

## Application de la technique des ondelettes au diagnostic de défauts de la machine asynchrone à rotor à cage

Ahcene Bouzida <sup>1\*</sup>, Omar Touhami <sup>1</sup> et Radia Abdelli <sup>2†</sup>

<sup>1</sup> Ecole Nationale Polytechnique, El Harrach, 16200 Algiers, Algeria

<sup>2</sup> Université A. Mira, Targa Ouzemour (Taghzouit), 06000 Béjaia, Algeria

(reçu le 14 Février 2014 – accepté le 30 Décembre 2014)

**Résumé** - Ce papier présente une application de la technique des ondelettes dans le domaine du diagnostic de défauts de la machine asynchrone à rotor à cage. Dans ce travail, la technique des ondelettes est utilisée pour détecter la rupture des barres rotoriques et les portions d'anneau de court-circuit. La détection est basée sur le fait que n'importe quelle rupture au niveau du rotor induit une déformation dans la FMM de l'entrefer qui se traduit par des composantes supplémentaires dans les courants statoriques. La technique est validée sur des signaux expérimentaux obtenus à partir des machines asynchrones à cage défectueuses.

**Abstract** – This article presents wavelets technique application in the field of in the field of fault diagnosis of the asynchronous machine rotor cage. In this work, the wavelets technique is used for detecting the rupture of the rotor bars and the short-circuit ring portions. The detection is based on the fact that any rotor rupture induces a deformation in the air gap of the DMF resulting in additional components in the stator currents. The technique is validated according to experimental signals obtained from asynchronous machines defective cage.

**Mots clés:** Diagnostic des défauts - Machines asynchrones - Cassure de barres - Transformée en ondelette - Décomposition en multi-niveau – Energies.

### 1. INTRODUCTION

Il est évident que ces moteurs conduisent à porter une attention de plus en plus sérieuse, quant à leur fonctionnement et à leur disponibilité. En effet, l'apparition d'un défaut conduit le plus souvent à un arrêt irrémédiable de la machine asynchrone entraînant, en conséquence, un coût de réparation non négligeable pour l'entreprise (cas des machines de forte puissance) sans oublier la perte de production occasionnée. Dans le domaine nucléaire, par exemple, il est indispensable d'assurer la sécurité des personnes et du matériel car aucun système, qu'il soit simple ou complexe, n'est à l'abri d'un dysfonctionnement. Dans cet article, un diagnostic par la technique des ondelettes est effectué et validé par des résultats expérimentaux [1, 2].

### 2. TECHNIQUES DES ONDELETTES [3, 4]

Une ondelette  $\psi(t)$  est une fonction de moyenne nulle:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \psi(t) dt = 0$$

Cette dernière est dilatée avec un paramètre d'échelle  $s$ , et translatée par  $u$  :

---

\* bouzida.umbb@gmail.com

† abdelli\_radia@yahoo.fr

$$\Psi_{u,s}(t) = \frac{1}{\sqrt{s}} \psi(t - u / s)$$

La transformée en ondelettes continue (TOC) utilise des ondelettes dont l'enveloppe rétrécit avec l'échelle, tandis que le nombre d'oscillations reste constant. En effet l'opération de changement d'échelle de facteur  $s$  est équivalente à une homothétie du paramètre  $u$  sur l'axe des temps de  $1/s$  sur celui des amplitudes. Dans ce cas, on obtient une largeur de bande qui augmente avec la fréquence, avec une résolution fréquentielle relative constante [5].

La transformée en ondelettes de la fonction  $f$  à l'échelle  $s$  et la position  $u$  est calculée en corrélant  $f$  avec un atome d'ondelette:

$$Wf(u,s) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \frac{1}{\sqrt{s}} \psi(t - u / s) dt$$

La transformée en ondelettes a donc une résolution temps fréquence qui dépend de l'échelle  $s$ , sous la condition:

$$C_{\psi} = \int_0^{+\infty} \frac{|\hat{\psi}(\omega)|^2}{\omega} d\omega < +\infty$$

La transformée en ondelettes discrète est issue de la version continue, à la différence de cette dernière, la TOD utilise un facteur d'échelle et une translation discrétisée. On appelle transformée en ondelettes discrète dyadique toute base d'ondelettes travaillant avec un facteur d'échelle  $s = i/2$  [6]. L'analyse en multi-résolution permet d'analyser un signal en différentes bandes de fréquences, ce qui permet une vue de la plus fine à la plus grossière.

Soit  $\phi$  la fonction échelle. Elle doit être dans  $L^2$  et ayant une moyenne non nulle.

On forme une base de fonctions d'échelle pour tout  $i \in \mathbb{Z}$  comme suit:

$$\phi_{i,j}(t) = 2^{-i/2} \phi(2^{-i}t - j)$$

Et de la même manière, la base d'ondelette est

$$\psi_{i,j}(t) = 2^{-i/2} \psi(2^{-i}t - j)$$

Le facteur d'échelle dyadique mène à:

$$\phi(t) = \sum_j 2h(j) \phi(2t - j) \quad \psi(t) = \sum_j 2g(j) \phi(2t - j)$$

Les équations précédentes représentent la décomposition de la fonction échelle et de l'ondelette en combinaisons linéaires de la fonction échelle à la haute résolution directement.

On note que  $h(j)$  et  $g(j)$  sont les filtres passe bas et passe haut respectivement lors d'une décomposition par ondelettes.

## 2.1 Algorithme de Mallat

Cet algorithme est schématisé par la structure suivante:

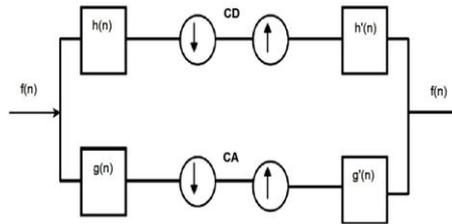


Fig. 1: Algorithme de Mallat unidimensionnel

### 2.2 Algorithme de Mallat

L'algorithme de Mallat permet de décomposer le signal  $f(n)$  en plusieurs niveaux comme illustré:

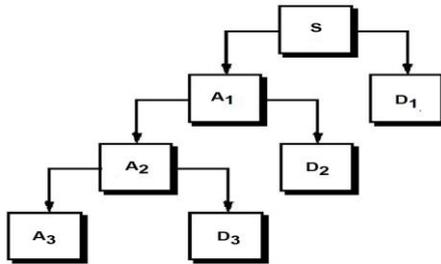


Fig. 2: Décomposition en multi-niveaux

Nous obtiendrons  $2^l$  bandes de fréquence chacune avec la même largeur de bande [7, 8]:

$$\left[ \frac{(i-1) f_n}{2}, \frac{i f_n}{2} \right] \quad i = 1, 2, \dots, 2^l$$

Telle que  $f_n$  est la fréquence de Nyquist dans la bande  $i$  de fréquence. Lorsque  $h(n)$  et  $g(n)$  sont les filtres de décomposition de  $f(n)$  dans  $D_1$  et  $A_1$  respectivement. Le prochain (en second lieu) niveau de décomposition est basé sur  $A_1$  et les coefficients sont exprimés comme suit:

$$A_2(n) = \sum_k h(k-2n) A_1(k)$$

$$D_2(n) = \sum_k g(k-2n) A_1(k)$$

Quand le défaut des barres rotoriques, portion d'anneau de court-circuit, court-circuits au niveau des enroulements statoriques du moteur asynchrone apparaît, l'information de défaut du signal du courant statorique est incluse dans chaque bande de fréquence résultante de la décomposition en ondelettes ou en paquet d'ondelettes.

En calculant l'énergie associée à chaque niveau ou à chaque nœud de décomposition, on peut construire un outil de diagnostic très efficace. La valeur propre d'énergie de chaque bande de fréquence est définie, [8, 9]:

$$E_j = \sum_{k=1}^{k=n} |D_{j,k}(n)|^2$$

Où  $j$  est le niveau de décomposition. Basé sur la valeur propre d'énergie, le vecteur est donné par:

$$T = \left[ \frac{E_0}{E}, \frac{E_1}{E}, \frac{E_2}{E}, \dots, \frac{E_{2^m-1}}{E} \right]$$

Tel que:

$$E = \sum_{j=0}^{2^m-1} |E_j|^2$$

### 3. RESULTATS EXPERIMENTAUX

Pour la validation de la technique des ondelettes par des signaux expérimentaux, nous avons réalisé un système d'acquisition qui permet de relever les différents signaux et dans le but de couvrir la majorité des défauts rotoriques, et nous avons utilisé quatre machines asynchrones ayant les caractéristiques suivantes.

**Table 1:** Caractéristiques principales

Puissance nominale	4 kW
Tension nominale	220 / 380 V
Courant nominal	15.3 / 8.83 A
Vitesse nominale	1435 tr/mn

Les quatre machines sont construites pour les besoins de diagnostic avec des défauts rotoriques comme suit:

- Machine saine pour l'utilisation de leurs signaux comme référence pour la détection des différents défauts.
- Machine avec une barre rotorique cassée.
- Machine avec deux barres rotoriques cassées en adjacence.
- Machine avec une portion d'anneau de court-circuit enlevée.



Fig. 3: Rotor avec une barre rotorique cassée

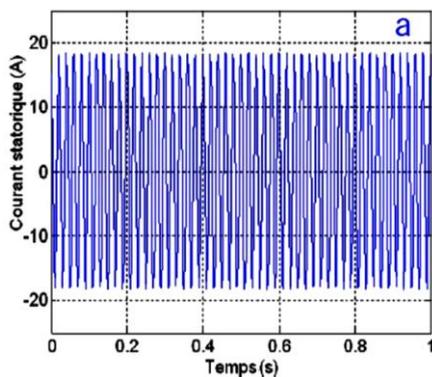


Fig. 4: Rotor avec deux barres rotoriques cassées

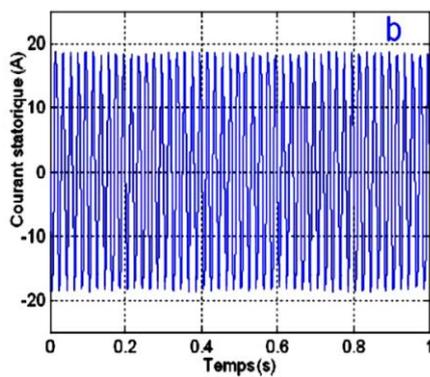


Fig. 5: Rotor avec une portion d'anneau de court-circuit cassée

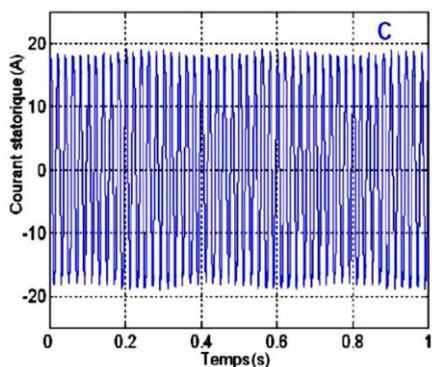
● Courants statoriques enregistrés



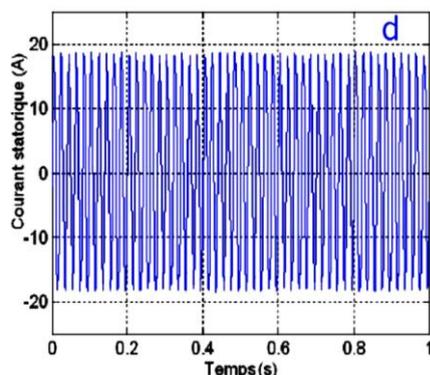
a- Machine saine



b- Machine avec une barre cassée



c- Machine avec deux barres cassées



d- Machine avec une portion d'anneau de court-circuit enlevée

Fig. 6: Courants statoriques en régime permanent

La décomposition en multi-niveaux du courant statorique est réalisée à l'aide de l'ondelette mère 'Daubechies', le niveau de décomposition nécessaire est calculé d'après la relation suivante [10-11]:

$$n_{Ls} = \text{int} \left( \frac{\log(f_s/f)}{\log(2)} \right)$$

Avec,  $f$ , fréquence du réseau,  $f_s$ , fréquence d'échantillonnage. Connaissant  $f = 50$  Hz et  $f_s = 10$  kHz, on peut calculer le nombre de décompositions appropriés:

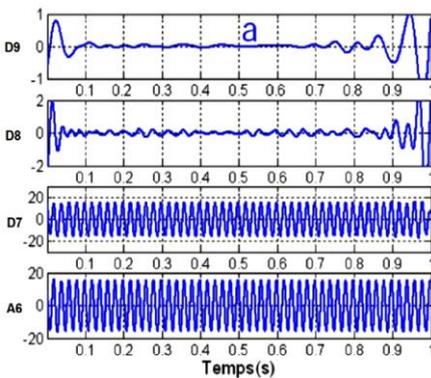
$$n_{Ls} + 2 = \text{int} \left( \frac{\log(10^4 / 50)}{\log(2)} \right) + 2 = \text{int} (7.6439) + 2 = 9 \text{ niveaux}$$

Le **Tableau 2** indique les différentes bandes de fréquence obtenues par la décomposition en ondelettes discrète.

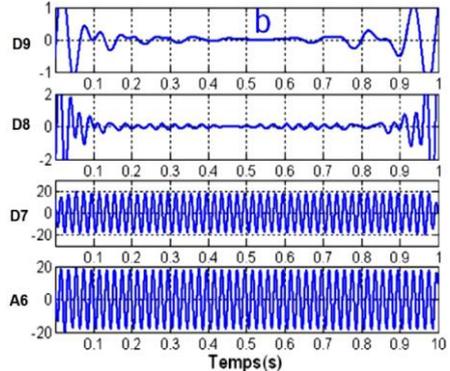
**Table 2:** Bandes de fréquences résultantes de la décomposition en multi-niveaux

Niveau	Approximations	Détails
<b>J = 1</b>	A1 0 – 5000	D1 5000 – 10000
<b>J = 2</b>	A2 0 – 2500	D2 2500 – 5000
<b>J = 3</b>	A3 0 – 1250	D3 1250 – 2500
<b>J = 4</b>	A4 0 – 625	D4 625 – 1250
<b>J = 5</b>	A5 0 – 312.50	D5 312.50 - 625
<b>J = 6</b>	A6 0 – 156.25	D6 156.25 – 312.5
<b>J = 7</b>	A7 0 – 78.125	D7 78.125 – 156.25
<b>J = 8</b>	A8 0 – 39.0625	D8 39.0625 – 78.125
<b>J = 9</b>	A9 0 – 19.5313	D9 19.53 – 39.0625

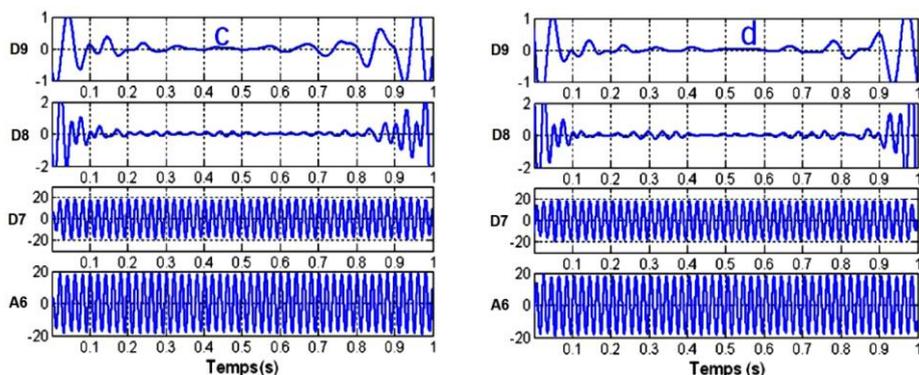
La figure 7 représente les signaux de détail et d'approximation (D9, D8, D7 et A6) obtenus par la décomposition en multi-niveau du courant statorique.



a- Machine saine



b- Machine avec une barre cassée

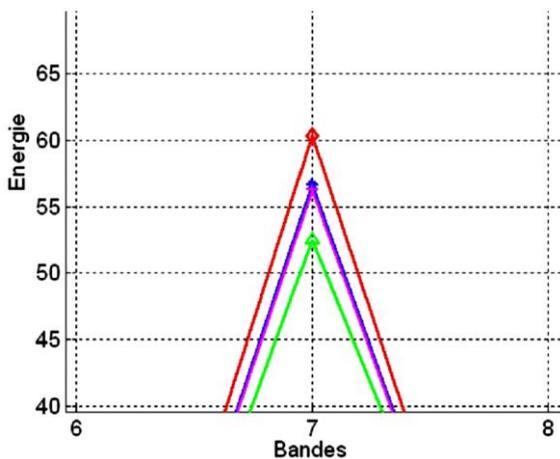


c- Machine avec deux barres cassées

d- Machine avec une portion d'anneau enlevée

Fig. 7: Approximations et détails obtenus par l'ondelette **db44**

Le calcul de l'énergie relative associée à chaque niveau de décomposition nous permet de différencier également la machine saine de celles défectueuses. Les figures 8, 9 et 10 indiquent la variation de cette énergie dans les quatre machines avec différents ordres de l'ondelette mère.

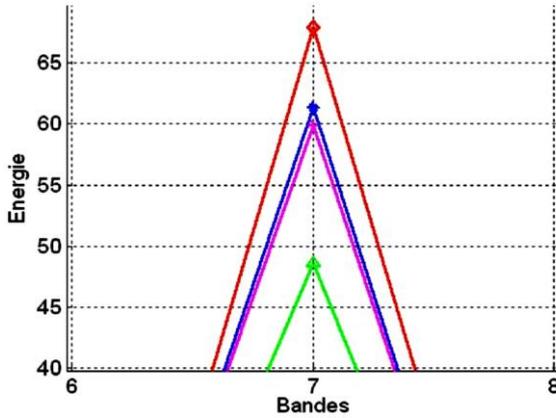


-△- : Machine saine, -+ : Machine avec une barre cassée, -◇- : Machine avec deux barres cassées, -\* : Machine avec une portion d'anneau enlevée

Fig. 8: Variation de l'énergie dans les bandes de fréquence 'db6'

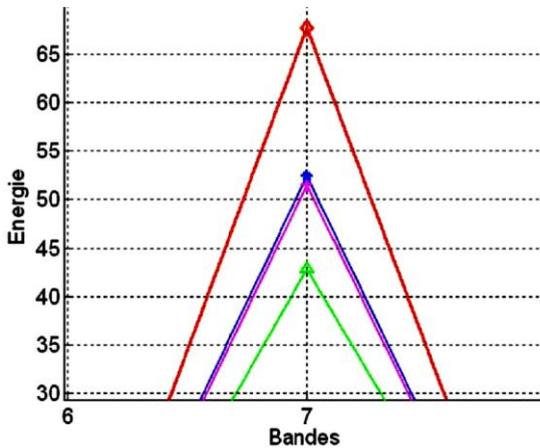
Le calcul de l'énergie emmagasinée dans chaque niveau de décomposition confirme l'augmentation observée dans les signaux de détail et d'approximation et surtout dans le niveau 7 qui correspond à la bande qui se trouve au voisinage et au-dessous du fondamental.

On voit clairement l'effet de défaut rotorique sur l'énergie emmagasinée dans le niveau 7. Cette augmentation diffère selon le signal, qui augmente par rapport à celle de la machine saine d'une façon égale (55 %).



-△- : Machine saine, -+- : Machine avec une barre cassée, -◇- : Machine avec deux barres cassées, -\*- : Machine avec une portion d'anneau enlevée

Fig. 9: Variation de l'énergie dans les bandes de fréquence 'db6'



-△- : Machine saine, -+- : Machine avec une barre cassée, -◇- : Machine avec deux barres cassées, -\*- : Machine avec une portion d'anneau enlevée

Fig. 10: Variation de l'énergie dans les bandes de fréquence 'db6'

L'énergie dans le cas d'une rupture de deux barres rotoriques augmente d'une façon remarquable par rapport au cas de la machine saine et même pour les deux autres machines, type de défaut, dans les deux cas de cassure d'une barre et de portion d'anneau rotoriques.

#### 4. CONCLUSIONS

Dans ce travail, une des applications physiques basées sur la transformée en ondelettes pour le diagnostic des défauts de rupture des barres rotoriques, rupture des portions d'anneau de court-circuit de la machine asynchrone à cage d'écurieil est

présentée, validée et optimisée. Le diagnostic est basé sur l'analyse des signaux à niveau élevé obtenus à partir de la décomposition en ondelettes du signal du courant statorique.

L'approche est concentrée sur l'étude des signaux d'approximation et de détail résultants de la décomposition en multi-niveaux qui contiennent les informations des défauts. Ces signaux permettent la détection de l'évolution des harmoniques caractéristiques liées à la rupture pendant le fonctionnement en charge.

## REFERENCES

- [1] G. Didier, '*Modélisation et Diagnostic de la Machine Asynchrone en Présence de Défaillances*', Thèse de Doctorat en Génie Electrique, Université Henri Poincaré, Nancy I., 2004.
- [2] T. Boumegoura, '*Recherche de Signature Electromagnétique des Défauts dans une Machine Asynchrone et Synthèse d'Observateurs en Vue du Diagnostic*', Thèse de Doctorat, Ecole Doctorale Electronique, Electrotechnique, Automatisme de Lyon, 2001.
- [3] S.G. Mallat, '*A Wavelet Tour of Signal Processing*', Second Edition, Academic Press, 637 p., 1999.
- [4] A.N. Akansu and R.A. Haddad, '*Multiresolution Signal Decomposition, Transforms, Subbands and Wavelets*', Second Edition, New Jersey, Institute of Technology Newark, N.J, Academic Press, 2001.
- [5] E. Hitti, '*Sélection d'un Banc Optimal de Filtrés à Partir d'une Décomposition en Paquets d'Ondelettes. Application à la Détection de Sauts de Fréquences dans des Signaux Multicomposants*', Thèse de Doctorat, Ecole Centrale de Nantes, 1999.
- [6] R. Benzid, '*Ondelettes et Statistiques d'Ordre Supérieur Appliquées aux Signaux Uni et Bidimensionnels*', Thèse Doctorat, Faculté des Sciences de l'Ingénieur, Université de Batna, 2005.
- [7] K. Abbaszadeh, J. Milimonfared, M. Haji and H.A. Toliyat, '*Broken Bar Detection in Induction Motor via Wavelet Transformation*', IEEE Industrial Electronics Society, Vol. 1, pp. 95 - 99, 2001.
- [8] C. Zhitong, C. Hongping, H. Guoguang and E. Ritchie, '*Rotor Fault Diagnosis of Induction Motor based on Wavelet Reconstruction*', IEEE, Proceedings of the Fifth International Conference on Electrical Machines and Systems, ICEMS 2001, Vol. 1, pp. 374 - 377, 2001.
- [9] T. Liu and J. Huang, '*A Novel Method for Induction Motors Stator Interturn Short Circuit Fault Diagnosis by Wavelet Packet Analysis*', IEEE, Electrical Machines and Systems, Vol. 3, pp. 2254 - 2258, 2005.
- [10] J.A. Daviu, M. Riera-Guasp, J.R. Folch, F. Martínez-Giménez and A. Peris, '*Application and Optimization of the Discrete Wavelet Transform for the Detection of Broken Rotor Bars in Induction Machines*', Applied and Computational Harmonics Analysis, Vol. 21, N°2, pp. 268 - 279, 2006.
- [11] J.A.A. Daviu, M. Riera-Guasp, J.R. Folch, M.P.M. Palomares, '*Validation of a New Method for the Diagnosis of Rotor Bar Failures via Wavelet Transform in Industrial Induction Machines*', IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 42, N°4, pp. 990 - 996, 2006.