HAL
open science

Capteur Intelligent pour la Surveillance d'éoliennes par l'Analyse Spectrale à haute résolution

Saad Chakkor, Mostafa Baghouri, Abderrahmane Hajraoui

To cite this version:

Saad Chakkor, Mostafa Baghouri, Abderrahmane Hajraoui. Capteur Intelligent pour la Surveillance d'éoliennes par l'Analyse Spectrale à haute résolution. Modélisation et Simulation Numérique Méthode des éléments finis, Ondelettes Traitement du Signal et de l'Image, ENSA de Kénitra, Jun 2012, ENSA de Kénitra Maroc, Maroc. pp.19-32. hal-01120797

HAL Id: hal-01120797

https://inria.hal.science/hal-01120797v1

Submitted on 26 Feb 2015

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial 4.0 International License

Capteur Intelligent pour la Surveillance d'éoliennes par l'Analyse Spectrale à haute résolution

[1]Chakkor Saad, [2]Baghouri Mostafa, [3]Hajraoui Abderrahmane
Laboratoire Systèmes de détection et de communication, Département de physique,
Faculté des sciences, Université Abdelmalek Essaâdi,
Tétouan, Maroc
[1]saadchakkor@gmail.com, [2]baghouri.mostafa@gmail.com, [3]ad_hajraoui@hotmail.com

Résumé — L'énergie électrique éolienne a connu un grand essor vu la multiplication des parcs éoliens et leur exploitation dans l'approvisionnement du réseau électrique national avec un faible coût et des propres ressources. Les machines éoliennes nécessitent périodiquement certaines maintenances afin d'assurer une durée de vie acceptable.
Notre but est de concevoir une architecture de télésurveillance et de diagnostic de défaillances (fatigue mécanique des roulements, engrenages de variateur de vitesse, cassures…) basée sur l'utilisation d'un capteur intelligent comme un véritable système embarqué autonome intégrant une technique d'analyse spectrale à haute résolution de la signature du courant statorique du générateur de l'éolienne, ayant pour rôle de cerner l'apparition d'éventuelles raies caractérisant les défauts.
On présente dans cet article, une étude de conception de ce capteur intelligent, on montre les limitations de la méthode d'estimation de la Densité Spectrale de Puissance DSP et on propose l'application de la méthode d'estimation du spectre de raies à haute résolution de Pisarenko vu qu'elle présente une grande robustesse au bruit de mesures et une résolution fréquentielle acceptée.

Mots clés : capteur intelligent; diagnostic; télésurveillance; courant statorique; analyse spectrale; éolienne, Pisarenko.

I. INTRODUCTION

L'arrêt d'une installation pour des opérations de maintenance non prévues (casse, défaillances) entraine des coûts très importants. Cette perte d'exploitation devient critique pour l'entreprise.

Certes, le domaine de l'énergie éolienne est un marché où les besoins en maintenance conditionnelle sont importants, et où les applications présentent des conditions particulières (chaîne cinématique complexe pour la surveillance et conditions de fonctionnement aléatoires, conditions sévères d'utilisation en termes d'accessibilité).

Il s'agit dans ce travail de développer une architecture centralisée basée sur l'utilisation des capteurs intelligents permettant de surveiller en temps réel l'état de santé d'une machine éolienne (collecter les mesures, diagnostiquer et signaler une éventuelle panne ou un disfonctionnement de la machine), sous des conditions de fonctionnement variables, afin de mettre en place une maintenance proactive.

L'architecture proposée fait appel à une méthode de traitement du signal robuste et performante de Pisarenko pour la détection de défauts, à des lois de commande. Elle permet de fusionner les données de différents capteurs et d'intégrer le système de surveillance développé dans l'équipement afin de le rendre autonome et intelligent.

II. DESCRIPTION DE L'ARCHITECTURE DE SURVEILLANCE :

La structure centralisée du système de supervision et de télémaintenance d'un parc éolien proposée peut être décrite comme le montre la figure suivante :

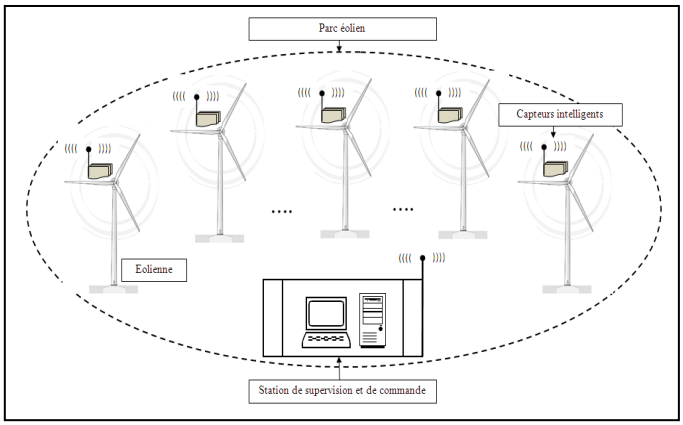


Figure 1. La structure de système de supervision d'un parc éolien

Chaque centrale éolienne est munie d'un ensemble de capteurs intelligents : un capteur du courant statorique du générateur et un capteur de vitesse du vent, qui informent la station de surveillance de l'état de santé de différents paramètres d'éolienne. Ces capteurs intelligents, transmettent via une communication sans fil des mesures en temps réel en collaborant d'un côté avec le serveur de la station de supervision et de commande et de l'autre côté avec l'automate

de la centrale. Le serveur permet la gestion et l'exploitation de la base de données des prélèvements reçus de différentes centrales éoliennes dans le but de prendre une décision ou d'appliquer une commande à l'aide des algorithmes de diagnostic avertissant le personnel de maintenance de l'imminence ou de la présence d'un défaut sur le système éolien. En fonction du type de défaut et de son importance, il faudra procéder à l'arrêt de l'éolienne pour une phase de maintenance préventive ou de décider que le défaut est mineur et d'autoriser le fonctionnement de l'éolienne en présence de ce défaut.

III. MACHINE EOLIENNE A VITESSE VARIABLE :

On peut considérer trois composants essentiels dans une éolienne, le rotor, la nacelle et la tour, comme illustré sur la figure pour une machine de type « amont » :

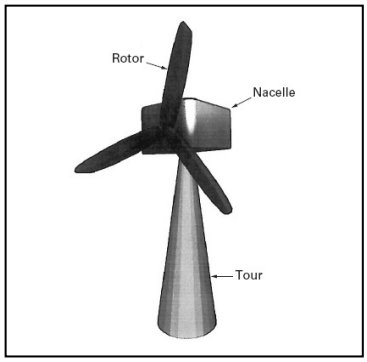


Figure 2. Les composants d'une éolienne

L'éolienne à vitesse variable connectée au réseau est composée d'une turbine, un multiplicateur de vitesse, un générateur, un convertisseur de puissance. D'autres éléments comme des filtres et des capacités de compensation réactive sont aussi ajoutés pour améliorer la qualité de l'énergie produite. Les transformateurs assurent l'adaptation de la tension au point de connexion de l'éolienne avec le réseau. La partie électrique de l'éolienne, en général, se constitue d'un générateur électrique synchrone ou asynchrone [12], [14].

La figure suivante montre les constituants d'une éolienne à vitesse variable, elle se compose de deux parties :

- Partie mécanique I.
- Partie électrique II.

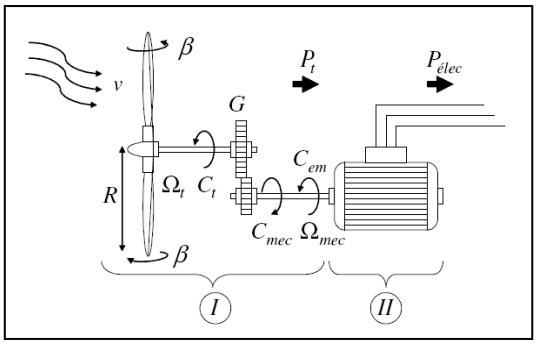


Figure 3. Constituants de nacelle d'une éolienne

Sur l'arbre de l'éolienne il y a la turbine, le multiplicateur de vitesse et le rotor du générateur. La turbine éolienne se compose de plusieurs pales fixes ou orientables. 80% des fabricants fabriquent des turbines tripales pour des raisons de stabilité, de poids et de fluctuations mécaniques. La turbine éolienne, en général, tourne à une vitesse nominale de 25 à 40 (tr/min). Le multiplicateur adapte la vitesse de la turbine éolienne à celle du générateur électrique qui tourne à environ 1500 (tr/min). L'élasticité et le frottement des pales avec l'air sont ignorés.

C_p : Coefficient de puissance caractérisant la turbine éolienne.
β : L'angle de calage des pales.
Ω_t : Vitesse angulaire mécanique (*rad/s* mécanique) de la turbine.
***v* :** Vitesse du vent (*m/s*).
ρ : Densité de l'air à la pression atmosphérique à une température T.
R : Rayon de la turbine = longueur de pale en (*m*).
G : Rapport de multiplication (-).
C_{mec} : Couple mécanique sur l'axe du générateur en (*N.m*).
Ω_{mec} : Vitesse du générateur (*rad/s* mécanique).
P_t : Puissance de la turbine.
$P_{élec}$: Puissance électrique produite.

IV. STRATEGIE DE SURVEILLANCE DE L'EOLIENNE :

L'éolienne se constitue d'un système mécanique de transmission de mouvement : le multiplicateur de vitesse qui sert à élever la vitesse de rotation entre l'arbre primaire et l'arbre secondaire qui entraîne la génératrice électrique [12].

Dans la mesure où les billes du roulement supportent le rotor, chaque défaut de roulements produira un mouvement radial du rotor par rapport au stator.

Ce déplacement mécanique conduit à une modification de la répartition de l'induction au sein de la machine, ces variations génèrent alors des courants statoriques.

Pour contrôler l'état de santé du système mécanique de la machine et par conséquent éviter son arrêt brusque, on propose la mise en application d'une technique de diagnostic qui se base sur l'analyse de la signature du courant statorique avec la méthode de haute résolution de Pisarenko, ayant pour rôle de cerner l'apparition d'éventuelles raies caractérisant les défauts. Ce diagnostic sera établi sur la base d'une comparaison entre les mesures effectuées et un signal de référence (sain) [10].

De l'autre côté, lorsque la vitesse du vent est trop élevée, les centrales éoliennes doivent être mises hors service afin d'éviter tout dommage : les pales sont mises en drapeau et le rotor est maintenu à l'arrêt par un frein mécanique.

En cas d'orage ou de coup de vent, des avertissements préalables permettent de diminuer les risques.

Pour mener à bien la gestion de démarrage de la machine lorsque la vitesse du vent est suffisante (de l'ordre de 5 m/s), gérer le pas des pales, le freinage de la machine, l'orientation de l'ensemble {rotor + nacelle} face au vent de manière à

maximiser la récupération d'énergie et réduire les efforts instationnaires sur l'installation, on met en application un capteur intelligent anémomètre qui fournie des données sur la vitesse du vent et sa direction et collabore avec l'automate pour gérer le freinage. La figure suivante montre la stratégie de supervision proposée :

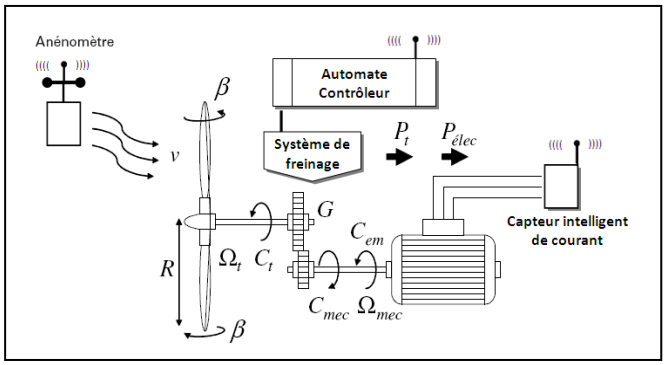


Figure 4. La stratégie de supervision

Afin de rendre le système de surveillance autonome et intelligent on propose d'intégrer la technique d'analyse du spectre du courant statorique dans le capteur intelligent de courant.

V. CAPTEUR INTELLIGENT :

Un capteur intelligent est un appareil électronique de prélèvement d'information d'une grandeur physique sous forme d'un signal électrique, son intelligence réside dans sa capacité de vérification du bon déroulement d'un algorithme de métrologie, sa participation à la commande du système en intégrant des fonctions de commande-régulation, à la sécurité du système en offrant des possibilités d'alarme, à l'exploitation du système en diffusant des informations relatives à sa maintenance telles que la date du dernier entretien… La figure suivante donne les constituants d'un capteur intelligent [2,19] :

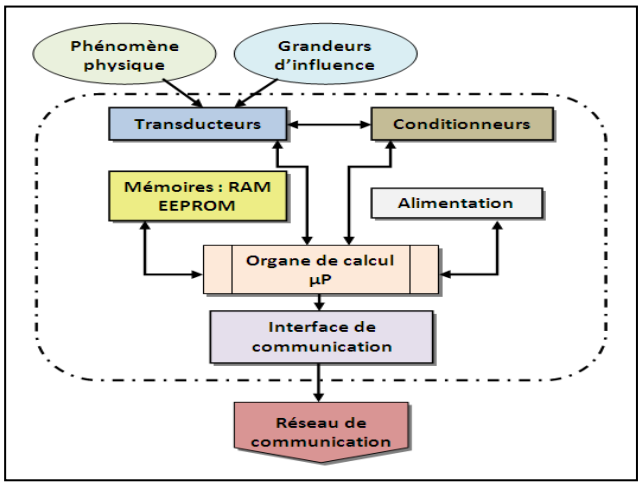


Figure 5. Architecture matérielle générique d'un capteur intelligent

VI. METHODE DE PISARENKO :

Considérons l'observation réelle à temps discret :

$$x(t) = s(t,a) + b(t),\ t \in Z \qquad (1)$$

qui est la somme d'une suite aléatoire s(t,a), centré, représentant le signal dont on veut estimer le paramètre vectoriel a, et d'un bruit b(t) de variance σ^2 .

On note par :

$$R_{ss}(\tau) = E(s(t+\tau,a)s(t,a)) \qquad (2)$$

La fonction d'auto-covariance de s(t, a).

On note R_s, R_b et R_x les matrices de covariance N×N des vecteurs aléatoires obtenus en empilant respectivement N instants consécutifs de s(t, a), de b(t) et de x(t). Ainsi, puisque s(t, a) est centré, R_s s'écrit :

$$R_s = \begin{bmatrix} R_{ss}(0) & \cdots & R_{ss}(N-1) \\ \vdots & & \vdots \\ R_{ss}(-N+1) & \cdots & R_{ss}(0) \end{bmatrix} \qquad (3)$$

$R_{ss}(\tau)$ étant paire, la matrice R_s est symétrique. Pour le bruit b(t) supposé blanc, on a :

$$R_b = \sigma^2 I \qquad (4)$$

Où I désigne la matrice identité de taille N.
En développant E(x(t+τ)x(t)) et en utilisant la non-corrélation de s(t,a) et de b(t), on obtient pour la fonction d'auto covariance de x(t) :

$$\begin{aligned} R_{xx}(\tau) &= E(s(t+\tau)s(t)) + E(b(t+\tau)b(t)) \\ &= R_{ss}(\tau) + R_{bb}(\tau) \end{aligned} \qquad (5)$$

Par conséquent :

$$\begin{cases} R_{xx}(\tau) = R_{ss}(\tau) + \sigma^2\delta(\tau) \\ R_x = R_s + \sigma^2 I \end{cases} \qquad (6)$$

En multipliant les deux membres de l'équation (6) par un vecteur propre v de R_s de vecteur propre associée λ, on obtient :

$$R_b = \sigma^2 I \qquad (7)$$

Par conséquent, tout vecteur propre de R_s est un vecteur propre de R_x associé à la valeur propre $\lambda + \sigma^2 \geq \sigma^2$, puisqu'on a $\lambda \geq 0$ (comme R_s est une matrice de covariance, ses vecteurs propres sont positifs).
On peut montrer facilement que :

$$R_{ss}(\tau) = \frac{A^2}{2}\cos(2\pi f_0 \tau) = R_{ss}(0)\cos(2\pi f_0 \tau) \qquad (8)$$

Par conséquent, on a pour tout τ :

$$R_{ss}(\tau) - 2z_0 R_{ss}(\tau-1) + R_{ss}(\tau-2) = 0 \qquad (9)$$

$$z_0 = \cos(2\pi f_0)$$

En faisant τ=0, 1, 2 on en déduit que la matrice :

$$R_s = \begin{bmatrix} R_{ss}(0) & R_{ss}(-1) & R_{ss}(-2) \\ R_{ss}(1) & R_{ss}(0) & R_{ss}(-1) \\ R_{ss}(2) & R_{ss}(1) & R_{ss}(0) \end{bmatrix} \quad (10)$$

Vérifie R_s a = 0 où a =$[1\ -2z_0\ 1]^T$ a pour composantes les coefficients de l'équation récurrente associée aux fréquences du signal s(t). Comme R_s a = 0, le vecteur a est le vecteur propre de la matrice R_x associé à sa plus petite valeur propre.

Si le modèle du signal s(t) est le mélange de P sinusoïdes réelles à phases aléatoires uniformes et indépendantes, le vecteur propre associé à la plus petite valeur propre de la matrice de covariance d'ordre (2P+1) de l'observation a pour composantes les coefficients de l'équation récurrente associé aux fréquences du signal s(t). On en déduit un algorithme de mesure des fréquences :

A. En utilisant la méthode de covariance, on estime la matrice R_x d'ordre (2P+1) à partir d'un enregistrement de taille T.
B. On calcule la décomposition propre de R_x. On en déduit le vecteur propre v associé à sa plus petite valeur propre.
C. On construit à partir de v le polynôme A(z) de degrés 2P. On extrait ses racines $z_k = e^{2j\pi f_k}$ dont on déduit les fréquences f_k.

On profite du fait que ces racines sont a priori sur le cercle unité. Il suffit donc de calculer le polynôme A(z) sur le cercle unité, ce qui se fait par le calcul de la FFT appliquée à ses coefficients sur un grand nombre de points. Puis de chercher les minima (à cause du bruit on n'a pas exactement des zéros) [16].

VII. DETECTION DE DEFAUTS PAR L'ANALYSE DU COURANT STATORIQUE :

L'analyse du courant statorique (MCSA : Motor Current Signature Analysis) [17] dans le domaine fréquentiel constitue l'approche la plus étudiée et la plus utilisée, car le spectre du courant statorique obtenu consiste une source d'information importante sur les différents types de défauts pouvant apparaitre au sein du générateur du courant.

Dans cet article, on s'intéresse aux défauts de fatigue mécanique (vibration de roulements), cassure ou déformation de barres rotoriques, dissymétries dans la géométrie du rotor. En effet, ces types de défauts provoquent une modification du champ magnétique, ce qui se répercute par l'apparition des harmoniques (pics) sur le spectre du courant statorique. La signature d'un tel défaut est caractérisée comme suit :

$$f_d = f_a(1 \pm 2.k.g) \quad (11)$$

f_d : Fréquence générée par un défaut (autour du fondamental)
f_a : Fréquence des tensions d'alimentation (50Hz)
g : Le glissement et k = 1, 2, 3, ...

Suivant cette équation (11) et selon le glissement, si un défaut existe, sa signature fréquentielle sera représentée dans le spectre de raies.

Pour appliquer la méthode de haute résolution de Pisarenko, on adopte le modèle mathématique suivant [17] :

$$i_S(n) = \sum_{i=1}^{N_H} A_i\, e^{j2\pi f_i n} + b(n) \quad (12)$$

A_i , f_i Sont respectivement l'amplitude et la fréquence de la $i^{ème}$ sinusoïde complexe pour n = 0,1,2,...,N_e-1
$b(n)$: Un bruit blanc de variance σ^2.
N_H : représente le nombre des harmoniques recherchés.

On considère que le courant statorique s'écrit mathématiquement comme suit :

$$i_S(t) = I_i \sin(2.\pi.f_i t + \varphi_i) + b(t) \quad (13)$$

φ_i : est la phase de la $i^{ème}$ sinusoïde complexe.

On constate que le courant statorique est une somme de sinusoïdes reflétant les événements normaux (fondamental, fréquences d'encoches rotoriques, ...) et des événements anormaux c'est-à-dire les bruits et les défauts.

VIII. SIMULATION NUMÉRIQUE :

On a simulé le courant statorique comme suit :

$$\begin{aligned} i_s(t) = \ & A_a \sin(2\pi f_a t) + A_{d1} \sin(2\pi f_{d1} t) \\ & + A_{d2} \sin(2\pi f_{d2} t) + b(t) \end{aligned} \quad (14)$$

A_a , f_a : l'amplitude et la fréquence du fondamental.
A_{d1}, A_{d2}, f_{d1}, f_{d2} : Amplitudes et fréquences reflétant un défaut.
$b(t)$: Un bruit blanc additif.

Ce bruit modélise tous les phénomènes aléatoires parasites, comme par exemple : le bruit de mesures.
Pour représenter l'influence du bruit, on introduit le rapport signal sur bruit *RSB* suivant :

$$RSB = 10\log_{10}\left(\frac{P_s}{P_b}\right) \quad (15)$$

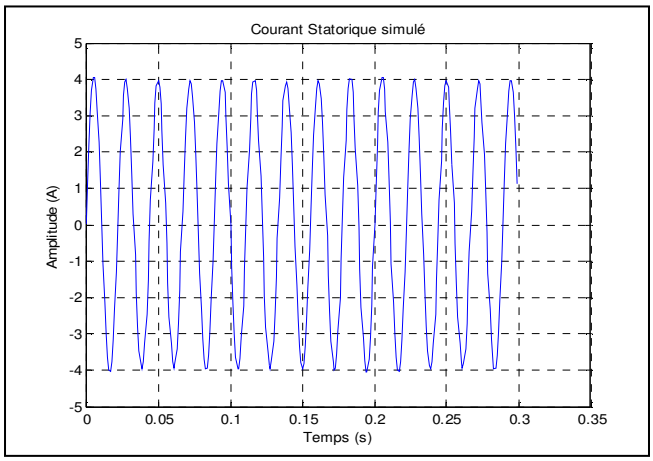
P_s, P_b Sont respectivement les puissances du signal et du bruit.
On va comparer les deux méthodes DSP et Pisarenko selon la variation du bruit. Pour cette raison, ce test est réalisé avec les paramètres suivants (Tableau I).
Le choix de ces fréquences simule un défaut rotorique d'un générateur pour un glissement de 5%.

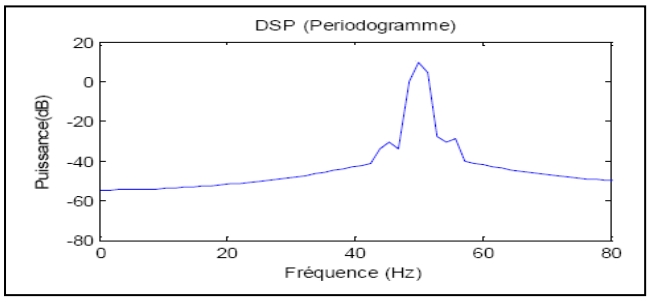
TABLE I. PARAMETRES DU SIGNAL POUR SIMULATION

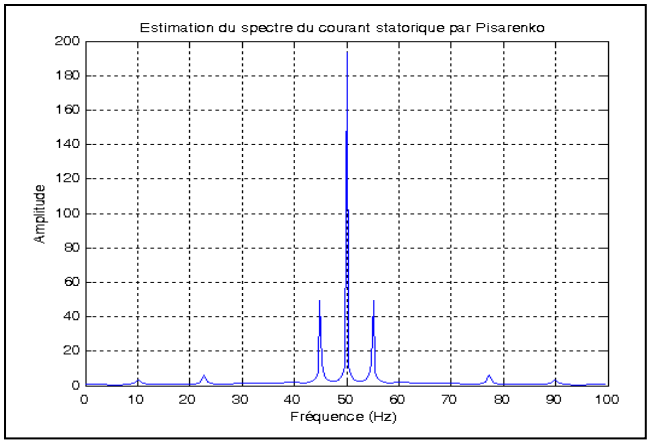
Paramètres	fondamentale	d_1	d_2
Fréquence (Hz)	50	45	55
Amplitude (A)	4	0.04	0.05
Puissance (dB)	9.03	-30.96	-29.03

Le nombre d'échantillons N= 256
d_1 : Harmonique Défaut Latéral Gauche.
d_2 : Harmonique Défaut Latéral Droite.

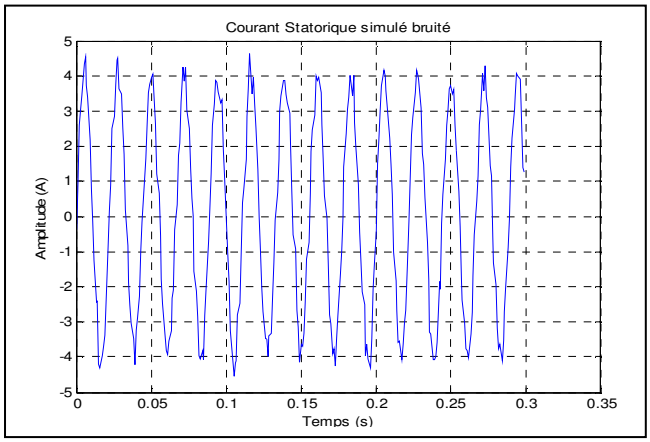
Dans les figures suivantes, les résultats de simulation du courant statorique sans bruit, RSB = 100 dB :

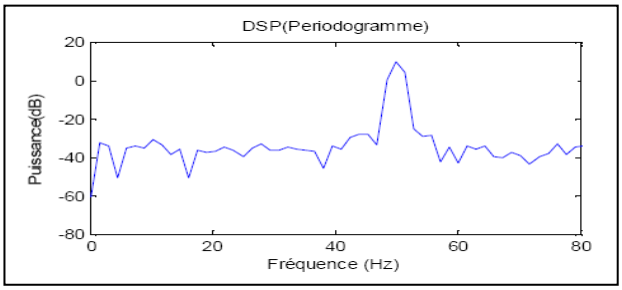






Dans le cas où le signal simulé est fortement bruité pour RSB=20 dB, on obtient les figures suivantes de simulation :





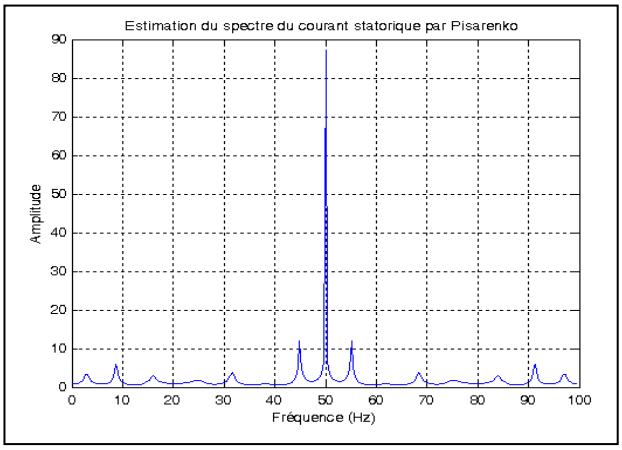


Figure 6. Périodogrammes et spectres de Pisarenko pour RSB différents

On remarque que la méthode Pisarenko arrive à localiser clairement les harmoniques recherchés et à estimer leurs amplitudes respectives même en présence de parasites.

Cependant, on constate qu'avec la DSP, l'identification des harmoniques de faibles puissances est devenue difficile voire impossible lorsque le signal est fortement bruité.

IX. CONCLUSION ET PERSPECTIVES :

La production d'énergie électrique à l'aide d'éoliennes fait appel à des besoins de télémaintenance et de surveillance, la réalisation, le développement d'outils de diagnostic, supervision, détection de défauts et de décision.

La technique DSP estimée par Périodogramme présente des limitations de détection de fréquences caractérisant les défauts, surtout en présence d'une perturbation. Par contre, on a démontré que la méthode de Pisarenko, nous a permis de localiser et d'identifier les harmoniques de faibles amplitudes même s'ils se trouvent proches du fondamental avec clarté même en présence d'un bruit gênant, ce qui nous donne la possibilité de construire un système de surveillance très performant et plus robuste. La conception de prototype d'un capteur intelligent dédié au contrôle d'éoliennes qui exploite cette méthode d'estimation spectrale à haute résolution, constitue une perspective de ce travail.

Pour évaluer ses performances et/ou ses limitations, on propose une phase d'expérimentation en site. La mise en application de cet instrument de mesure intelligent permet de libérer le personnel de maintenance de déplacement, des tâches banales et fastidieuses.

REFERENCES

[1] Randy Frank, " Understanding Smart Sensors ", Second Edition, Artech House Boston-London 2000, ISBN1-58053-398-1

[2] Mireille Bayart et al., « Capteurs et actionneurs intelligents », GT 18-4 CIAME SEE, Doc. S 7 520

[3] Damien Luttenbacher, " MODELISATION DU CONCEPT CAPTEUR INTELLIGENT PAR UNE APPROCHE ORIENTEE OBJET: APPLICATION A UN CAPTEUR INTELLIGENT DE TEMPERATURE ", Thèse de doctorat, Université Henri Poincaré Nancy 1, Ecole Supérieure des Sciences et Technologies de l'ingénieur de Nancy, 1997

[4] Mohamed Zayed, " Véhicules Intelligents : Etude et développement d'un capteur intelligent de vision pour l'attelage virtuel ", Thèse de doctorat, Université des Sciences et Technologies de Lille, LAGIS, Lille 2005

[5] F. Brissaud et D. Charpentier, " CAPTEURS INTELLIGENTS : NOUVELLES TECHNOLOGIES ET NOUVELLES PROBLEMATIQUES POUR LA SURETE DE FONCTIONNEMENT ", Maîtrise des Risques et de Sûreté de Fonctionnement, Lambda-Mu 16, Avignon : France (2008)

[6] Gilles Mauris, " CAPTEURS ULTRASONORES INTELLIGENTS ", Application à la représentation symbolique de mesures de distance par codage flou », Thèse de doctorat, L'UNIVERSITE DE SAVOIE 1992

[7] Norbert NOURY, " du signal à l'information : le capteur intelligent Exemples industriels et en médecine ", Université Joseph Fourier de Grenoble 1 Habilitation à diriger des Recherches 2002 Laboratoire des Techniques de l'Imagerie, de la Modélisation et de la Cognition (TIMC-IMA&), UMR CNR5 5525

[8] Eric GAUDREAU et al., " Pilotage réactif des systèmes de production à l'aide de capteurs intelligents ", 6ème Congrès international de génie industriel – 7-10 juin 2005 – Besançon (France)

[9] " Capteurs Intelligents ", Fiche Technologie-clé n° : 125 VERSION 3, http://www.evariste.org/100tc/1996/f125.html

[10] F. Tafinine et al., " Introduction des SVM en MCSA", Faculté des sciences et sciences de l'ingénieur, Département d'Electronique, Laboratoire (LTII) Université A/Mira Bejaia, ALGERIE

[11] E. Padiolleau et al., " Rotary machines remaining life prediction ",Centre Technique des Industries Mécaniques CETIM, 52 av Félix Louat, BP 80067, 60304 Senlis Cedex

[12] Philippe LECONTE et al., " Eoliennes ", copyright Techniques de l'Ingénieur, traité Génie mécanique, référence BM 4 640

[13] Aymen Tekaya et al., " CARACTERISATION DES PROPRIETES ELECTRODYNAMIQUE DES BILLES DE ROULEMENT PAR LA SPECTROSCOPIE D'IMPEDANCE ", Laboratoire Modélisation, Information & Systèmes (MIS) — EA4290 — Université de Picardie Jules Verne (UPJV) — 7 Rue du Moulin Neuf — 80000 Amiens

[14] Nesmat ABU-TABAK, " Stabilité dynamique des systèmes électriques multimachines : modélisation, commande, observation et simulation ", L'ÉCOLE DOCTORALE ÉLECTRONIQUE, LECTROTECHNIQUE, AUTOMATIQUE DE LYON, 2008

[15] " Projets éoliens , Qui ? Quoi ? Comment ? Combien ? ", InnoVent guide du projet éolien, Avenue Calmette, Zone d'activités Ravennes Les Francs - BP55 - 59910 Bondues, Site Internet : www.innovent.fr

[16] Gérard Blanchet et Maurice Charbit, " Traitement numérique du signal simulation sous Matlab ", Collection pédagogique de télécommunications, édition HERMES Paris.

[17] C. Mokhtar, A. H. Boudinar, A. Bendiabdellah et A. F. Aimer, "DIAGNOSTIC DES DEFAUTS DE BARRES DE LA MACHINEASYNCHRONE PAR LA METHODE ESPRIT", International Conference On Industrial Engineering and Manufacturing ICIEM'10, May, 9-10, 2010, Batna, Algeria

[18] Hubert RAZIK, "LE CONTENU SPECTRAL DU COURANT ABSORBE PAR LA MACHINE ASYNCHRONE EN CAS DE DEFAILLANCE, UN ETAT DE L'ART", La revue 3EI n°29-juin 2002 pages 48-52

[19] Elmostafa Ziani, "CONCEPTION ET REALISATION D'UN INSTRUMENT ULTRASONORE INTELLIGENT DEDIE A LA MESURE DE DEBITS D'ECOULEMENT A SURFACE LIBRE ", Thèse de doctorat en cotutelle, Université abdelmalek essaadi, Faculté des sciences et techniques de Tanger, Université de paris 13 Villetaneuse, Institut universitaire de technologie de Saint- denis 2005