

AMÉLIORATIONS DE L'ANALYSE SPECTRALE DU COURANT STATORIQUE APPLIQUÉES AU DIAGNOSTIC DES DÉFAUTS DE ROULEMENTS À BILLES

Ahmed Hamida BOUDINAR, Mohamed KHODJA, Fatima BELHADJ, Nouredine BENOZZA

Laboratoire de Développement des Entraînements Electriques « L.D.E.E », Groupe Diagnostic
Université des Sciences et de la Technologie d'Oran MB, USTO, Département d'Électrotechnique.
BP 1505, El M'naouar Oran, Algérie.

Abstract- Early detection of abnormalities in the motor will help avoid expensive failure. It has been shown that bearing faults can be detected by several methods. This paper deals with the application of spectral analysis of stator current to detect bearing faults. To improve this technique, we add an anti-aliasing filter and located band frequencies of component faulty. In fact in these band frequencies the maximum amplitude represents the bearing faults. Experimental results are presented to illustrate the merits of the proposed improvements.

Keywords: Induction motor/ fault detection/ Bearing/ Anti-aliasing filter/ Spectral analysis/stator current.

Résumé- De nombreux travaux ont été consacrés au diagnostic des défauts de roulements à billes, vu leurs importances et leurs effets direct sur l'apparition d'autres types de défaillances au niveau des moteurs. Pour cette raison, diagnostiquer ce type de défauts dès leurs apparitions (défauts naissants) est primordial pour augmenter la durée de vie de cette machine. Dans cet article, et afin de rendre l'analyse spectrale du courant statorique plus lisible, donc un diagnostic plus fiable, nous proposons deux solutions. La première au niveau de la chaîne d'acquisition par l'utilisation d'un filtre anti-repliement et la seconde par l'élaboration d'un algorithme de détection et de localisation des maxima sur une bande fréquentielle donnée. Les résultats expérimentaux obtenus, montrent l'intérêt et l'efficacité des améliorations proposées.

Mots clés: Moteur asynchrone/ Diagnostic/ Défauts/ Roulements/ Analyse Spectrale/ Courant statorique/ Filtre anti-repliement.

Nomenclature :

DSP	Densité Spectrale de Puissance
FAR	Filtre Anti-repliement
f_a	Fréquence d'alimentation (50 Hz)
f_r	Fréquence rotorique mesurée par le tachymètre.
f_v	Fréquence vibratoire
$f_{bague, ext}$	Fréquence vibratoire caractéristique du défaut de la bague externe.
$f_{bague, int}$	Fréquence vibratoire caractéristique du défaut de la bague interne.
f_{cage}	Fréquence vibratoire caractéristique du défaut de la cage.
f_{billes}	Fréquence vibratoire caractéristique du défaut des billes.
$i_a(t), i_b(t), i_c(t)$	Courants des lignes « phase a, b et c »
I_a, I_b, I_c	Spectres des courants de lignes
I_{sd}	Spectre de la composante directe
D_c	Diamètre de la cage
D_b	Diamètre des billes

1. INTRODUCTION

Avec le développement que connaît l'humanité dans divers secteurs et la nécessité accrue à la consommation et à la transformation d'énergie électrique, le contrôle et la fiabilité des convertisseurs d'énergie plus spécialement les moteurs sont devenus des conditions très importantes et nécessaires dans beaucoup d'applications. En effet, un arrêt inattendu de ces convertisseurs, pourrait avoir des conséquences gravissimes voir vitales dans certains services critiques tels que le médical, le transport, ou pendant des opérations militaires. Dans le secteur industriel ces pannes peuvent provoquer l'arrêt de toute la chaîne de production et peut affecter la sécurité des personnes, la qualité du service et par conséquent des pertes financières énormes [1]. Parmi les principaux organes qui constituent la grande majorité des machines électriques nous citons les roulements à billes. Ils sont responsables de la conversion d'énergie jouant ainsi le rôle d'interface électromécanique. Malheureusement, ce rôle les rend plus fragiles. En effet, une étude de fiabilité conduite sur un grand nombre de moteurs asynchrones de grandes puissances de l'industrie pétrochimique, a établi une statistique des différents défauts qui peuvent survenir; il a été constaté que les défauts de roulement sont les défauts les plus fréquents dans les machines asynchrones (plus de 52%) [2].

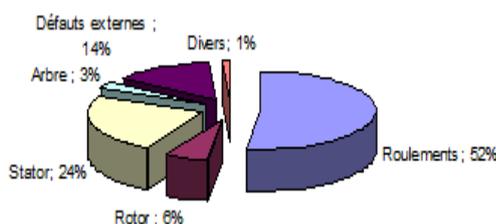


Fig 1: Répartition des différents défauts dans un moteur asynchrone.

La plus part des défauts de roulement agissent sur la forme géométrique par des ondulations de surface des éléments roulants, par des fissures dans les deux bagues « interne et externe » ou par des détériorations des cages. Une autre étude statistique, effectuée cette fois-ci par la compagnie "General Electric" et publiée dans *EPRI* (Electric Power Research Institute) en 1982 [3] « où elle couvre environ 5000 moteurs, dont 97% étaient des moteurs asynchrones triphasés à cage », montre que plus de 39% des défauts de roulements se situent aux niveaux des bagues.

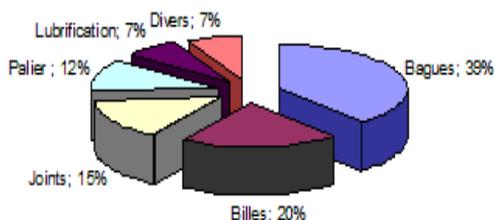


Fig 2 : Répartition des différents défauts dans un Roulement à billes.

Afin de diagnostiquer tous ces défauts, plusieurs techniques ont été développées, selon le type de la grandeur physique choisie. Parmi ces techniques, l'analyse du courant statorique est une approche très prometteuse, vu que ses principaux atouts résident dans l'instrumentation employée, la facilité de sa mise en œuvre ainsi que la richesse de l'information fournit sur l'existence ou non du défaut et de sa sévérité. Par ailleurs, plusieurs méthodes de traitement du signal ont été élaborées pour le diagnostic de ces machines. Les plus utilisées dans le domaine industriel sont les méthodes basées sur l'estimation de la Densité Spectrale de Puissance (*DSP*) par la méthode du périodogramme [4, 5].

Cependant, la *DSP* présente plusieurs inconvénients qui sont dus essentiellement au problème de résolution fréquentielle et de la fenêtre de pondération choisie. En effet, pour bien analyser un spectre, on a intérêt à avoir un

lobe principal aussi étroit que possible et des lobes secondaires aussi faibles que possible, chose impossible à réaliser en même temps par cette méthode [5]. De plus, la richesse du spectre du courant statorique n'implique pas que tous les harmoniques reflètent l'état du moteur. Certains harmoniques peuvent par exemple représenter des parasites électromagnétiques qui n'ont pas été correctement filtrés lors de l'acquisition du courant.

Dans cet article nous allons donc présenter deux améliorations apportées au diagnostic des défauts de roulements. La première consiste à la réalisation d'un filtre anti-repliement (*FAR*) et ainsi voir son impact sur la fiabilité de l'analyse du courant statorique. La deuxième solution concerne l'amélioration apportée à la lisibilité du spectre du courant par l'ajout au calcul de la *DSP* d'un algorithme de localisation des maxima sur une bande fréquentielle déterminée.

2. DIAGNOSTIC DES DEFAUTS DE ROULEMENT PAR ANALYSE SPECTRALE DU COURANT STATORIQUE

Les roulements à billes, sont les plus utilisés dans les machines électriques. Ils sont constitués principalement de la bague externe, la bague interne, les billes et la cage assurant une équidistance entre les billes. La figure 3 montre la géométrie d'un roulement à billes à contact radial.

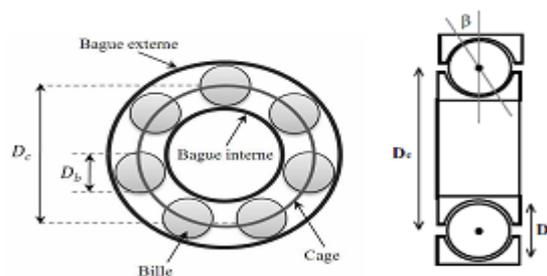


Fig 3 : Géométrie du roulement à billes

La possibilité de la détection des défauts de roulement dans les machines à induction a été largement étudiée à l'aide de la surveillance vibratoire [4, 6]. Théoriquement, plusieurs études [4, 6, 8] ont démontré que les signatures fréquentielles caractéristiques des défauts de roulements dépendent de la géométrie du roulement et de la fréquence de rotation et qui sont définies comme suit :

☞ Pour le défaut de la bague externe : $f_{bagueext} = \frac{N_b}{2} fr \left(1 - \frac{D_b}{D_c} \cos \beta \right)$ (1)

☞ Pour le défaut de la bague interne : $f_{bagueint} = \frac{N_b}{2} fr \left(1 + \frac{D_b}{D_c} \cos \beta \right)$ (2)

☞ Pour le défaut de la cage : $f_{cage} = \frac{1}{2} fr \left(1 - \frac{D_b}{D_c} \cos \beta \right)$ (3)

☞ Pour le défaut des billes : $f_{billes} = \frac{D_c}{D_b} fr \left(1 - \frac{D_b^2}{D_c^2} \cos^2 \beta \right)$ (4)

Malheureusement, la fiabilité des résultats est fortement liée à la position des accéléromètres sur les paliers selon les 03 axes « verticale, axiale et radiale ». C'est le principal inconvénient de la technique vibratoire [9]. En revanche, le suivi des courants de lignes (statoriques) s'est avéré être, et de loin, le plus intéressant, et ce, pour deux raisons:

- Il permet de diagnostiquer aussi bien les défauts électromagnétiques (déséquilibres de phase, court-circuit entre spires, excentricités d'entrefer, ruptures de barres,...) que des défauts purement mécaniques (dégradation des roulements, désalignement,...).
- Il est très facile d'accès puisqu'en général, il est déjà utilisé pour la commande du moteur et qu'il peut être mesuré directement au poste d'alimentation.

Ainsi, et en partant du principe que l'entrefer n'est plus constant lors d'une défaillance des roulements, Schoen et ses coauteurs [9, 10, 11], ont démontré que cette information est aussi présente dans le spectre du courant

statorique sous la forme d'harmoniques définis par l'expression suivante:

$$f_{roul}(Hz) = |f_a \pm k.f_v| \tag{5}$$

Où f_a est la fréquence d'alimentation (50Hz). f_v est l'une des fréquences caractéristiques des vibrations induites par les défauts définis ci-dessus c'est-à-dire $f_{bague,ext}$, $f_{bague,int}$, f_{cage} et f_{billes} . Et $k=1,2,3\dots$

3. AMELIORATIONS PROPOSEES

3.1 UTILISATION D'UN FILTRE ANTI-REPLIEMENT DANS LA CHAINE D'ACQUISITION

Les capteurs des courants statoriques (de phases) d'une machine asynchrone sont généralement placés dans un environnement électro-magnétiquement pollué. En effet, les machines et les convertisseurs statiques rayonnent des champs électromagnétiques pouvant induire des interférences, créant ainsi un bruit additif à la mesure. Dans le cas des interférences intervenant en amont du capteur, celles-ci sont soumises à la fonction de transfert interne de celui-ci ce qui peut provoquer l'apparition de certains parasites électromagnétiques au niveau du spectre du courant à cause d'un mauvais choix de la fréquence d'échantillonnage. Ce phénomène est appelé repliement spectral. Pour cette raison, afin d'éliminer ces parasites, nous avons réalisé un filtre Anti-Repliement (FAR) au niveau de la chaîne d'acquisition. Le filtre réalisé est de type passe-bas, du 4ème ordre (soit une atténuation de -80 db/décade) et de fréquence de coupure réglable. La figure 4 montre l'emplacement du FAR réalisé.

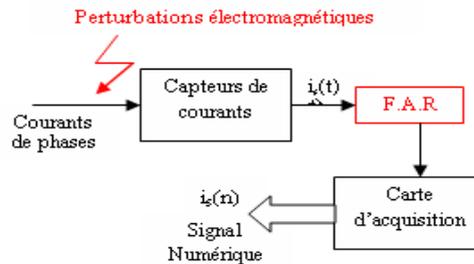


Fig 4: La chaîne d'acquisition des courants statoriques

3.2 UTILISATION D'UN ALGORITHME DE LOCALISATION DES MAXIMA.

La deuxième solution concerne l'amélioration apportée à la lisibilité du spectre du courant par l'ajout au calcul de la DSP d'un algorithme de localisation des maxima sur une bande fréquentielle déterminée. En effet, vu que le spectre du courant statorique est très riche en harmoniques et que la signature d'un défaut de roulement n'apparaît que sur une bande fréquentielle donnée (selon la nature du défaut, des dimensions du roulement et de la fréquence de rotation), l'analyse du spectre peut donc être limitée uniquement à cette bande. Par ailleurs, si ce défaut est naissant, alors sa signature en amplitude n'apparaît que légèrement supérieure aux autres harmoniques. Pour cette raison, nous avons développé un algorithme permettant de localiser numériquement l'harmonique maximum reflétant le défaut en ne traitant que la bande fréquentielle susceptible de faire apparaître sa signature (voir figure 5). Par ailleurs, dans la pratique, la signature d'un défaut existe sur les trois courants de phases. De ce fait, appliquer cette méthode sur chaque courant risque d'être pénalisant en temps de calcul. Pour cette raison, nous proposons l'analyse spectrale de la combinaison des trois courants, représentée par la composante directe I_{sd} [12].

$$I_{sd} = \frac{I_a + \alpha.I_b + \alpha^2.I_c}{3} \quad \text{« où } \alpha = e^{j\frac{2\pi}{3}} \text{ »} \tag{6}$$

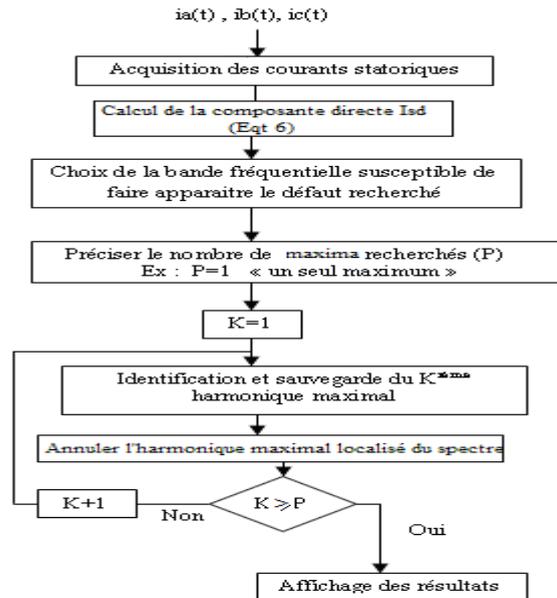


FIG 5: ALGORITHME DE LOCALISATION DES MAXIMA

4. RESULTATS EXPERIMENTAUX DU DIAGNOSTIC DES DEFAUTS DE ROULEMENTS

L’objectif de cette partie est de montrer le bien fondé des améliorations proposées ainsi que la vérification de la concordance entre les valeurs théoriques des fréquences caractéristiques des différents défauts de roulements et celles trouvées par les essais expérimentaux réalisés au niveau du laboratoire.

4.1 BANC DE MESURES ET PARAMETRES D’ACQUISITION

Les principaux essais que nous allons présenter dans cet article sont effectués par le groupe diagnostic au laboratoire LDEE du département d’électrotechnique (USTO). Le moteur utilisé dans ces essais pratiques est de type triphasé à cage d’écureuil accouplé à une génératrice à courant continu. Les paramètres du moteur sont donnés en annexe A. Le roulement diagnostiqué de notre moteur est de type à billes de référence 6205-ZZ (coté opposé accouplement), dont les différents paramètres géométriques sont donnés en annexe B. Les défauts traités sont créés artificiellement par perçage, dans le but d’avoir les mêmes situations que ceux des défauts réels. La figure 6 illustre les défauts créés dans les roulements employés dans nos essais expérimentaux.



Fig 6: a) Défaut de cage, b) Défaut de bague externe « 3mm », c) Défaut de bague externe « 6mm »

La chaîne de mesures comporte deux capteurs de courant à effet hall, d’un filtre Anti-repliement à fréquence de coupure réglable « pour nos tests, on a choisi 400 Hz » et d’une carte d’acquisition. L’ensemble est relié à un ordinateur pour la visualisation et le traitement des signaux acquis comme c’est illustré par la figure 7. De plus, un tachymètre est utilisé pour mesurer la vitesse de rotation réelle de notre moteur.



Fig 7: Photo du banc d'essai réalisé

Toutes les acquisitions ont été réalisées en régime permanent nominal « Soit un couple estimé d'environ 20 N.m » sur une durée de 40 secondes avec une fréquence d'échantillonnage de 1.5 KHz, soit une résolution fréquentielle égale à 0.025 Hz. Les différents modes de fonctionnement réalisés pour valider la procédure de diagnostic sont::

- Fonctionnement du moteur avec des roulements sains.
- Fonctionnement du moteur avec un défaut de la cage.
- Fonctionnement du moteur avec un défaut de la bague externe « diamètre du trou de 3 mm ».
- Fonctionnement du moteur avec un défaut de la bague externe « diamètre du trou de 6 mm »

Pour avoir une analyse plus fiable, vue le caractère aléatoire des signaux mesurés, plusieurs acquisitions ont été effectuées pour chaque mode de fonctionnement.

4.2 FONCTIONNEMENT AVEC DES ROULEMENTS SAINS

Dans cette première étape nous allons analyser le courant statoriques dans le cas où les deux roulements (coté accouplement et coté opposé à l'accouplement) sont sans déféctuosité apparente. Cette analyse sera considérée comme la référence de tous les tests prochains.

☞ Améliorations apportées par le FAR :

L'analyse spectrale du courant statorique filtré par le système réalisé « FAR », nous permet de voir clairement les améliorations que peut faire apparaître cette solution au traitement. En effet on voit d'après la figure 8, que le courant analysé sans filtrage présente un harmonique à la position 21,73Hz dont l'amplitude est de -39.53dB alors qu'avec le filtrage ce dernier est fortement atténué ce qui démontre que cet harmonique n'est qu'une perturbation électromagnétique qui est apparue à cause du repliement spectrale. Par contre les autres fréquences représentant l'état du moteur (fondamental, excentricités...), ne sont pas touchées par l'opération de filtrage.

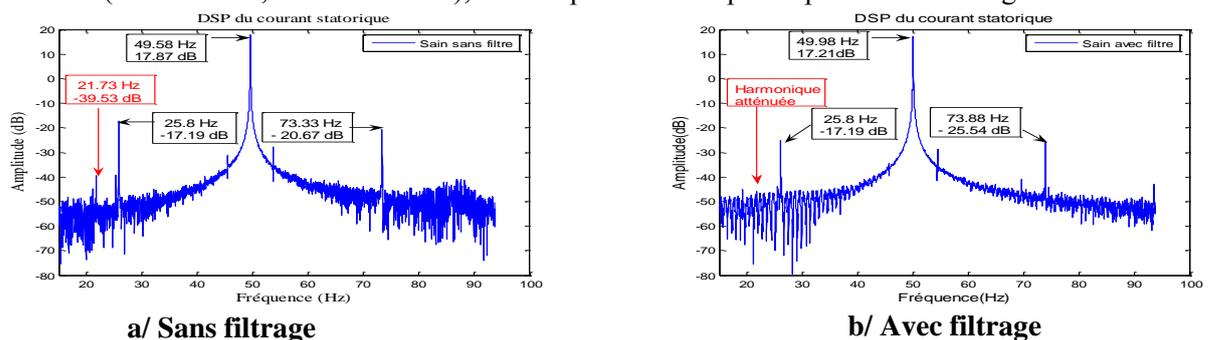
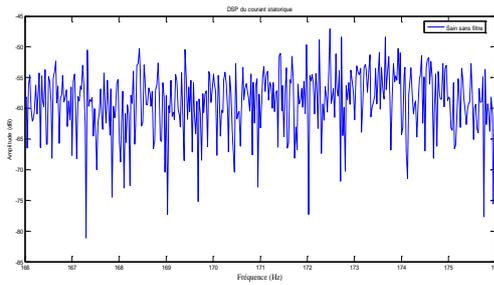
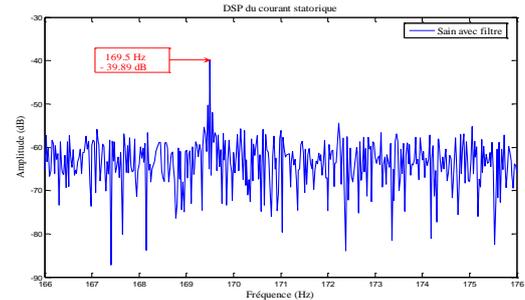


Fig 8: Effet du FAR sur l'atténuation des perturbations transitoires (Moteur sain)

D'un autre coté le FAR permet aussi d'atténuer l'effet de bruit, ce qui permet de rehausser les harmoniques porteurs d'informations sur l'état du système comme le montre la figure 9. En effet, le bruit moyen sans filtre est de -60dB par contre avec le filtre il est de -65dB, ce qui a permis de rendre l'harmonique de 169.5 Hz plus lisible.



a/ Sans filtrage



b/ Avec Filtrage

Fig 9 : Effet du FAR sur l'atténuation du bruit (Moteur sain).

Après avoir démontré l'apport positif du filtre anti-repliement, passant maintenant au diagnostic des défauts de roulements. Théoriquement, la signature fréquentielle d'un défaut de cage ou de la bague externe est déterminé selon les paramètres géométriques du roulement (voir annexe B) et en se basant sur les équations (1), (3) et (5). Le tableau suivant représente les fréquences des harmoniques de chaque défaut susceptible d'apparaître sur le spectre du courant.

Signature fréquentielle	$f_r=23.69 \text{ Hz}$ et $k=1$	
	Cage	Bague externe
	40.5 Hz	34.66 Hz
	59.4 Hz	134.6 Hz

Tableau 1 : Fréquences caractéristiques théoriques des défauts de roulement « A charge nominale »

Où : f_r est la fréquence de rotation mesurée par le tachymètre.

A partir de ce tableau, on peut dire que la bande fréquentielle susceptible d'apporter des informations sur l'existence ou pas du défaut de cage ou de bague externe peut être limitée à [32Hz 42Hz]. C'est sur cette bande fréquentielle que la recherche de la signature du défaut sera effectuée.

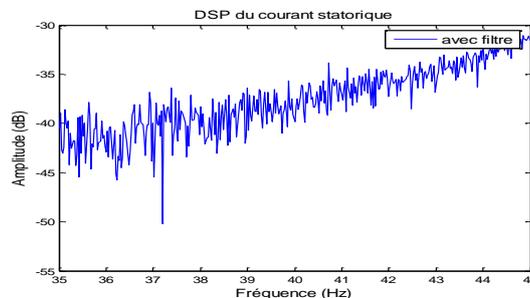


Fig 10 Spectre du courant statorique du moteur sain avec roulements sains

L'analyse du courant statorique sur la bande fréquentielle choisie (figure 10) montre qu'aucun harmonique particulier ne se détache du spectre pouvant faire dire qu'il y a un défaut de roulement à billes

4.3 FONCTIONNEMENT AVEC UN DEFAUT DE LA CAGE.

L'analyse spectrale du courant statorique montre qu'un harmonique se détache du reste de l'étendu spectrale à la fréquence 39.93Hz (figure 11) comparativement au spectre du moteur sain (figure 10). Cet harmonique obtenu expérimentalement démontre l'existence du défaut de la cage du roulement d'après les calculs théoriques obtenus dans le Tableau 1. Cette légère différence (39.93 Hz au lieu de 40.5 Hz) est due à la résolution fréquentielle et à l'erreur de mesure de la fréquence de rotation.

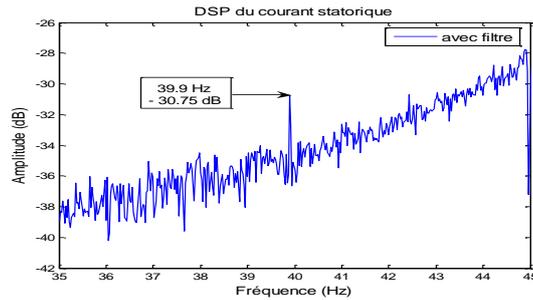


Fig 11: Spectre du courant statorique du moteur avec défaut de cage

Par ailleurs et afin d'améliorer la lisibilité du spectre, on applique l'algorithme proposé permettant d'afficher l'harmonique maximal censé représenter la signature du défaut recherché.

☞ **Amélioration de la lisibilité du spectre par l'algorithme de recherche des maxima**

D'après la figure 11, on remarque que l'harmonique maximal sur la bande fréquentielle [32Hz 42Hz] est à la fréquence 39.93 Hz pour une charge nominale. Cela confirme l'existence du défaut de la cage et la performance de l'algorithme proposé. Cette amélioration du traitement permet une meilleure lisibilité du spectre et une rapidité dans la décision car on peut affirmer directement si l'harmonique obtenu représente la signature du défaut recherché ou pas sans faire de zooms successifs.

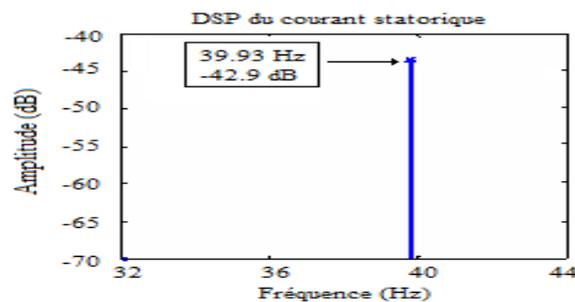


Fig 12: Spectre du courant statorique du moteur avec défaut de cage

4.4 FONCTIONNEMENT AVEC UN DEFAUT DE LA BAGUE EXTERNE.

D'après la figure 13, on remarque que la signature du défaut de la bague externe apparaît à la même fréquence « 35.8Hz à charge nominale » indépendamment du diamètre du trou ce qui démontre les résultats obtenus théoriquement (Tableau1). Par contre, l'amplitude de l'harmonique « cas du trou de 6mm » est plus importante que celle du 3 mm. Ce qui nous permet de suivre l'évolution de la sévérité du défaut.

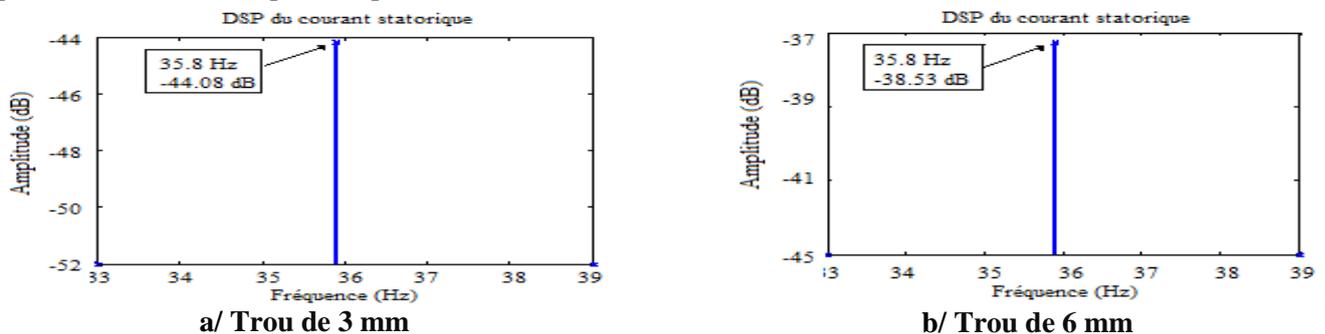


Fig 13 : Spectre du courant statorique du moteur avec défaut de la bague externe

5. CONCLUSION

Dans cet article, nous avons présenté l'effet positif du filtre anti-repliement réalisé sur l'amélioration du traitement et de l'analyse du courant statorique sur un cas réel, celui du diagnostic des défauts de roulements d'un moteur asynchrone à cage d'écureuil. En effet, nous avons remarqué que cette solution a permis d'éliminer certaines perturbations en plus de la minimisation de l'effet du bruit de mesures. Concernant la deuxième solution, celle de l'algorithme de la localisation des maxima, elle nous a largement facilité la lisibilité et donc l'analyse du spectre du courant. Ces deux solutions, nous ont permis de vérifier la concordance entre les signatures fréquentielles des défauts de roulements obtenues expérimentalement et celles calculées théoriquement.

6. REFERENCES

- [1] H.A. Toliyat, S. Nandi, S. Choi and H. Meshgin-Kelm, Electric machines. Modeling, condition monitoring and fault diagnosis. CRC Press and Taylor & Francis Group edition 2012.
- [2] O.V. Thorsen and M. Dalva. Failure Identification and Analysis for High Voltage Induction Motors in the Petrochemical Industry. IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 35(no. 4), July-Aug 1999. pp. 810-818,
- [3] EPRI, Improved motors for utility applications final report publication. EL-2678, vol1. 1, 1763-1, EPRI, October 1982
- [4] B. Trajin, Détection automatique et diagnostic des défauts de roulement dans une machine asynchrone par analyse spectrale des courants statoriques Université de Toulouse ; LAPLACE ; CNRS, INPT, UPS. JCGE'08 LYON, 16 et 17 December 2008.
- [5] A.F. Aimer, A.H. Boudinar A. Bendiabdellah et C. Mokhtar, Effet du fenetrage sur la résolution de la DSP et son apport dans le diagnostic des défauts rotoriques du moteur asynchrone. International Conference On Industrial Engineering and Manufacturing ICIEM'10, May, 9-10, 2010, Batna, Algeria
- [6] Wei Zhou, Incipient Bearing Fault Detection for Electric Machines Using Stator Current Noise Cancellation. A Dissertation Presented to The Academic Faculty, In Partial Fulfillment Of the Requirements for the Degree Doctor of Philosophy in the School of Electrical and Computer Engineering, Georgia Institute of Technology December 2007. chap.2, pp.27.
- [7] Jee-Hoon Jung, Jong-Jae Lee, and Bong-Hwan Kwon, Online Diagnosis of Induction Motors Using MCSA. IEEE Transactions On Industrial Electronics, Vol. 53, No. 6, DECEMBER 2006. pp. 1842-1852.
- [8] N. Mehala, R. Dahiya Motor Current Signature Analysis and its Applications in Induction Motor Fault Diagnosis. International journal of systems applications, engineering and development, volume 2, issue 1, 2007.
- [9] R. Schoen, T. G. Habetler, F. Kamran, and R. G. Bartheld, Motor bearing damage detection using stator current monitoring. IEEE Transaction on Industry Applications, Vol. 31, N° 6, pp 1274 – 279, Nov-Dec 1995.
- [10] R. Schoen and T. Habetler, A new method of current-based condition monitoring in induction machines operating under arbitrary load conditions. Proc. International Conference on Electrical Machines (ICEM), September 1994, Paris, France.
- [11] J. Cusido, J. Rosero, E. Aldabas, J. A. Ortega and L. Romeral New Fault Detection Techniques for Induction Motors, Asea Brown Boveri, Barcelona, Spain; Universitat Politècnica de Catalunya, Spain; electrical power quality and utilization, magazine vol. 2, pp.39-46, No. 1, 2006 .
- [12] A.H.Boudinar, A.Bendiabdellah, N.Benouzza, N.Boughanmi. Three phase induction motor incipient rotor's faults detection Based on Improved Root-MUSIC approach. International Review of Electrical Engineering, May-June 2007 Vol. 2, N°3 pp 406-413.

ANNEXE A

Puissance nominale	3kW
Fréquence d'alimentation	50 Hz
Tension nominale	380 V
Courant nominal	7 A
Vitesse rotorique	1440 trs/min
Nombre de barres rotoriques	28
Nombre d'encoches statoriques	36
Facteur de puissance $\cos\phi$	0.83
Nombre de Paire de pôles	2

ANNEXE B

Paramètres géométriques du roulement à bille diagnostiquer « Référence 6205-ZZ coté opposé accouplement » :	
Diamètre de la bague externe	52 mm
Diamètre de la bague interne	25mm
Diamètre de cage	38.5 mm
Diamètre de bille approximer à	7.938 mm
Nombre de billes N_b	9 billes.
L'angle de contact β est supposé égal à zéro	