

Etude comparative des techniques de traitement de signaux non-stationnaires pour le diagnostic des génératrices asynchrones d'éoliennes offshores et d'hydroliennes

El Houssin El Bouchikhi, Vincent V. Choqueuse, Mohamed Benbouzid, Jean Frédéric Charpentier

▶ **To cite this version:**

El Houssin El Bouchikhi, Vincent V. Choqueuse, Mohamed Benbouzid, Jean Frédéric Charpentier. Etude comparative des techniques de traitement de signaux non-stationnaires pour le diagnostic des génératrices asynchrones d'éoliennes offshores et d'hydroliennes. European Journal of Electrical Engineering, 2014, pp.47. hal-01077487

HAL Id: hal-01077487
https://hal.science/hal-01077487

Submitted on 23 Oct 2020

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.

Etude comparative de techniques de traitement de signaux non stationnaires pour le diagnostic des génératrices asynchrones dans les éoliennes offshores et les hydroliennes

El Houssin El Bouchikhi[*] — Vincent Choqueuse[*] — Mohamed Benbouzid[*] — Jean Frédéric Charpentier[**]

[*]*Université de Brest, EA 4325 LBMS*
Rue de Kergoat, CS 93837, 29238 Brest Cedex 03, France
El-Houssin.elbouchikhi@univ-brest.fr, {Prenom, nom}@univ-brest.fr
[**]*Ecole Navale, EA 3634 IRENav, Brest, France*
Jean-Frederic.Charpentier@ecole-navale.fr

RÉSUMÉ. *L'amélioration de la disponibilité et de la fiabilité des éoliennes offshores et des systèmes de récupération de l'énergie des courants marins implique la nécessité de minimiser et de prévoir les opérations de maintenance. En fonctionnement à vitesse variable ou en régime transitoire, des techniques de traitement du signal avancées sont requises pour réaliser la détection et le diagnostic des défaillances à partir des courants statoriques. Dans ce contexte, plusieurs études récentes ont proposé l'utilisation de techniques temps-fréquence et temps-échelle pour le diagnostic. Les techniques les plus utilisées sont : le spectrogramme, la transformée en ondelettes (scalogramme), la représentation de Wigner-Ville et la transformée de Hilbert-Huang. Cet article propose alors une étude comparative de ces techniques pour la détection de défauts survenant dans une génératrice asynchrone à cage connectée à un réseau triphasé fonctionnant en régime nominal.*

ABSTRACT. *Improvement of the reliability and availability of offshore wind and marine current turbine requires the minimization and the ability to predict maintenance operations. In variable speed operation or in transients, advanced signal processing techniques are required to detect and diagnose failures using stator currents. In this context, several recent studies have suggested the use of time-frequency and time-scale representations for that purpose. The most common techniques used are: the spectrogram, the wavelet transform, the Wigner-Ville representation, and the Hilbert-Huang transform. This paper proposes then a comparative study of these techniques for failure detection in induction generators.*

MOTS-CLÉS : *Génératrice asynchrone, signaux modulés en phase/amplitude, signaux non-stationnaires, représentations temps-fréquence/temps-échelle.*

KEYWORDS: *Induction generator, phase/amplitude modulated signals, non-stationary signals, time-frequency/time-scale representations.*

DOI:10.3166/Acronyme REVUE.volume.page1-pagefin © année Lavoisier, Paris

1. Introduction

La diminution des ressources d'énergie fossiles, ainsi que la prise de conscience politique de la nécessité de maîtriser la demande d'énergie et de diminuer le rejet des gaz à effet de serre ont favorisé la diversification des sources énergétiques. Dans ce contexte, le recours aux énergies renouvelables dans le mix énergétique devient un véritable enjeu sociétal, économique et technologique. L'accroissement de l'intérêt donné à l'énergie éolienne contribue fortement à l'expansion des parcs éoliens terrestres et offshores. Ces parcs sont généralement installés dans des lieux lointains, difficiles d'accès, soumis à des conditions environnementales extrêmes. Par conséquent, la surveillance et le diagnostic des éoliennes deviennent primordiaux pour diminuer les coûts de maintenance et assurer la continuité de la production (Faulstich *et al.,* 2010). Ce problème est d'autant plus crucial pour les systèmes hydroliens en cours de développement qui en plus de l'isolement, ont pour caractéristiques d'être immergés. C'est pourquoi notre étude menée essentiellement sur les systèmes éoliens peut s'appliquer également 'à priori' aux systèmes hydroliens.

Si les activités de recherche sur les systèmes éoliens ont conduit à une meilleure optimisation de l'efficacité et des performances des turbines et une meilleure gestion de leur énergie, la fiabilité de ces systèmes reste encore à améliorer surtout lorsqu'on s'intéresse à leur déploiement en mer. En effet, selon (Kusiak *et al*., 2010) les éoliennes terrestres présentent un taux de disponibilité très élevé de l'ordre de 95% à 99% suivant la complexité de la technologie, tandis que la disponibilité des éoliennes offshores diminue fortement suivant l'accessibilité du site d'implantation (Tableau 1). Les opérations de maintenance pour les éoliennes terrestres représentent 10% du prix total de l'énergie éolienne et sont estimées à 35% de ce prix pour les éoliennes offshores (Gray *et al.,* 2010). Vu l'état d'avancement des projets industriels à travers le monde (Benelghali *et al*., 2007), il est difficile de se projeter sur ce type de grandeurs pour les hydroliennes mais on peut légitimement supposer que ces coûts de maintenance seront au moins du même ordre de grandeur que ceux des éoliennes offshores.

Les fermes éoliennes	Distance offshore (km)	Moyenne disponibilité technique(%)		
		Années d'opération		
		1	2	3
Parcs terrestres européens	---	98.2 (moyenne)		
North Hoyle, GB, offshore	8	84.0	89.1	87.4
Scroby sands, GB, offshore	2	84.2	75.1	90.4
Kentish Flats, GB, offshore	8.5	87.0	73.5	---
Egmond aan zee, Pays-Bas, offshore	11	81.4	---	---
Barrow, GB, offshore	10	67.4	---	---

Tableau 1. *Disponibilité des parcs éoliens terrestres et offshores existant en Europe* (Kusiak *et al*., 2010)

Pour améliorer la fiabilité de ces systèmes, il est nécessaire de détecter et de caractériser les défauts de façon précoce afin d'anticiper l'arrêt définitif du système. Il est également nécessaire de distinguer les défauts conduisant à plus ou moins court terme à une panne, d'éventuelles disparités intrinsèques au système qui ne conduisent pas forcément à un arrêt des machines. Plusieurs études ont démontrées l'intérêt d'utiliser les courants statoriques pour surveiller les génératrices asynchrones et les éoliennes associées (Amirat *et al.,* 2010), (Amirat *et al.*,2009), (Thomson *et al.,* 2003). Dans les éoliennes à vitesse variable ou en régime transitoire, les outils classiques basés sur la transformée de Fourier ne permettent pas de mettre en évidence des comportements locaux non stationnaires. Pour répondre à cette problématique, plusieurs auteurs ont proposé l'utilisation de techniques de traitement du signal avancées pour la détection des défauts au niveau de la génératrice. Ces techniques incluent des outils de représentation temps-fréquence et temps-échelle aussi diverses que le spectrogramme (Cusido *et al.*, 2008), la transformée en ondelettes (Antonio-Daviu *et al.,* 2006), la représentation de Wigner-Ville (Blödt *et al.,* 2009) et la transformée de Hilbert-Huang (Antonino-Daviu *et al*., 2009). Cependant, ces études ne présentent pas les avantages et les inconvénients de chaque technique. De plus, elles n'abordent pas l'aspect complexité calculatoire, paramètre clé dans la perspective d'une implémentation temps réel dans un microprocesseur dédié.

Cet article aborde alors ces différents aspects en comparant plusieurs représentations temps-fréquence et temps-échelle pour le traitement des courants statoriques (El Bouchikhi et *al*., 2011). Les signaux de simulation typiques ont été générés sous Matlab. Ces signaux correspondent au cas de l'apparition d'oscillations de couple et d'excentricité du rotor par rapport au stator. Ces phénomènes dont l'apparition est liée à des défauts mécaniques introduisent au niveau des courants statoriques des modulations de phase et d'amplitude, respectivement, dont les caractéristiques peuvent évoluer au cours du temps (Blödt *et al.,* 2009) en particulier en régime transitoire ou en vitesse variable. Ceci rend nécessaire l'utilisation d'outils permettant de traiter et de caractériser des signaux non stationnaires. Par ailleurs, les techniques proposées sont testées en utilisant des courants statoriques issus d'un modèle de génératrice basé sur les circuits magnétiquement couplés pour la détection des défauts d'excentricité et de rupture de barres rotoriques dans une génératrice asynchrone à cage d'écureuil (El Bouchikhi et *al,* 2012).

Dans cet article les génératrices étudiées sont des génératrices asynchrones à cage directement connectées au réseau et qui représentent une portion importante des topologies d'éoliennes installées. Néanmoins, moyennant certaines précautions, l'étude peut apporter des éléments de réflexion sur des systèmes à vitesse variable (machine asynchrone à double alimentation et machine synchrone à aimants permanents).

Cet article est organisé comme suit : la section II présente les défaillances génériques d'une éolienne et leurs impacts sur les courants statoriques de la génératrice. La section III présente les techniques d'analyse spectrale stationnaires

et non stationnaires dédiées à la détection de ces défaillances. Dans la section IV, nous abordons très brièvement la modélisation d'une génératrice asynchrone en défaut pouvant équipée une éolienne ou une hydrolienne. Dans la section V, les performances des techniques proposées sont comparées pour la détection des défaillances dans une génératrice asynchrone à cage. La dernière partie conclut cet article et présente les investigations en cours.

2. DEFAILLANCES GENERIQUES DES EOLIENNES ; IMPACT SUR LES COURANTS STATORIQUES DES GENERATRICES

Tous les défauts pouvant survenir dans un système éolien (déséquilibre des pales, problème au niveau d'orientation des pales, dysfonctionnement du multiplicateur, oscillation de la nacelle, etc.) peuvent conduire à des effets génériques sur les courants statoriques de la génératrice qui peuvent être regroupées en 3 grandes catégories principales (Amirat *et al.*, 2009), (Blödt *et al*., 2009) :

- Les défauts qui entraînent une excentricité du rotor par rapport au stator : défauts de roulements, déformation du rotor ou de l'arbre, mauvais alignement, défaut de centrage ;

- Les défauts qui entraînent des oscillations de couple : défauts en tout genre de la charge mécanique, défauts de roulement ;

- Les défauts qui entraînent des perturbations de la répartition des forces magnétomotrices : défauts de court-circuit statoriques, rupture de connexions électriques au stator ou au rotor.

Dans le cadre de cet article, on s'intéresse plus particulièrement à des défauts d'oscillation du couple, d'excentricité et de rupture des barres rotoriques.

2.1 Excentricité dynamique

L'excentricité conduit à un entrefer non constant qui est fonction de l'angle à la circonférence et du temps. Dans le cas d'une excentricité dynamique, le centre de rotation du rotor est différent de son centre géométrique mais il est identique au centre géométrique du stator. Le point de minimum d'entrefer dépend de l'angle à la circonférence et du temps et n'est donc pas stationnaire contrairement au cas de l'excentricité statique.

L'excentricité dynamique entraîne une modulation d'amplitude des courants statoriques fonction du temps et de l'espace. Le courant statorique s'exprime alors sous la forme [14] (Blödt *et al*., 2009).

$$i_{am}(t) = I_1[1 + \alpha\cos(\omega_r t)]\cos(\omega_s t - \varphi_t) \quad [14]$$

Dans cette expression I_1 indique l'amplitude du courant statorique et α correspond à l'indice de modulation d'amplitude qui est proportionnel au degré d'excentricité dynamique.

Une excentricité peut conduire à une augmentation de l'oscillation du couple de charge. En effet, plusieurs simulations numériques sur les machines asynchrones ont mis en évidence cette observation dans le cas de l'excentricité statique (Dorrell, 1994) et dans le cas d'une excentricité mixte (Rusek, 1996).

2.2 Oscillation du couple de charge

Les défaillances mécaniques peuvent introduire des variations périodiques du couple de charge à une fréquence caractéristique f_c. Cette oscillation conduit à une modulation de phase du champ magnétique rotorique exprimée dans le référentiel lié au stator, tandis que le champ magnétique statorique n'est pas directement affecté. En présence d'oscillation de couple de charge, le courant statorique peut alors être exprimé sous la forme [12] (Blödt *et al*., 2005).

$$i_{pm}(t) = i_{st}(t) + i_{rt}(t) = I_{st}\sin(\omega_s t + \varphi_s) + I_{rt}\sin(\omega_s t + \beta\cos(\omega_c t)) \quad [12]$$

Où, $i_{st}(t)$ et $i_{rt}(t)$ représente, respectivement, les composantes du courant statorique résultantes du champ magnétique statorique et rotorique d'amplitude I_{st} et I_{rt}. β est l'indice de modulation qui est proportionnel à la sévérité du défaut.

2.3 Rupture des barres rotoriques

Les ruptures de barres rotoriques sont des défaillances que l'on peut encore rencontrer dans les génératrices asynchrones et qui présente une probabilité de non détection importante, du fait de l'inaccessibilité directe des grandeurs rotoriques. Ces défauts entraînent des perturbations de la répartition des forces magnétomotrices. Ainsi, la définition d'une stratégie de détection de ce type de défaut est primordiale afin d'éviter une évolution catastrophique du défaut.

3. TECHNIQUES D'ESTIMATION SPECTRALE DEDIEES AU DIAGNOSTIC DES GENERATRICES ASYNCHRONES

3.1 Techniques Stationnaires

La densité spectrale de puissance (PSD) $P_{xx}(f)$ d'un signal discret stationnaire est donnée par l'expression suivante [1] (Kay, 1998) :

$$P_{xx}(f) = \lim_{M\to\infty} E\left\{\frac{1}{2M+1}\left|\sum_{n=-M}^{M} x[n]e^{-j2\pi fn}\right|^2\right\} \quad [1]$$

Le périodogramme est un estimateur de la PSD $\hat{P}_{xx}(f)$ basé sur l'équation donnée précédemment. L'espérance mathématique est négligée et l'estimateur s'écrit sous la forme [2] :

$$\hat{P}_{xx}(f) = \frac{1}{N}\left|\sum_{n=0}^{N-1} x[n]e^{-j2\pi fn}\right|^2 \quad [2]$$

Le périodogramme est un estimateur biaisé, toutefois ce biais tend vers zéro quand le nombre d'échantillons tend vers l'infini. La variance quand à elle reste inchangée même si le nombre d'échantillons augmente (Kay *et al.*, 1981).

Pour remédier à l'inconvénient du périodogramme, le périodogramme de Welch exploite plusieurs réalisations $x_m[n]$ du même processus $x[n]$. Le périodogramme de chaque réalisation est calculé, puis la moyenne des périodogrammes est réalisée. Si K réalisations sont considérées, le périodogramme de Welch est définie par [3] :

$$\hat{P}_{av,xx}(f) = \frac{1}{K}\sum_{m=0}^{K-1} \hat{P}_{xx,m}(f) \quad [3]$$

Où $\hat{P}_{xx,m}(f)$ est le périodogramme de la m^{ème} réalisation du processus $x\,[n]$. Par rapport au périodogramme classique, la variance du périodogramme de Welch est divisée par K.

3.2 Techniques Temps-Fréquence / Temps-Echelle

Si l'analyse fréquentielle de Fourier met en œuvre deux représentations conjuguées et globales, l'une de type temporelle, et l'autre de type fréquentielle, la nature est cependant riche en signaux pour lesquels l'information utile est véhiculée non seulement par les fréquences émises mais aussi par la structure temporelle même du signal (Thirion-Moreau *et al.*, 2002). Pour les besoins de l'analyse, il est

possible d'associer, à un signal temporel ou fréquentiel, des représentations possédant simultanément les deux caractères temporel et fréquentiel. Ces représentations sont qualifiées de représentations temps-fréquence ou temps échelle. Ces représentations ne constituent pas un gain d'informations, mais plutôt une redistribution de l'information contenue dans le signal analysé de façon à en faciliter l'interprétation. Diverses méthodes permettent d'obtenir des représentations temps-fréquence ou temps-échelle possédant des propriétés et performances variées.

3.2.1 Spectrogramme

Le spectrogramme est basé sur la Transformée de Fourier à Court Terme (TFCT). La TFCT considère implicitement que l'évolution du contenu fréquentiel du signal est quasi-stationnaire sur l'étendue d'une fenêtre d'analyse. Elle divise le signal en segments courts et consécutifs, puis calcule la transformée de Fourier de chaque segment. La formulation mathématique de la TFCT est donnée par l'équation [4].

$$TFCT(t,f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(u)w^*(u-t)e^{-2j\pi fu}du \qquad [4]$$

Où $x(.)$ représente le signal temporel échantillonné, $w(.)$ est la fenêtre temporelle. Le spectrogramme est défini comme étant le carré du module de TFCT, c'est à dire $|TFCT(t,f)|^2$. La résolution en temps et en fréquence du spectrogramme est limitée par le principe d'incertitude de Heisenberg-Gabor qui stipule que l'on ne peut pas être infiniment précis en temps et en fréquence (Cohen, 1995), la formulation mathématique du principe est donnée ci-dessous [5].

$$\Delta f.\Delta t \geq \frac{1}{4\pi} \qquad [5]$$

Où Δf et Δt sont respectivement la résolution temporelle et la résolution fréquentielle (la dispersion d'énergie). Ces quantités sont définies par [6].

$$\Delta t = \sqrt{\frac{1}{E}\int (t-<t>)^2|x(t)|^2dt} \text{ et } \Delta f = \sqrt{\frac{1}{E}\int (f-<f>)^2|X(f)|^2df} \qquad [6]$$

E Étant l'énergie du signal et $<t>, <f>$ représentent respectivement, la moyenne temporelle et fréquentielle d'énergie définies par [7].

$$<t>= \frac{1}{E}\int t|x(t)|^2\,dt \qquad \text{et} \qquad <f>= \frac{1}{E}\int f|X(f)|^2\,df \qquad [7]$$

Le spectrogramme est une analyse mono-résolution. Autrement dit, la résolution est la même quelque soit la fréquence et le temps. Par ailleurs, le spectrogramme ne permet pas d'être à la fois *précis* en temps et en fréquence.

3.2.2 Scalogramme

La transformée en ondelettes permet une analyse des différentes fréquences avec diverses résolutions. Cette analyse privilégie la résolution fréquentielle en basses fréquences et la résolution temporelle en hautes fréquences. La transformation en ondelettes (TO) revient à projeter le signal à analyser sur une base de fonctions déduites par décalage temporel et dilatation/compression d'une fonction initiale réelle ou complexe appelée ondelette mère. La transformée en ondelettes continue est donnée par [8].

$$W(t,a) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \int_{-\infty}^{+\infty} x(u)\psi^* \left(\frac{u-t}{a}\right) du \qquad [8]$$

Où ψ(t) est l'ondelette mère qui doit être *passe-bande*, de moyenne nulle et a est un facteur d'échelle de la décomposition.

Le scalogramme est défini comme étant le carré du module de la TO, c'est à dire $|W(t,a)|^2$. Stricto sensu, le scalogramme est une distribution d'énergie temps-échelle (Flandrin, 1999). En considérant que les contenus temporel et fréquentiel de l'ondelette mère sont concentrés respectivement, autour de l'instant 0 et d'une fréquence f_0 appelée fréquence centrale, la transformation en ondelettes peut être interprétée comme une représentation temps-fréquence ; la variable échelle est alors liée à la fréquence f par la relation $a = \frac{f0}{f}$.

La résolution temps-fréquence du scalogramme obéit également au principe d'incertitude d'Heisenberg-Gabor. Toutefois, la résolution temporelle s'améliore et la résolution fréquentielle se dégrade avec la croissance de la fréquence. L'inconvénient majeur de la TO vient de l'absence de critères de choix sur l'ondelette mère à utiliser.

3.2.3 Distributions Temps-Fréquence Quadratiques

Pour remédier aux inconvénients des représentations précédentes (spectrogramme, scalogramme), plusieurs distributions temps-fréquence quadratiques ont été proposées (Cohen, 1989). Elles permettent une meilleure résolution temps-fréquence car leur résolution n'est pas contrainte par le principe

d'incertitude d'Heisenberg-Gabor. La distribution de Wigner-Ville (DWV), qui peut être interprétée comme étant la distribution de l'énergie en fonction du temps et de la fréquence, est l'une de ces distributions. La DWV est définie par l'équation [9].

$$W_x(t,f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t+\frac{\tau}{2})\ x^*\left(t-\frac{\tau}{2}\right) e^{-j2\pi f\tau} d\tau \qquad [9]$$

Cette expression peut être interprétée comme étant la transformée de Fourier du noyau $K_x(\tau,t)$ défini par [10].

$$K_x(\tau,t) = x(t-\frac{\tau}{2})\ x^*\left(t-\frac{\tau}{2}\right) \qquad [10]$$

La DWV donne une concentration parfaite de la fréquence instantanée en cas de modulation linéaire. Cependant, pour d'autres types de modulation, elle introduit des termes d'interférences internes dans la distribution (Mecklenbräuker *et al.*, 1997). De plus, de part sa non linéarité, elle produit des interférences externes appelées "cross-terms" dans le cas de signaux multi-composants.

Pour limiter l'influence des "cross-terms", une solution consiste à remplacer le signal $x(t)$ par sa version analytique (c-à-d dépourvue des fréquences négatives) dans l'équation [9]. Il est également possible de diminuer les interférences en lissant la représentation temps-fréquence. Cette technique, nommée distribution de Wigner-Ville lissée, s'obtient en remplaçant l'équation [9] par l'équation [11].

$$W_x(t,f) = \int_{-\infty}^{+\infty} p(\tau)\ x(t+\frac{\tau}{2})\ x^*\left(t-\frac{\tau}{2}\right) e^{-j2\pi f\tau} d\tau \qquad [11]$$

Où $p(\tau)$ est une fenêtre de lissage. Cette fenêtre permet de réduire les interférences au détriment de la résolution temps-fréquence.

Les techniques mentionnées ci-dessus représentent la distribution énergétique du signal dans le plan temps-fréquence (ou temps-échelle). Elles peuvent toutes être formulées comme une convolution temps-fréquence, temps-échelle d'un noyau avec la distribution de Wigner-Ville (Classe de Cohen, Classe de Rioul-Flandrin) (Cohen, 1989), (Rioul *et al.*, 1992).

3.2.4 La Transformée de Hilbert-Huang et ses Extensions

La transformée de Hilbert-Huang (THH) est une technique non linéaire qui permet d'extraire le contenu temps-fréquence des signaux non stationnaires. Pour obtenir une représentation temps-fréquence, les signaux sont décomposés en une somme de signaux mono-composants modulés en amplitude et/ou en fréquence. Ensuite, la fréquence et l'amplitude instantanées sont extraites des signaux résultants en utilisant une technique de démodulation.

Pour décomposer le signal en une somme de signaux mono-composants appelés "Intrinsic Mode Function" (IMF), Huang *et al.* (Huang *et al.*, 1998) ont proposé une technique empirique nommée Empirical Mode Decomposition (EMD). La transformée d'Hilbert quant à elle permet de calculer le signal analytique des IMFs. Ensuite, on déduit la fréquence instantanée et l'enveloppe complexe des IMFs. Le théorème de Bedrosian (Picinbono, 1997), traitant de la transformée d'Hilbert du produit de deux fonctions réels, démontre que l'unicité du couple fréquence instantanée et de l'enveloppe complexe est vérifiée si les spectres de l'enveloppe complexe et du sinus de la phase instantanée sont disjoints.

Pour résumer, la transformée de Hilbert-Huang est effectuée en 3 étapes :

– Les IMFs sont extraites du signal original grâce à l'EMD dont l'algorithme est décrit dans (Rilling *et al.*, 2003);

– La transformée d'Hilbert est appliquée sur les IMFs ;

– L'enveloppe complexe et de la fréquence instantanée sont extraites.

En représentant conjointement l'amplitude instantanée et la fréquence instantanée en fonction du temps, il est alors possible de représenter le contenu temps-fréquence du signal. En utilisant d'autres techniques de démodulation, il est possible d'obtenir de nouvelles représentations. En particulier la transformée de Huang-Teager est une dérivée de la THH obtenue en remplaçant la démodulation basée sur la transformée de Hilbert par une démodulation basée sur l'opérateur d'énergie de Teager-Kaiser (Cexus, 2005).

4. ELEMENTS SUR LA MODELISATION D'UNE GENERATRICE ASYNCHRONE EN DEFAUT

La modélisation de la génératrice asynchrone à cage d'écureuil en présence de défaillances peut être réalisée grâce à des modèles physiques basés sur les lois régissant l'électromagnétisme. Ces modèles sont divers et variés et peuvent varier en complexité et en précision selon la méthode de modélisation utilisée (méthode des circuits magnétiquement couplés, méthode des réseaux de perméances, méthode des éléments finis).

4.1 Circuits Electriques Magnétiquement Couplés

La méthode des circuits électriques magnétiquement (CEMC) est une méthode analytique basée sur la décomposition des bobinages de la machine en bobines élémentaires dont les inductances propres et mutuelles sont calculées à partir de l'induction normale dans l'entrefer de la machine. Ces calculs s'appuient sur la technique des fonctions de distribution des bobinages (Joksimovic et *al*, 2000). Ces inductances peuvent être calculées par le biais du flux ou par le biais de l'énergie stockée dans l'entrefer.

Les inductances propres et mutuelles entre stator et rotor de la génératrice prennent une place importante dans cette méthode de modélisation car elles contiennent la signature des différents phénomènes pouvant apparaître au sein de la génératrice asynchrone. Une modélisation précise de ces inductances mènera à un apport d'informations supplémentaires sur les signaux tels que le courant statorique ou encore la vitesse du rotor. Par ailleurs, cette modélisation permet de prendre en compte un certain nombre de défauts d'origine électromagnétique tels que les défauts de court-circuit entre spires statoriques, les défauts de types rupture de barres rotoriques ou de portions d'anneau de court-circuit. Les défauts d'excentricité statique et dynamique peuvent également être intégrés à ce type de modélisation.

La méthode CEMC est caractérisée par sa capacité à prendre en compte les détails géométriques des constituants de la génératrice et par un bon compromis précision/temps de calcul. Cette méthode de modélisation est basée sur un certain nombre d'hypothèses dont les principales sont les suivantes :

- Les tôles ferromagnétiques ont une perméabilité infinie.
- Le circuit magnétique est non conducteur.
- Les effets de fréquence sont négligeables.
- Les conducteurs sont parfaitement isolés du circuit magnétique.

On considère, par ailleurs, que la machine est constituée d'un stator à bobinage réparti ayant 3 phases et d'un rotor à cage ayant 30 barres.

Les équations différentielles régissant l'évolution des grandeurs électriques et mécaniques de la machine asynchrone dans l'espace des phases sont générées à partir des connaissances sur la géométrie de la machine (caractéristiques des bobinages, formes d'encoches statoriques et rotoriques, les éléments défaillants et les dimensions). Dans ce système d'équations, les matrices d'inductances propres et mutuelles nécessaires pour le calcul du modèle de la machine sont calculées en se basant sur l'énergie magnétique stockée dans l'entrefer qui est déterminée grâce à la théorie des fonctions de bobinages (Houdouin *et al.,* 2002). Cette méthode de calcul permet d'obtenir des coefficients de mutuelles symétriques quelque soit l'état de la machine, ce qui est en accord avec l'interprétation physique des inductances mutuelles. Ce modèle est utilisé pour générer les courants statoriques de la génératrice asynchrone en fonctionnement à vitesse variable (émulant le fonctionnement d'une éolienne ou d'une hydrolienne) dans le cas sain et le cas défaillant. Dans le cadre de cet article et pour illustrer notre analyse comparative,

nous nous intéressons aux ruptures de barres rotoriques ainsi qu'aux défauts d'excentricité.

4.2 Résultats des Simulations

Des signaux de simulations de 10-sec ont été échantillonnés à une fréquence de 2-kHz et ont été générés en simulant une génératrice asynchrone de 4-kW à 2 paires de pôle connectée à un réseau triphasé puissant et fonctionnant en régime nominal entraînée par une turbine (El Bouchikhi et *al*, 2012). Le défaut de rupture de barre de la cage d'écureuil intervient à l'instant 5-sec. Les résultats des simulations sont donnés sur la Figure 1.

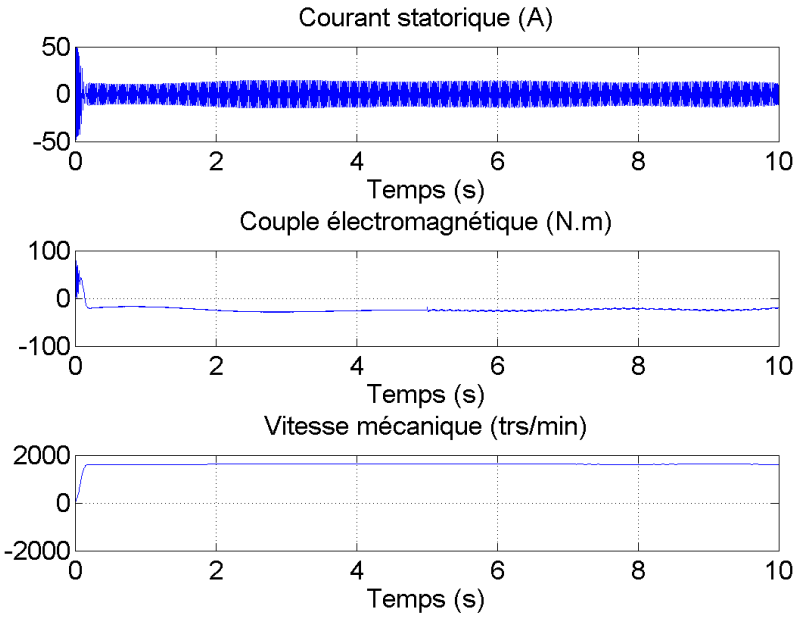


Figure 1. *Résultats de simulations d'une éolienne avec une génératrice asynchrone défaillante (rupture de barres)*

Les courants statoriques issus des simulations ont été utilisés pour évaluer les performances des techniques présentées précédemment pour détecter les différentes anomalies dont les génératrices asynchrones sont assujetties. Nous nous intéressons ici aux défauts d'excentricité et de ruptures de barres rotoriques.

5. APPLICATION A LA DETECTION DE DEFAUTS DES GENERATRICES ASYNCHRONES

Les performances des techniques présentées ci-dessus sont maintenant analysées dans cette section. Pour évaluer ces performances, nous utiliserons des modèles de signaux synthétiques ainsi que des courants statoriques issus du modèle présenté dans la section précédente.

5.1 Signaux Synthétiques

Dans le cadre de cette étude et pour des raisons de simplification, nous supposons que la vitesse et la fréquence varient linéairement en fonction du temps ce qui est toujours le cas dans les entrainements mécaniques à vitesse variable durant l'accélération ou le freinage. Par ailleurs, la fréquence caractéristique f_c est une fonction de la vitesse de rotation de l'arbre de la génératrice à la fréquence f_r , par conséquent elle, varie de façon similaire. La pulsation propre au défaut $\omega_c(t)$ s'écrit sous la forme [15] :

$$\omega_c(t) = 2\pi f_c(t) = 2\pi(\alpha_c + \frac{1}{2}\beta_c t) \qquad [15]$$

Où α_c est la fréquence initiale et β_c est la vitesse de balayage. Les paramètres du modèle de simulation prennent les valeurs suivantes, typiques de l'application considérée.

$$f_s = 50\ Hz \qquad I_{st} = I_{rt} = \frac{\sqrt{2}}{2} \qquad I_1 = \sqrt{2} \qquad \alpha = \beta = 0.1$$
$$\varphi_\beta = \varphi_\alpha = \frac{\pi}{4} \qquad SNR = 50dB \qquad \varphi_r = \frac{\pi}{8}$$

Les signaux de simulations, échantillonnés à une fréquence de 1-kHz, sont donnés ci-dessous (Figure 2a). Les deux types de modulation ne peuvent être dissociés dans le domaine temporel à cause de la faible valeur de l'indice de modulation.

L'extraction du signal sur une fenêtre temporelle donnée est équivalente à la multiplication du signal réel par une fenêtre temporelle rectangulaire. L'estimation de la densité spectrale de puissance dans ce cas conduit à des lobes latéraux qui peuvent masquer des composantes fréquentielles voisines et entraîner une mauvaise interprétation des résultats. La multiplication du signal par un autre type de fenêtre permet de réduire les amplitudes des lobes mais accroît la largeur du lobe principale. Une multitude de fenêtres peuvent être utilisées (Harris, 1978) parmi lesquelles on

peut citer : la fenêtre de Bartlett, la fenêtre de Hamming, la fenêtre de Blackman, etc. La figure 2b donne le périodogramme des signaux modulés en utilisant la fenêtre Blackman.

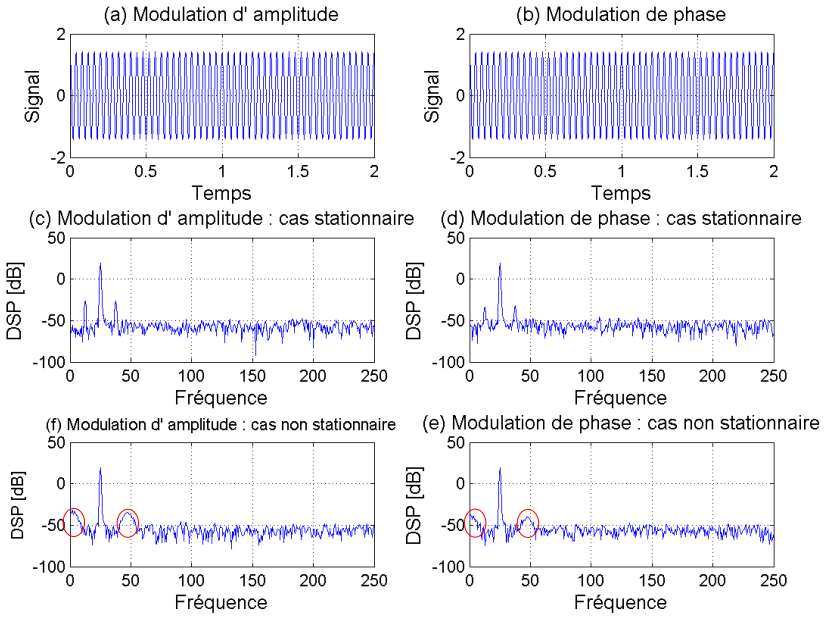


Figure 2. *Signaux modulés en phase et en amplitude et leurs périodogramme*

Dans le cas non stationnaire, le périodogramme est donné sur la figure 2c. On peut constater que le périodogramme réalise une moyenne des lobes latéraux sur toutes les fréquences. Il masque ainsi la façon dont les composantes fréquentielles varient dans le temps, d'où l'intérêt d'utiliser des représentations temps/fréquence qui permettent de mettre en relief ce genre de comportement dit non stationnaire.

Les représentations temps-fréquence ont été implémentées en utilisant la Toolbox Temps Fréquence sous Matlab (Auger *et al*., 1997) sauf pour la THH qui a été réalisée en utilisant l'algorithme de G. Rilling sous Matlab (Rilling *et al*., 2003). Le spectrogramme a été réalisé avec la fenêtre de Hamming avec un chevauchement de 50% entre segments. Le scalogramme a été calculé en utilisant une ondelette de type Morlet. La fenêtre choisie pour le lissage de la distribution de Wigner-Ville est celle de Hamming. Les paramètres de l'EMD sont similaires à ceux utilisés dans (Huang *et al.*, 1998).

L'analyse de la figure 3 révèle que le spectrogramme permet de visualiser la signature de la défaillance de la génératrice sur les courants statoriques qui se

manifeste par l'apparition de bandes latérales dans le spectre. Le spectrogramme permet également de visualiser le caractère non stationnaire du défaut car le contenu fréquentiel des signaux en présence du défaut évolue linéairement dans le temps. Bien que la signature fréquentielle du défaut soit visible, la résolution temporelle et fréquentielle reste faible. Par ailleurs, le spectrogramme ne permet pas de distinguer les deux types de modulations introduites par la présence d'une défaillance ; modulation de phase dans le cas d'une oscillation de couple et une modulation d'amplitude dans le cas d'une excentricité.

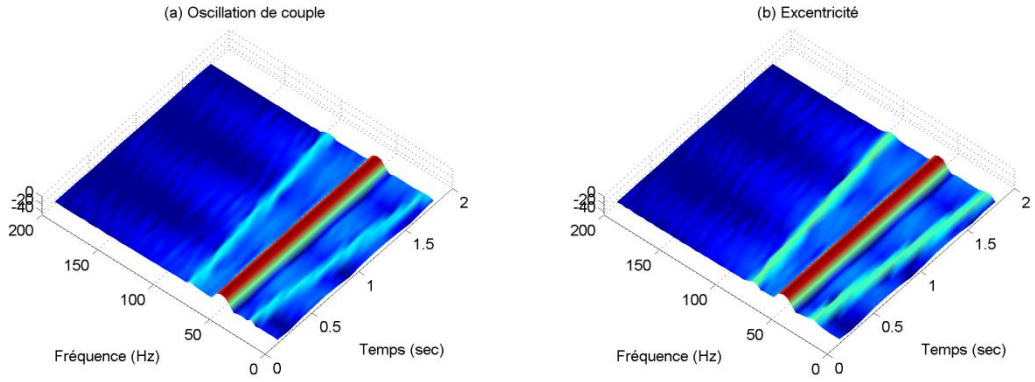


Figure 3. *Spectrogramme d'une génératrice en défaut*

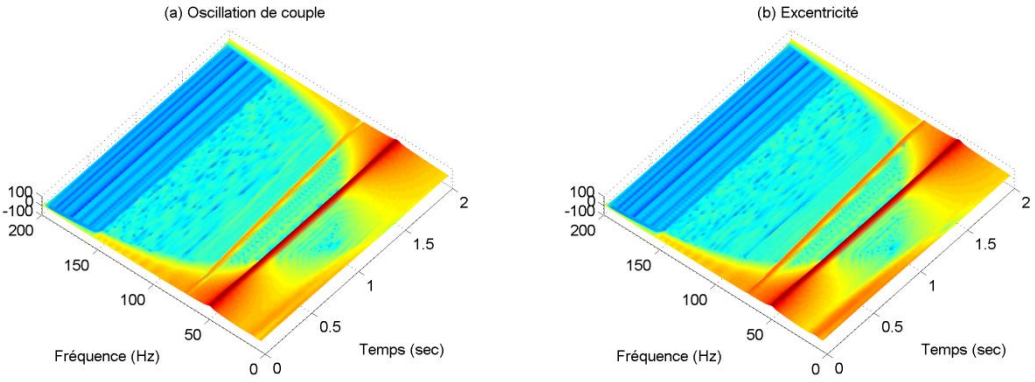


Figure 4. *Scalogramme d'une génératrice en défaut*

Le scalogramme des signaux simulés est donné sur la figure 4. Par rapport au spectrogramme, nous pouvons constater que le scalogramme permet de mieux

détecter le cas défaillant en présentant une meilleure localisation en fréquence des bandes latérales produites par le défaut. Néanmoins, il ne permet pas la discrimination des deux types de modulation.

L'analyse de la figure 5 montre que la distribution pseudo Wigner-Ville présente une meilleure résolution temps-fréquence que les techniques précédentes ; la DWV n'est pas contrainte par le principe d'incertitude d'Heisenberg-Gabor ce qui implique une meilleure résolution temporelle et fréquentielle de la représentation. Néanmoins, elle introduit des termes d'interférences qui peuvent conduire à des détections erronées. Cette technique permet de dissocier les deux types de modulation. En effet, en réalisant un zoom (figure 6) autour des bandes latérales hautes et basses autour de la fréquence fondamentale, nous pouvons constater que dans le cas d'une modulation de phase les raies hautes et basses sont en opposition de phase (déphasage de π) tandis que dans le cas d'une modulation d'amplitude ces raies sont en phase (Blödt *et al*., 2009).

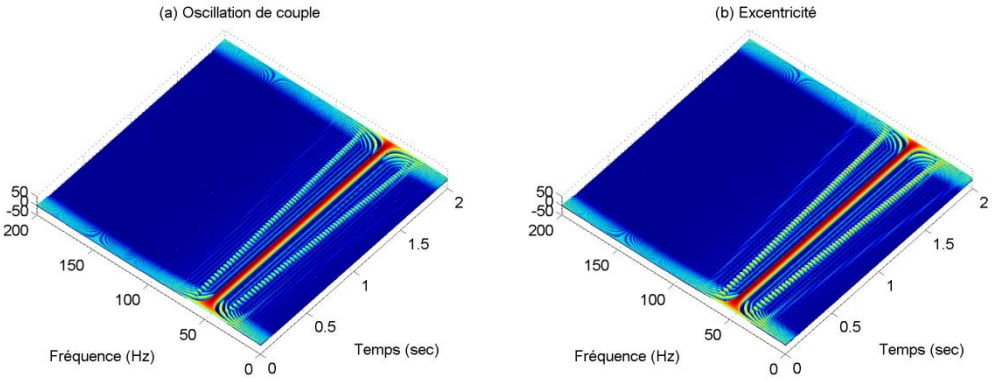


Figure 5. *Distribution de Wigner-Ville d'une génératrice en défaut*

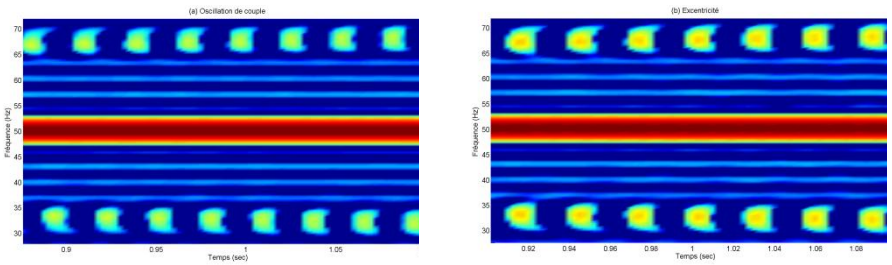


Figure 6. *Distribution de Wigner-Ville : (a) Modulation de phase, (b) Modulation d'amplitude*

La figure 7 montre la transformée de Hilbert-Huang du courant statorique. Cette dernière représentation permet de mieux visualiser la modulation sinusoïdale de phase et d'amplitude (voir figure 8). Elle permet une discrimination des deux modulations, étant donné que la modulation de phase se manifeste simplement par une oscillation autour de la fréquence fondamentale à 50-Hz alors que la modulation d'amplitude introduit des composantes basses fréquences.

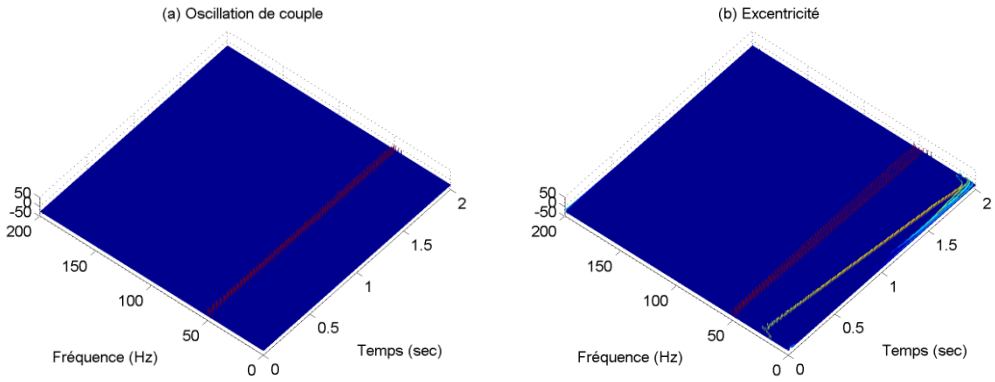


Figure 7. *Transformée d'Hilbert-Huang d'une génératrice en défaut*

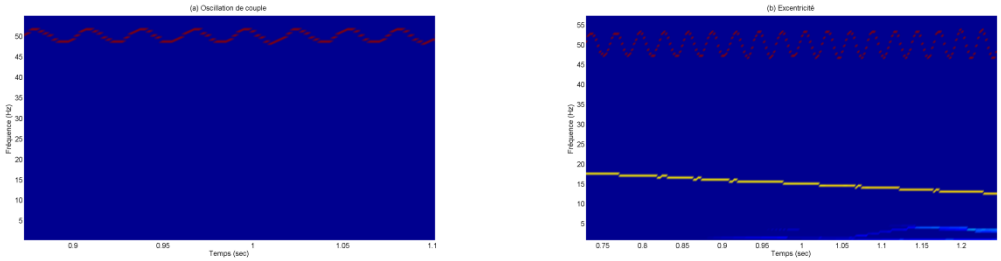


Figure 8. *Transformée d'Hilbert-Huang : (a) Modulation de phase, (b) Modulation d'amplitude*

5.2 Signaux Simulés

Cette section présente la validation en simulation des résultats précédemment obtenus sur des signaux synthétiques. Les techniques proposées sont évaluées pour la détection des défauts d'excentricité et de ruptures de barres rotoriques.

5.2.1 Détection des défauts d'excentricité

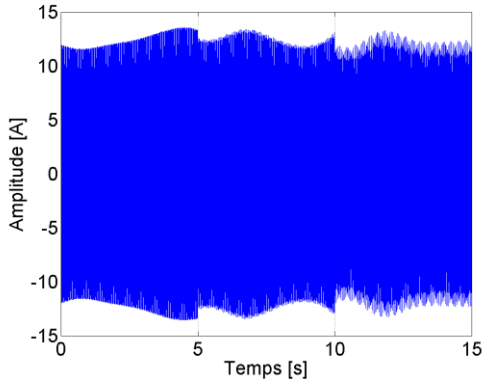
Le déséquilibre mécanique représente approximativement 80% des défauts mécaniques (Bonnett et *al*., 2008) qui peuvent survenir sur les génératrices asynchrones. Des simulations ont été effectuées pour la détection des défauts d'excentricité dans une génératrice entraînée par une éolienne (ou une hydrolienne). Afin de démontrer la faisabilité des techniques proposées quant au suivi de l'évolution des défauts, nous effectuons des simulations avec une sévérité évoluant dans le temps (génératrice sans défaut jusqu'à 5-sec ; instant où le défaut est introduit. La sévérité augmente ensuite entre 5-sec et 15-sec de 5% à 10% d'excentricité). Les résultats des simulations sont donnés sur la figure 9 pour les différentes techniques comparées.

Les résultats de simulations sont concluants et permettent d'affirmer que ces techniques permettent de visualiser la signature du défaut et l'évolution de sa sévérité (des bandes latérales à 24-Hz dont l'amplitude augmente entre 5-sec et 15-sec pour le spectrogramme, le scalogramme et la DWV et des oscillations autour de la fréquence fondamentale dont l'amplitude augmente avec la sévérité du défaut pour la THH). Ces résultats confirment les résultats préliminaires de la partie précédente. Par ailleurs, les techniques les plus performantes sont celles dont la complexité calculatoire est la plus importante.

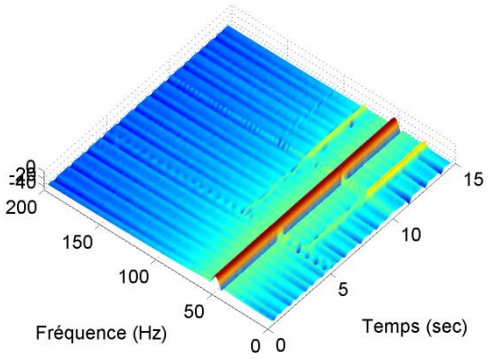
1.1.1 Détection de rupture de barres rotoriques

La détection de ruptures de barres rotoriques est primordiale parce qu'ils constituent une asymétrie électrique difficile à détecter puisque les grandeurs rotoriques sont inaccessibles. Les résultats de simulations sont présentés sur la figure 10. Les simulations ont été réalisées pour une génératrice sans défaut jusqu'à 5-sec. La sévérité du défaut évolue d'une barre cassée à 3 barres cassées de 5-sec à 20-sec.

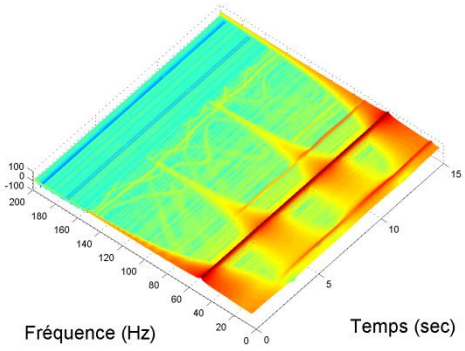
L'analyse de ces représentations démontre la faisabilité des techniques susmentionnées pour la détection de ruptures de barres rotoriques. En effet, la rupture de barres introduit des bandes latérales très proches de la fréquence fondamentale ce qui nécessite par conséquent des techniques haute résolution pour une détection optimale. Dans notre cas, le nombre d'échantillons est assez important pour que le spectrogramme donne des résultats satisfaisants ce qui ne sera pas le cas dans une surveillance temps réel (nombre d'échantillons limité). La figure 10e permet d'affirmer que la THH mis en évidence l'effet de la rupture de barres rotoriques sur les courants statoriques : introduction d'oscillations autour de la fréquence fondamentale (modulation de phase).



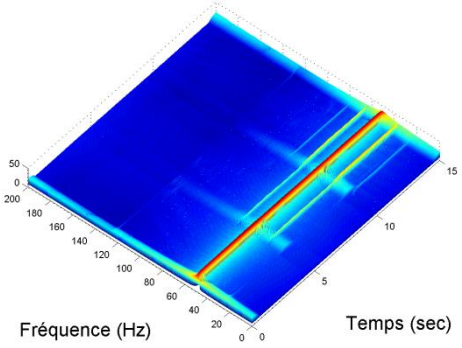
(a) Signal temporel



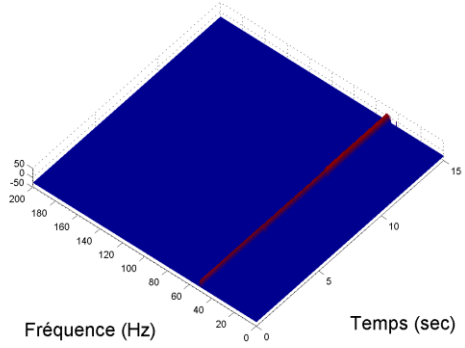
(b) Spectrogramme



(c) Scalogramme

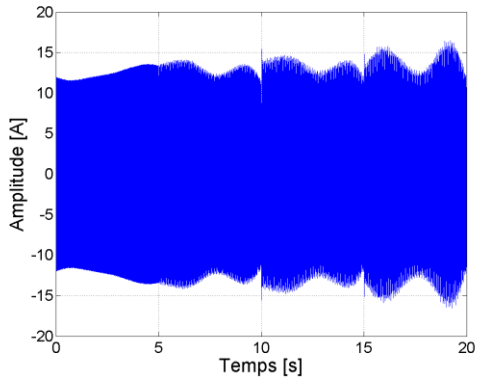


(d) DWV

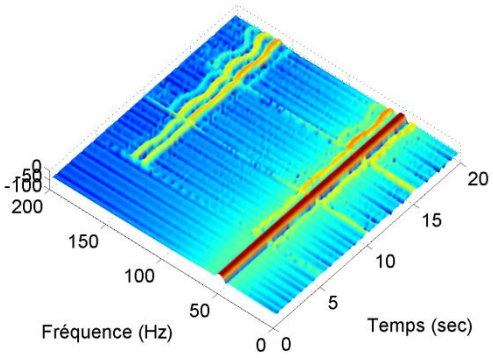


(e) THH

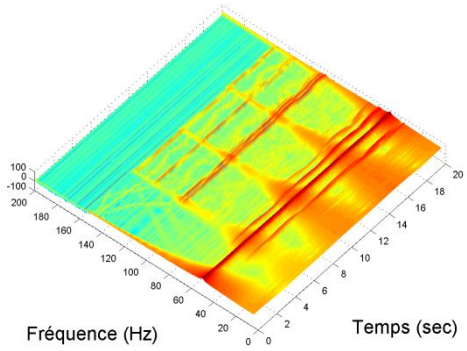
Figure 9. *Résultats de simulations pour le défaut d'excentricité*



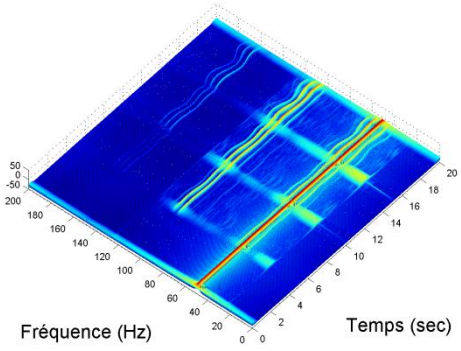
(a) Signal temporel



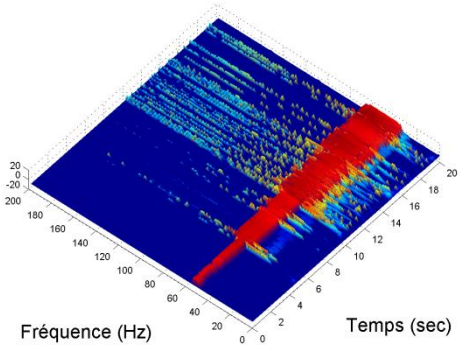
(b) Spectrogramme



(c) Scalogramme



(d) DWV



(e) THH

Figure 10. *Résultats de simulations pour le défaut de rupture de barres rotoriques*

1.2 Discussions

L'analyse globale des résultats (figures 3 à 10) montre que les techniques étudiées permettent de détecter la présence de défaillances dans un contexte non stationnaire (variation des signatures fréquentielles dans le temps ou sévérité du défaut croissante). La distribution de Wigner-Ville ainsi que la transformée de Hilbert-Huang permettent de discriminer les deux types de défaillances, étudiées dans le cadre de la validation sur des signaux synthétiques, bien que les deux défaillances aient la même signature fréquentielle (Benbouzid, 2000). Pour la validation sur les signaux en simulation, les signatures des deux défauts sont similaires mais la localisation des bandes latérales n'est pas la même. Ainsi, il est aisé de distinguer les deux défaillances en l'occurrence ici les défauts de rupture de barres rotoriques et les défauts d'excentricité dont la localisation des lobes latéraux est donnée ci-dessous.

$$f_{ecc} = f_s\left[1 \pm m\left(\frac{1-s}{p}\right)\right] \; m = 1, 2, 3 \ldots$$

$$f_{brb} = f_s[1 \pm 2s]$$

Où f_s est la fréquence fondamentale, s est le glissement et p est le nombre de paire de pôles de la génératrice.

Les temps de calcul diffèrent largement suivant la complexité de la technique et suivant la taille des échantillons de mesure. L'analyse théorique des temps de calcul pour l'ensemble de ces techniques n'est pas triviale pour diverses raisons qui peuvent être regroupées en deux grandes catégories :

- La diversité des algorithmes pour l'implémentation du scalogramme, le spectrogramme et la DWV.
- La transformée de Hilbert-Huang est basée sur un algorithme itératif qui utilisent des boucles indéfinies dont le critère d'arrêt dépend de la nature du signal.

Pour ces raisons, il paraît difficile d'établir les temps de calculs théoriques. Ceci a donc motivé notre démarche qui consiste à évaluer les temps de calcul sur un ordinateur afin de donner un ordre d'idée de la complexité calculatoire de chaque technique.

Les temps de calcul ont été évalués sur un PC HP, avec un microprocesseur de type AMD Turion (tm) II Dual-Core Mobile M540 d'une fréquence 2.4-GHz. Pour le spectrogramme, qui est la méthode la plus simple à mettre en œuvre, le temps de calcul dans le cas défaillant est de l'ordre de 0.014-sec. Le scalogramme présente une résolution multiple, cependant, son temps de calcul est très élevé (12.55-sec

pour chaque cas). Ce temps de calcul peut être un handicap pour une implémentation temps réel. La distribution de Wigner-Ville se caractérise par une meilleure résolution. En comparaison avec les deux précédentes méthodes, cette technique à un temps de calcul moindre que le scalogramme mais supérieur à celui du spectrogramme (0.12-sec dans chaque cas). Enfin par rapport aux techniques précédentes, la transformée de Hilbert-Huang présente un bon compromis entre les performances et le temps de calcul (0.04-sec pour les deux cas). Le tableau 2 résume les éléments clés de notre analyse comparative.

	Spectrogramme	Scalogramme	DWV	THH
Résolution	– –	+	+ +	+ +
Artefacts	+ +	+ +	– –	–
Temps de calcul	+ +	– –	–	+

Tableau 2. *Performances des techniques d'analyse non stationnaires*

Les représentations temps-fréquence sont des outils compliqués, coûteux en temps de calcul et nécessitent des connaissances avancées pour l'ajustement des paramètres de chaque technique. De plus, ces représentations ne sont qu'une première étape dans la mise en place d'un algorithme de diagnostic complet. En effet, pour établir une décision sur l'état de la génératrice, il est nécessaire de réaliser des post-traitements pour extraire des paramètres, révélateurs de la sévérité du défaut. Cette étape peut faire appel à des techniques d'intelligences artificielles telles que les réseaux de neurones ou les séparateurs à vastes marges (SVM) (Theodoridis *et al*., 2003). Ces techniques de reconnaissance de formes seront l'objet de nos travaux futurs.

2. CONCLUSION

Les travaux présentés dans cet article présentent les performances des techniques temps-fréquence et temps-échelle pour le diagnostic des défaillances dans une génératrice asynchrone (à cage) équipant une éolienne (ou une hydrolienne). Cette étude fournit une comparaison de ces techniques pour la visualisation de la signature fréquentielle des défauts dans un contexte non stationnaire. Les résultats obtenus en simulation sur des signaux synthétiques et sur des signaux issus d'un outil d'émulation d'une génératrice en défaut indiquent que toutes les techniques permettent une représentation (visualisation) des défaillances. Cependant la qualité de la résolution temps-fréquence ainsi que le coût calculatoire peuvent varier

significativement suivant la méthode utilisée. Quant à la déclinaison opérationnelle, une étape supplémentaire est nécessaire. Elle consiste à extraire, à partir des représentations du signal, des critères qui permettront de décider quand à l'existence ou non d'une défaillance, de déterminer sa cause et d'évaluer son degré de sévérité. Cette problématique fait actuellement l'objet de plusieurs investigations.

3. BIBLIOGRAPHIE

Amirat Y., Benbouzid M., Al-Ahmar E., Bensaker B., Turri S., "*A brief status on condition monitoring and fault diagnosis in wind energy conversion systems*", Renewable & Sustainable Energy Reviews, vol. 3, n°9, pp. 2629-2636, December 2009.

Amirat Y., Choqueuse V., Benbouzid M.E.H., "*Condition monitoring of wind turbines based on amplitude demodulation*", in Proceedings of the IEEE ECCE'10, Atlanta (USA), pp. 2417-2421, September 2010.

Antonio-Daviu J. A., Riera-Guasp M., Folch J., Palomares M. P. M., "*Validation of new method for the diagnosis of rotor bar failures via wavelet transform in industrial induction machines*", IEEE Trans. Industry Applications, vol. 42, n°. 4, July/August 2006.

Antonino-Daviu J. A., Riera-Guasp M., Pineda-Sanchez M., Pérez R. B., "*A critical comparison between DWT and Hilbert-Huang-based methods for the diagnosis of rotor bar failures in induction machines*", IEEE Trans. Industry Applications, vol. 45, n°. 5, September/October 2009.

Auger F., Flandrin P., Goncalves P., Lemoine O., "*Time-frequency toolbox, for use with Matlab*", CNRS, GDR ISIS, Tech. Rep., 1997.

Benbouzid M., "*A review of induction motors signature analysis as a medium for faults detection*", IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 47, no. 5, pp. 984–993, 2000.

Benelghali S., Benbouzid M.E.H., Charpentier J.F., "*Marine tidal current electric power generation technology: State of the art and current status*", in Proceedings of IEEE IEMDC'07, Antalya (Turkey), vol. 2, pp. 1407-1412, May 2007.

Blödt M., Chabert M., Faucher J., Dagues B., "*Mechanical load fault detection in induction motors by stator current time-frequency analysis*", in Proc. IEEE IEMDC, San Antonio, TX, May 2005, pp. 1881-1888.

Blödt M., Regnier J., Faucher J., "*Distinguishing load torque oscillations and eccentricity faults in induction motors using stator current Wigner distributions*", IEEE Trans. Industry Applications, vol. 45, n°. 6, pp. 1991–2000, November/December 2009.

Bonnett A. H., Yung C., "*Increased efficiency versus increased reliability*," IEEE Industry Applications Magazine, vol. 14, no. 1, Janvier/Fevrier 2008.

El Bouchikhi E. H., Choqueuse V., Benbouzid M. E. H., Charpentier J., Barakat G., "*A comparative study of time-frequency representations for fault detection in wind turbine*," in *Proc. IEEE Ind. Electron. Soc.*, Melbourne, Australia, Nov. 2011, pp. 3584–3589.

El Bouchikhi E. H., Choqueuse V., Benbouzid M. E. H., "*Current frequency spectral subtraction and its contribution to induction machines' bearings condition monitoring*," IEEE Trans. on Energy Conversion, vol. pp , no. 99, 2012.

Cexus J. C., Analyse des signaux non-stationnaires par Transformation de Huang, Opérateur de Teager-Kaiser, et Transformation de Huang-Teager (THT), Thèse de Doctorat de l'Université de Rennes 1. Décembre 2005.

Cohen L., *Time–Frequency Analysis*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1995.

Cohen L., "*Time-frequency Distributions - A review*", Proceeding of the IEEE, vol. 77, pp. 941-981, July 1989.

Cusido J., Romeral L., Ortega J. A., Rosero J. A., Garcia Espinosa A., "*Fault detection in induction machines using power spectral density in wavelet decomposition*", IEEE Trans. Industrial Electronics, vol. 55, n°2, February 2008.

Dorrell D. G., "*The influence of rotor eccentricity on the output torque of cage induction motors*", in Proc. ICEM, Paris, France, 1994, vol. 1, pp. 35-40.

Dorrell D.G., Thomson W.T., Roach S., "*Analysis of airgap flux, current and vibration signals as a function of the combinaison of static and dynamic airgap eccentricity in 3-phase induction motors*", IEEE Trans. Ind. Appl., vol.33,no. 1, pp. 24-34, Jan./Feb.1997.

Faulstich S., Hahn B., Tavner P.J., "*Wind turbine downtime and its importance for offshore deployment*", Wind Energy, DOI: 10.1002/we.421, July 2010.

Flandrin P., *Time Frequency / Time-Scale Analysis*. San Diego, CA: Academic, 1999.

Gray C. S., Watson S. J., "*Physics of failure approach to wind turbine condition based maintenance*", Wind Energy, DOI: 10.1002/we.360, August 2010.

Harris F., "*On the use of windows for harmonic analysis with the discrete Fourier transform*", Proc. of the IEEE, vol. 66, no. 1, pp. 51-83, jan. 1978.

Houdouin G., Barakat G., Dakyo B., Destobbeleer E., Nichita C., "*A Coupled magnetic circuit based global method for the simulation of squirrel cage induction machines under rotor and stator faults*", in Proc. of ELECTRIMACS'02, Montreal (Canada), August 2002.

Huang N., Shen Z., Long S., Wu M., Shih H., Zheng Q., Yen N., Tung C., Liu H., "*The empirical mode decomposition and Hilbert spectrum for nonlinear and nonstationary time series analysis*", Proc. Roy. Soc. London, vol.454, pp.903-995, 1998.

Joksimovic G., Durovic M., Penman J., Arthur N., "*Dynamic simulation of dynamic eccentricity in induction machines-winding function approach*," IEEE Trans. Energy Conversion, vol. 15, no. 2, pp. 143–148, June 2000.

Kay S. M., *Modern Spectral Estimation: Theory and Application*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1998.

Kay S. M., Marple S. L., "*Spectrum Analysis-A Modern Perspective*", Proceeding of the IEEE, vol. 69, no. 11, 1981.

Kusiak A., Li W., "The prediction and diagnosis of wind turbine faults", Renewable Energy, vol. 36, n°1, pp. 16-23, January 2010.

Mecklenbräuker W., Hlawatsch F., Eds., *The Wigner Distribution- Theory and Applications in Signal Processing*, Amsderdam, The Netherlands: Elsevier, 1997.

Picinbono B., "*On instantaneous amplitude and phase of signals*", IEEE Trans. Signal Processing, vol. 45, n°. 3, pp. 552-560, March 1997.

Rilling G., Flandrin P., Goncalves P., "*On empirical mode decomposition and its algorithms*", in Proceedings of the IEEE/EURASIP Workshop on Nonlinear Signal and Image Processing, Grado (Italy), July 2003.

Rioul O., Flandrin P., "*Time-scale energy distributions: a general class extending wavelet transforms*", IEEE Trans. On Signal Processing, vol. 40, no. 7, July 1992.

Rusek J., "*Reflection of eccentricities in spectral composition of currents of induction machines*", in Proc. ICEM, Vigo, Spain, Sep. 1996, pp. 470-475.

Theodoridis S., Koutroumbas K., "*Pattern Recognition,*" Elsevier Academic Press, Second Edition.

Thirion-Moreau N., Arquès P. Y., " *Analyse Temps Fréquence Linéaires et Quadratiques*", Techniques de l'Ingénieur, Traité Télécoms, Novembre 2002.

Thomson W.T., Fenger M., "*Case histories of current signature analysis to detect faults in induction motor drives*", in Proceedings of the IEEE IEMDC'03, Madison (USA), vol. 3, pp. 1459- 1465, Jun. 2003.