa résistance. On constate que la présence d'une barre rompue crée des oscillations dans la vitesse et dans le couple (**Fig 2.a** et **Fig 2.b**), ainsi qu'une modulation de l'enveloppe du courant de phase statorique (**Fig 2.e** et **Fig 2.e-1**), qui se traduisent par effet de créer des vibrations dans la rotation de la machine.

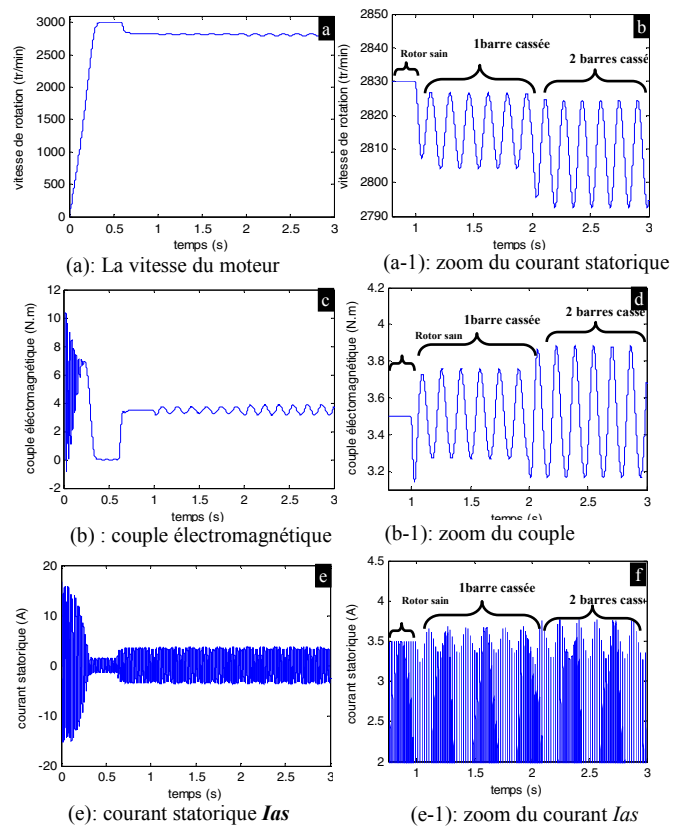


Fig. 2. Grandeur électrique et mécanique pour un régime fonctionnement avec défaut deux barres (1et 2).

A $t=2$ sec, on provoque la rupture de la 2ème barre ($k=1,2$) pour montrer l'influence du nombre des barres cassées. On remarque que : Si le nombre de barre cassée égal à 2 la vitesse mécanique chute à des valeurs considérables 2795 tr/min, le couple électromagnétique C_e present des oscillations plus important comparativement au cas de défaut d'une barre. Ces oscillations augmentent sensiblement avec le nombre de barres cassées. Pour le courant de phase statorique I_a , son amplitude ne reste plus constante.

La (**Fig 2. (e-1)**) Permette de vérifier la modulation de l'enveloppe du courant statorique après la présence du rupture d'une barre, puis de deux barres (1 et 2). On note également l'augmentation de l'amplitude de modulation quand une deuxième barre est cassée.

V. ANALYSE DU DEFAUT ROTORIQUE PAR FFT CLASSIQUE (ANALYSE SPECTRALE)

L'analyse spectrale repose sur une analyse systématique du signal de courant ou de vibration recherché, la présence d'images de l'ensemble des défauts susceptibles d'affecter l'installation considérée. Cela demande une connaissance des caractéristiques cinématiques des différents organes constitutifs, et de leur vitesse de rotation ou mieux encore de leur fréquence de mouvement [7].

Donc l'objectif de cette partie consacrée à l'étude de l'analyse spectrale, puis interpréter les oscillations observées sur le couple, la vitesse mécanique et la modulation de l'enveloppe du courant de phase statorique, lors d'une rupture de barres.

A. Résultats De Simulation Par analyse Spectrale De La Vitesse Et Du Couple Electromagnétique

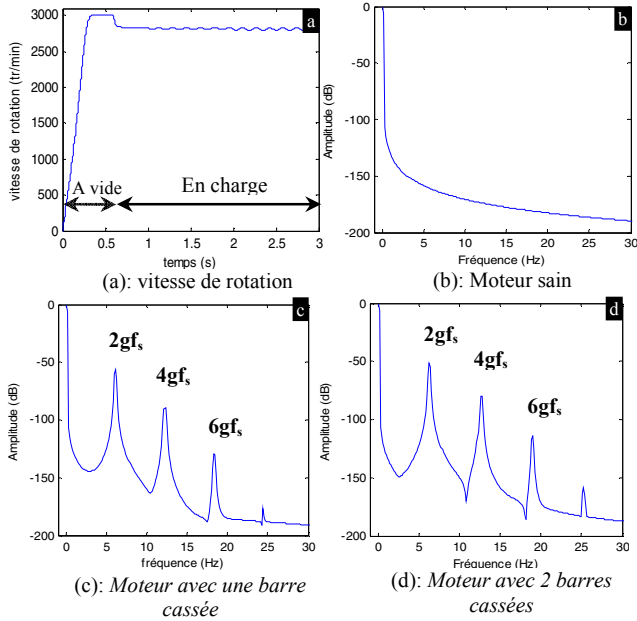


Fig. 3. Spectre de la vitesse avec $Cr=3.5$ N.m.

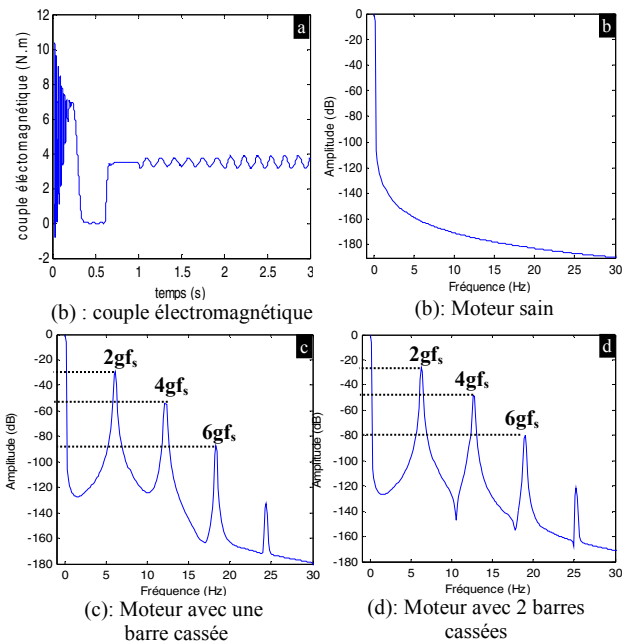


Fig. 4. Spectre du couple électromagnétique $Cr=3.5$ N.m.

D'après les courbes de la **Fig (3 et 4)**, on constat que la présence des harmoniques est un signe d'existence du défaut de barres et leurs amplitudes indiquent son degré de sévérité. On remarque aussi que le spectre du couple, donne des informations plus claires et plus visibles que celles données par le spectre de la vitesse, car les amplitudes des ondulations de la vitesse sont très faibles par rapport du couple électromagnétique.

B. Résultats De Simulation D'analyse Spectrale Du Courant Statorique

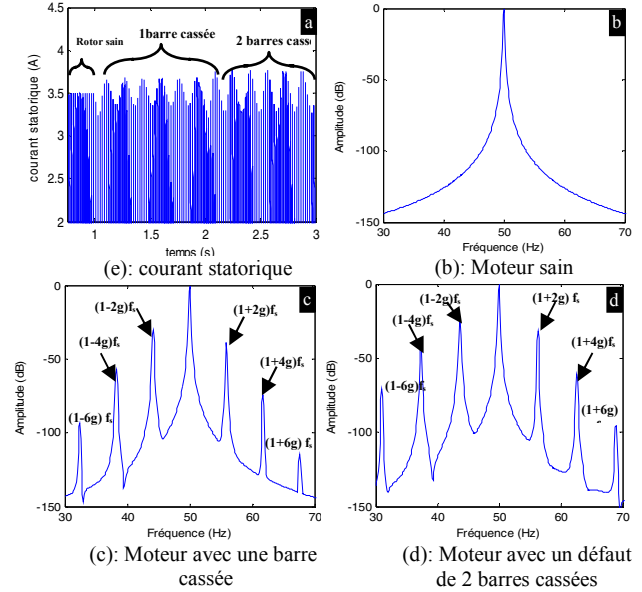


Fig. 5. Spectre du courant statorique I_{as} .

Les courbes de la **Fig. 5** représentent le spectre de fréquence du courant statorique.

En fonctionnement sain (sans défauts) du moteur, c'est évident qu'on n'observe seulement la fréquence fondamentale apparaît. Ainsi que, aucune raie latérale de part et d'autre de la raie du fondamental (**Fig 5.b**).

D'après les figures (**Fig. 5.c**) Quand la **MAS** fonctionne en mode défectueux de type rupture de barre, on observe l'apparition des raies latérales au voisinage du fondamental ($f_s=50$ Hz), ces raies correspondant approximativement aux fréquences, données par l'expression $f_{calculée}=(1\pm 2g) f_s$.

Pour mettre plus en évidence ce phénomène, on a augmenté la somme et le nombre des barres cassées (2 barres cassé), on observe une augmentation importante des raies latérales de fréquence et leurs amplitudes. Comparativement aux défauts d'une barre cassée.

Donc l'amplitude de ces raies croit en fonction de l'augmentation de nombre de barres défectueuses. De ce fait on peut affirmer, que l'analyse du courant statorique est la méthode la plus fiable pour la détection des cassures de barres.

Dans les deux tableaux ci-dessous (**TABLE II et III**), on a résumé les fréquences des harmoniques induites dans les courants statoriques déduite et calculer suite à un défaut de barres (une et deux barres cassées). Ces fréquences sont calculées de la formule $f_{i,j}=(1\pm 2g) f_s$ pour $k=1,2$ et 3, et déduites avec l'allure de FFT directement.

TABLE II. FRÉQUENCES CALCULÉES ET DEDUITES, CAS DE DÉFAILLIANCE D'UNE BARRE ROTORIQUE

$g=5.916\%$, $f_s=50\text{Hz}$	$(1-6g) f_s$	$(1-4g) f_s$	$(1-2g) f_s$	$(1+2g) f_s$	$(1+4g) f_s$	$(1+6g) f_s$
f calculée (Hz)	32.252	38.168	44.084	55.916	61.832	67.748
f déduite (Hz)	32.43	38.29	44.14	55.86	61.71	67.57
Amplitude (dB)	-93.32	-57.05	-29.88	-38.76	-74.26	-115

TABLE III. FREQUENCES CALCULEES ET DEDUITES, CAS DE
DEFAILLANCE DE DEUX BARRES (1 ET 2).

$g=6.383\%$, $f_s=50\text{Hz}$	$(1-6g)$ f_s	$(1-4g)$ f_s	$(1-2g)$ f_s	$(1+2g)$ f_s	$(1+4g)$ f_s	$(1+6g)$ f_s
f calculée (Hz)	30.851	37.234	43.617	56.383	62.766	69.149
f déduite (Hz)	31	37.29	43.71	56.29	62.57	69
Amplitude (dB)	-70.81	-41.94	-21.97	-31.48	-61.07	-95.92

Selon ces tableaux, on remarque que les fréquences $(1\pm 2g).f_s$ des raies latérales extraites au niveau des courbes de l'analyse spectrale FFT correspondent aux valeurs spectrales théoriques (calculées) de ces fréquences. Ainsi, on constate que les raies de défaut de deux barres (la première et la deuxième barre) augmentent plus que défaut à une seule barre cassée, ce dernier est plus illustré surtout à l'harmonique $(1\pm 6g).f_s$ que au défaut d'une seule barre est très petite qui on ne peut être vu, par contre au défaut de deux barres il est très claire.

VI. CONCLUSION

Dans cet article, nous avons étudié la faisabilité de la détection de défaut de cassure de barres rotorique dans une machine asynchrone par analyse spectrale FFT (Fast Fourier Transform) des courants statoriques. Afin de représenter le comportement de la machine, lors d'un fonctionnement normal (état sain) et avec défaut, nous avons utilisé un modèle mathématique multi-enroulement pour la cage rotorique. Le choix d'un tel modèle nous est imposé par l'objectif de pouvoir simuler une rupture de barre au rotor. Pour cela, nous avons cherché à simuler complètement les barres du rotor. Ce modèle est pratique en ce sens que l'introduction du défaut se réduit à une simple augmentation de la résistance de la barre dont on veut simuler la rupture.

Le défaut considéré c'est la cassure des barres rotorique dans le but de montrer l'effet de nombre des ruptures de barres sur le comportement de la MAS. La rupture de la barre entraîne une modulation de l'enveloppe du courant de phase statorique et des oscillations dans le couple et la vitesse rotorique, ses oscillations sont proportionnelles au nombre des barres cassées. Ensuite, nous avons traité ces signaux par état de l'analyse spectrale pour le but de détecter et de quantifier la valeur des défauts survenue sur la partie rotorique de la machine. Les résultats obtenus montrent que la FFT peut indiquer la présence du défaut.

REFERENCES

- [1] M. R. W. Group, « Report of Large Reliability Survey of Industrial and Commercial Installations, Part I and II », *Trans. Ind. Appl. IEEE*, vol. 21, n° 4, 1985.
- [2] O. Ondel, E. Boutleux, et G. Clerc, « A method to detect broken bars in induction machine using pattern recognition techniques », *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 42, no 4, p. 916–923, 2006.
- [3] A. Abed, « Contribution à l'étude et au diagnostic de la machine asynchrone », PhD Thesis, Nancy I, 2002.
- [4] L. Baghli, « Modélisation et commande de la machine asynchrone », *IUFM Lorraine-UHP*, vol. 20, 2005.
- [5] R. Kechida et A. Menacer, « DWT wavelet transform for the rotor bars faults detection in induction motor », in *Electric Power and Energy Conversion Systems (EPECS), 2011 2nd International Conference on*, 2011, p. 1–5.
- [6] A. Menacer, R. Kechida, G. Champenois, et S. Tnani, « Application of the Fourier and the wavelet transform for the fault detection in induction motors at the startup electromagnetic torque », in *Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics & Drives (SDEMPED), 2011 IEEE International Symposium on*, 2011, p. 664–668.
- [7] A. Bouzida, O. Touhami, R. Ibtouen, A. Belouchrani, M. Fadel, et A. Rezzoug, « Fault diagnosis in industrial induction machines through discrete wavelet transform », *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 58, n° 9, p. 4385–4395, 2011.