



# Etude Comparative des Techniques de Traitement du Signal Non-Stationnaires Dédiées au Diagnostic des Génératrices Asynchrones dans les Eoliennes Offshores et les Hydroliennes

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

## ► To cite this version:

El Houssin El Bouchikhi, Vincent Choqueuse, Mohamed Benbouzid, Frédéric Charpentier Jean. Etude Comparative des Techniques de Traitement du Signal Non-Stationnaires Dédiées au Diagnostic des Génératrices Asynchrones dans les Eoliennes Offshores et les Hydroliennes. EF2011, Dec 2011, Belfort, France. pp.1-10, 2011. <hal-00657623>

**HAL Id: hal-00657623**

**<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00657623>**

Submitted on 7 Jan 2012

**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 des Techniques de Traitement du Signal Non-Stationnaires Dédiées au Diagnostic des Génératrices Asynchrones dans les Eoliennes Offshores et les Hydroliennes\*

El Houssin El Bouchikhi<sup>1</sup>, Vincent Choqueuse<sup>1</sup>, Mohamed Benbouzid<sup>1</sup> et Jean Frédéric Charpentier<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Université de Brest, EA 4325 LBMS, Rue de Kergoat, CS 93837, 29238 Brest Cedex 03, France

<sup>2</sup>Ecole Navale, EA 3634 IRENav, Brest, France

[El-Houssin.Elouchikhi@univ-brest.fr](mailto:El-Houssin.Elouchikhi@univ-brest.fr), [Vincent.Choqueuse@univ-brest.fr](mailto:Vincent.Choqueuse@univ-brest.fr), [Mohamed.Benbouzid@univ-brest.fr](mailto:Mohamed.Benbouzid@univ-brest.fr),

[Jean-Frederic.Charpentier@ecole-navale.fr](mailto:Jean-Frederic.Charpentier@ecole-navale.fr)

**RESUME** – 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 proposées l'utilisation de techniques temps-fréquence et temps-échelle pour le diagnostic. Les techniques les plus utilisées sont : Le spectrogramme, la transformée en ondelettes, la représentation de Wigner-Ville et la transformée de Hilbert-Huang. Cet article propose alors une étude comparative et une analyse de ces techniques pour la détection des défauts qui surviennent dans une génératrice asynchrone 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 a comparative study and an analysis of the above techniques for failure detection in an induction generator.

**MOTS-CLES** – Génératrice asynchrone, circuits magnétiquement couplés, signaux non-stationnaires, représentations temps-fréquence/temps-échelle.

---

\*Ce travail est soutenu par Brest Métropole Océan (BMO).

# 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 favorisés 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 offshore. 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 [1]. 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 aux systèmes hydroliens.

Si les activités de recherche sur les systèmes éoliens ont conduits 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, une étude récente [2] a montré que les éoliennes terrestres présentent un taux de disponibilité très élevé de l'ordre de 95% à 99% suivant la complexité de la technologie. Alors que la disponibilité des éoliennes offshore 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 offshore [3]. Vu l'état d'avancement des projets industriels à travers le monde [4], 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 offshore.

Pour améliorer la fiabilité de ces systèmes, il est nécessaire de détecter et caractériser les défauts de façon précoce afin d'anticiper l'arrêt définitif du système. Plusieurs études ont démontrées l'intérêt d'utiliser les courants statoriques pour surveiller les génératrices asynchrones et les éoliennes associées [5-6-7]. 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 avancées pour la détection des défauts au niveau de la génératrice d'une éolienne ou hydrolienne. Ces techniques incluent des outils de représentation temps-fréquence et temps-échelle aussi diverses que le spectrogramme [8], la transformée en ondelettes [9], la représentation de Wigner-Ville [10] et la transformée de Hilbert-Huang [11]. Cependant, ces études ne présentent pas les avantages et les inconvénients de chaque technique, ni une estimation du temps de calcul de chaque méthode, 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. Les signaux de simulation sont générés à partir d'un modèle basé sur la théorie des circuits électriques magnétiquement couplés [12]. Cet article est organisé comme suit : la section II décrit les techniques temps-fréquence pour l'analyse des signaux non-stationnaires. Dans la section III, les performances des techniques sont comparées pour la détection de cassures de barres rotoriques dans la génératrice asynchrone. La dernière partie conclut cet article et présente des perspectives pour de nouvelles investigations. Dans cet article les génératrices étudiées sont des génératrices asynchrones à cage directement connectées au réseau ce qui représente une portion importante des éoliennes installées. Néanmoins, moyennant certaines précautions l'étude peut apporter des éléments de réflexion sur des systèmes à vitesse variable.

**Tableau 1. Disponibilité des parcs éoliens terrestres et offshore existant en Europe [2]**

Les fermes éoliennes	Distance offshore (km)	Disponibilité moyenne (%)		
		Années d'opération		
		1	2	3
<b>Parcs terrestres européens</b>	---	98.2 (moyenne)		
<b>North Hoyle, GB, offshore</b>	8	84.0	89.1	87.4
<b>Scroby Sands, GB, offshore</b>	2	84.2	75.1	90.4
<b>Kentish Flats, GB, offshore</b>	8.5	87.0	73.5	---
<b>Egmond Aan Zee, Pays-Bas, offshore</b>	11	81.4	---	---
<b>Barrow, GB, offshore</b>	10	67.4	---	---

## 2. Techniques temps-fréquence / temps-échelle

Si l'analyse fréquentielle de Fourier met en œuvre deux représentations conjuguées et globales, l'une de type temporel, et l'autre de type fréquentiel, 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 [13]. Pour les besoins de traitement du signal, on a associé, à un signal temporel ou fréquentiel, des représentations possédant simultanément la dimension temporelle et fréquentielle. 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 engendrent des représentations temps-fréquence ou temps-échelle de propriétés et performances variées.

### 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 peu conséquente sur l'étendue d'une fenêtre d'analyse. Elle divise le signal en séquences courtes et consécutives, puis calcule la Transformée de Fourier de chaque segment. La formulation mathématique de la TFCT est donnée par l'équation (1).

$$TFCT(t, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(u)w^*(u - t)e^{-2j\pi fu} du \quad (1)$$

Où  $x(\cdot)$  représente le signal temporel échantillonné,  $w(\cdot)$  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 [14], la formulation mathématique du principe d'incertitude de Heisenberg-Gabor est donnée par l'inégalité (2).

$$\Delta f \cdot \Delta t \geq \frac{1}{4\pi} \quad (2)$$

Où  $\Delta f$  et  $\Delta t$  sont respectivement la résolution temporelle et la résolution fréquentielle et sont définis par (3).

$$\Delta t = \sqrt{\frac{1}{E} \int (t - \langle t \rangle)^2 |x(t)|^2 dt} \quad \text{et} \quad \Delta f = \sqrt{\frac{1}{E} \int (f - \langle f \rangle)^2 |X(f)|^2 df} \quad (3)$$

$E$  Étant l'énergie du signal et  $\langle t \rangle$ ,  $\langle f \rangle$  correspondent respectivement au centre temporel et fréquentiel de l'énergie. Ces quantités sont définies par l'équation (4).

$$\langle t \rangle = \frac{1}{E} \int t |x(t)|^2 dt \quad \text{et} \quad \langle f \rangle = \frac{1}{E} \int f |X(f)|^2 df \quad (4)$$

Le spectrogramme est une analyse mono-résolution; on ne pas être à la fois « précis » en temps et en fréquence. Cependant, pour une large classe de signaux réels, les zones d'énergie sont non-stationnaires sur des périodes courtes à haute fréquence d'où l'intérêt d'une analyse multi-résolution.

### 2.2 Scalogramme

La transformée en ondelettes permet une analyse des différentes fréquences avec diverses résolutions ; haute résolution fréquentielle en basses fréquences et haute 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 appelée ondelette mère. La transformée en ondelettes continue est donnée par (5).

$$W(t, a) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \int_{-\infty}^{+\infty} x(u) \psi^* \left( \frac{u-t}{a} \right) du \quad (5)$$

Avec  $\psi(t)$  est l'ondelette mère qui doit être "passe-bande", de moyenne nulle et de densité spectrale d'énergie très inférieur à  $\frac{1}{|f|}$  et  $a$  est l'échelle de la décomposition.

Le scalogramme est défini comme étant le carré du module de la TO, c'est à dire  $|W(t, a)|^2$ . C'est une distribution d'énergie temps-échelle [14]. En considérant que les représentations temporelle et fréquentielle de l'ondelette mère sont concentrées autour, respectivement, 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  $a = \frac{f_0}{f}$ .

Le scalogramme obéit également au principe d'incertitude d'Heisenberg-Gabor, malgré son caractère multi-résolution ; la résolution temporelle s'améliore et la résolution fréquentielle se dégrade pour les termes hautes fréquences. Par ailleurs, l'inconvénient majeur de la TO vient d'absence de critère de choix sur le type d'ondelette mère à utiliser.

### 2.3 Distributions temps-fréquence quadratiques

Pour remédier aux inconvénients du spectrogramme et du scalogramme, des distributions temps-fréquence quadratiques ont été proposées [15]. Ces distributions permettent une meilleure résolution temps-fréquence car elles ne sont pas contraintes par le principe d'incertitude d'Heisenberg-Gabor. La distribution de Wigner-Ville (DWV), qui peut être interpréter 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 comme suit (6) [16].

$$W_x(t, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x\left(t + \frac{\tau}{2}\right) x^*\left(t - \frac{\tau}{2}\right) e^{-j2\pi f\tau} d\tau \quad (6)$$

Cette expression peut être interprété comme étant la transformée de Fourier du Kernel  $K_x(\tau, t)$  défini par (7).

$$K_x(\tau, t) = x\left(t - \frac{\tau}{2}\right) x^*\left(t + \frac{\tau}{2}\right) \quad (7)$$

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 [16]. De plus, elle produit des interférences externes appelées "cross-terms" dans le cas de signaux multi-composants à cause de sa non-linéarité.

En pratique, une version lissée de la DVW est souvent préférée. Elle est nommée la distribution de Wigner-Ville lissée et définie par (8).

$$W_x(t, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} p(\tau) x\left(t + \frac{\tau}{2}\right) x^*\left(t - \frac{\tau}{2}\right) e^{-j2\pi f\tau} d\tau \quad (8)$$

Où  $p(\tau)$  est la fenêtre de lissage qui permet de réduire l'amplitude des termes d'interférences.

Les techniques mentionnées ci-dessus représentent la distribution énergétique du signal dans le plan temps-fréquence (ou temps-échelle). Elles sont toutes une convolution temps-fréquence, temps-échelle d'un noyau avec la distribution de Wigner-Ville (Classe de Cohen, Classe de Rioul-Flandrin).

### 2.4 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 IMF (Intrinsic Mode Function), Huang et al. [17] ont proposé une technique empirique appelée EMD (Empirical Mode Decomposition). La transformée d'Hilbert quant à elle permet de calculer le signal analytique des IMFs et ainsi déduire la fréquence instantanée et l'enveloppe complexe des IMFs. Le théorème de Bedrosian, traitant de la transformée d'Hilbert [18] 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 se compose de 3 étapes :

- Les IMFs sont extraites du signal original grâce à l'EMD dont l'algorithme est décrit dans [19] ;
- La transformée d'Hilbert est appliquée sur les IMFs ;
- L'extraction de l'enveloppe complexe et de la fréquence instantanée.

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 Hilbert par une démodulation basée sur l'opérateur d'énergie de Teager-Kaiser [20].

### 3. Résultats de simulation

Dans cette section, Les performances des techniques mentionnées ci-dessus sont analysées. Pour évaluer ces performances, nous utiliserons un modèle de circuits électriques magnétiquement couplés.

#### 3.1 Simulation de la génératrice asynchrone en présence de défauts

Pour la majorité des défauts, le contenu harmonique des courants statoriques peut être approximé par des modèles linéaires de la machine asynchrone. La méthode des circuits magnétiques couplés permet ainsi d'établir un tel modèle électromécanique. La détermination du modèle de la machine asynchrone est basée sur un certain nombre d'hypothèses dont les principales sont citées ci-dessous :

- Les tôles magnétiques sont de perméabilité infinie ;
- Le circuit magnétique est non conducteur ;
- Les pertes par hystérésis dans les tôles du circuit magnétique sont négligeables.

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.

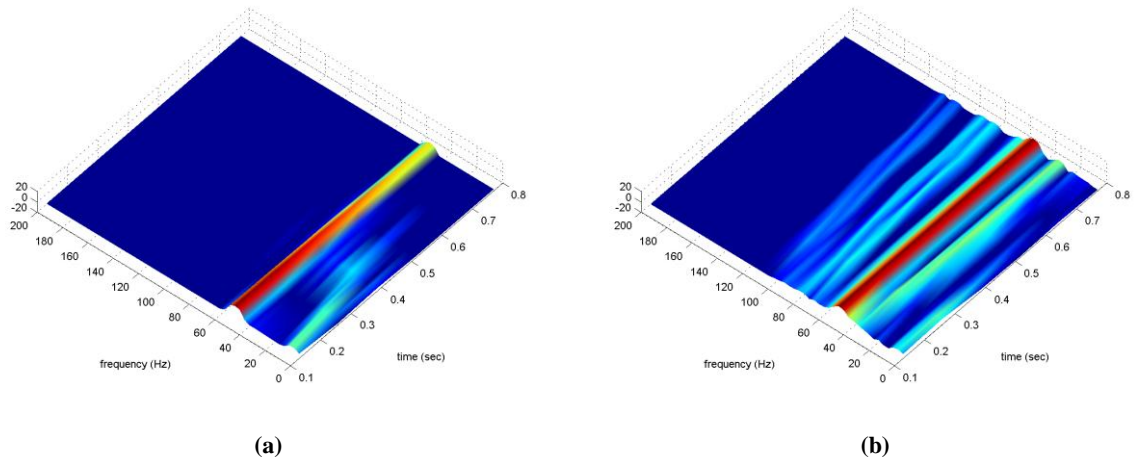
Les équations différentielles régissant l'évolution des grandeurs électriques et mécaniques de la machine asynchrone dans l'espace des phases sont générées à partir des connaissances sur la géométrie de la machine (caractéristiques des bobinages, formes d'encoches statoriques et rotoriques, les éléments 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 [12]. Cette méthode de calcul permet d'obtenir des coefficients de mutuelles symétriques quel que soit l'état de la machine, ce qui est en accord avec l'interprétation physique des mutuelles inductances. Ce modèle est utilisé pour générer les courants statoriques de la génératrice asynchrone en fonctionnement à vitesse variable dans le cas sain et le cas défaillant. Dans le cadre de cet article et pour illustrer notre analyse comparative, nous nous intéressons aux cassures de barres rotoriques qui 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.

Des signaux de simulations de 1-sec ont été échantillonnés à une fréquence de 1-kHz et ont été générés en simulant une génératrice asynchrone de 4-kW à 1 paire de pôle connectée à un réseau triphasé puissant et fonctionnant en régime nominal.

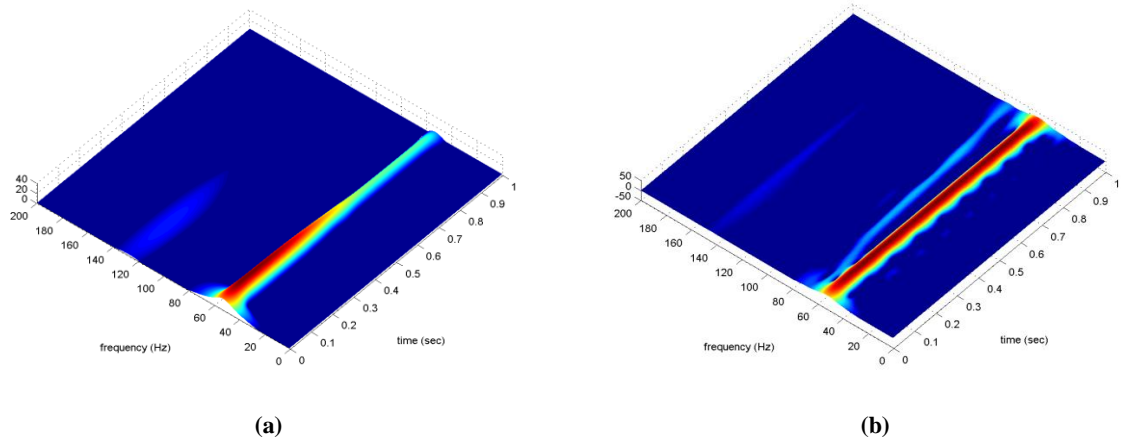
#### 3.2 Représentation et analyses

Les représentations ont été implémentées en utilisant la Toolbox Temps Fréquence sous Matlab [21] sauf pour la THH qui a été réalisée en utilisant l'algorithme de G. Rilling sous Matlab [19]. 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 chapeau mexicain. La fenêtre choisie pour le lissage de la distribution de Wigner-Ville est celle de Hamming. La distribution de Wigner-Ville a été appliquée à un signal analytique. Les paramètres de l'EMD sont similaires à ceux utilisés dans [17]. L'analyse de la Figure 1 révèle que le spectrogramme permet de visualiser la signature de la défaillance de la génératrice sur les courants statoriques. La signature fréquentielle du défaut est visible, mais la résolution temporelle et fréquentielle reste faible. Le scalogramme des signaux simulés est donné sur la Figure 2. On constate que cette approche multi-résolution permet une meilleure discrimination du cas défaillant que le spectrogramme. L'analyse de la Figure 3 montre que la distribution Pseudo Wigner-Ville présente une résolution temps-fréquence meilleure que les techniques précédentes. Néanmoins, la distribution de Wigner-Ville introduit des termes d'interférences qui peuvent erronés la détection. La Figure 4 montre la transformée d'Hilbert-Huang du courant statorique. Dans le cas d'une cassure de barres rotoriques, le signal semble être modulé en fréquence. En effet, la fréquence instantanée de la composante à 50 Hz présente une variation dans le temps.

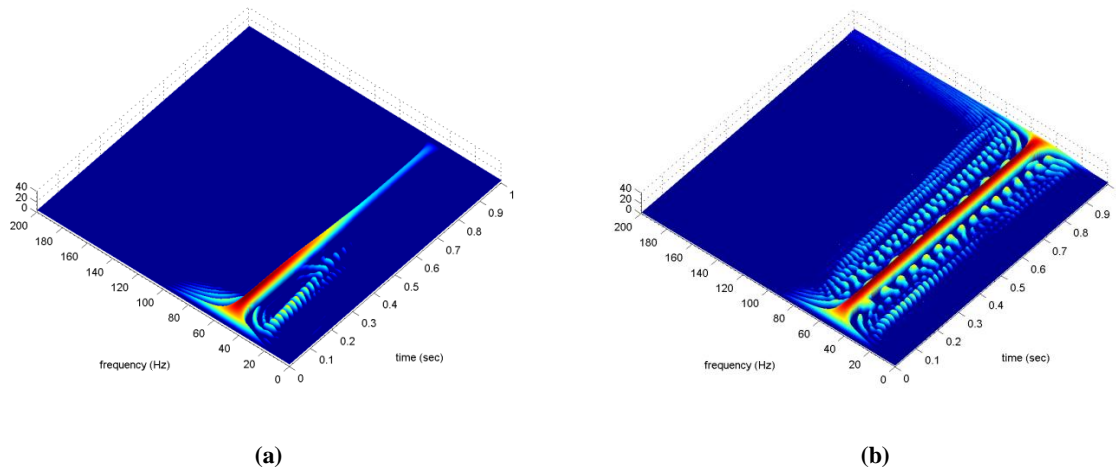


**Figure 1 : Spectrogramme (a) génératrice saine et (b) 2 barres cassées**

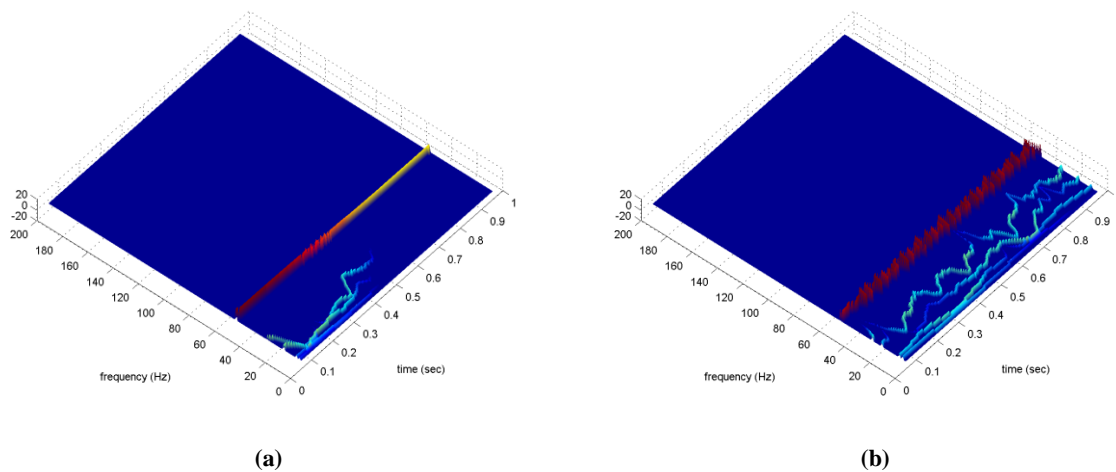


**Figure 2 : Scalogramme (a) génératrice saine et (b) 2 barres cassées**





**Figure 3 : Distribution de Wigner-Ville (a) génératrice saine et (b) 2 barres cassées**



**Figure 4 : Transformée d'Hilbert-Huang (a) génératrice saine et (b) 2 barres cassées**

### 3.3 Discussions

L'analyse globale des résultats (Figures 1 à 4) montre que l'ensemble des techniques étudiées permet de détecter la présence des défaillances dans un contexte non-stationnaire. Cependant, les temps de calcul de ces techniques diffèrent largement suivant la complexité de la 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 sain et défaillant est de l'ordre de 0.011-sec. Le scalogramme présente une résolution multiple. Cependant, son temps de calcul est nettement élevé (4.62-sec pour chaque cas). Ce temps de calcul peut être un handicap quand à l'implémentation en temps réel de la technique. 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 qui reste supérieur à celui du spectrogramme (0.12-sec dans chaque cas). Enfin, La transformée d'Hilbert-Huang présente un bon compromis entre performances et temps de calcul en comparaison avec les techniques antérieures (0.29-sec dans le cas défaillant et 0.15 dans le cas sain). Le tableau 2 synthétise alors les éléments clés de notre analyse comparative.

**Tableau 2. Performances des techniques d'analyse non-stationnaire**

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

Les représentations temps-fréquence sont des outils compliqués, coûteux en temps de calcul et demandent 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 faudrait extraire des paramètres à partir de ces représentations pour obtenir une mesure 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) [22]. Ces techniques de reconnaissance de formes seront l'objet de nos futurs travaux.

Les techniques de démodulation, tels que la transformée de Concordia [23], la transformée d'Hilbert [24] et l'Analyse en Composantes Principales [25], peuvent être une alternative à ces techniques de temps-fréquence. En effet, plusieurs études récentes ont démontrées que les défauts introduisent des modulations d'amplitude et/ou de fréquence sur les courants statoriques [26-29]. La sévérité du défaut est proportionnelle à l'index de modulation et par conséquent il suffira d'estimer les index de modulation à partir des signaux démodulés pour se renseigner sur l'état de la génératrice. Ces techniques ont déjà fait objet d'une étude approfondie dans notre unité de recherche et seront synthétisées dans des travaux à venir.

#### 4. Conclusion

L'étude présentée dans cet article analyse les performances des techniques temps-fréquence, temps-échelle pour le diagnostic des défauts dans une génératrice asynchrone. Cette étude fournit une comparaison de ces techniques pour la visualisation de la signature fréquentielle des cassures de barres en régime transitoire. Les résultats obtenus en simulation dans le cas d'une génératrice asynchrone indiquent que toutes les techniques permettent de visualiser les défaillances. Cependant leur résolution temps-fréquence ainsi que leur coût calculatoire peuvent varier significativement suivant la méthode utilisée. Pour réaliser la détection, une étape supplémentaire est nécessaire. Elle consiste à extraire, à partir de ces représentations du signal, des critères qui permettront de décider quand à l'existence et la sévérité d'un défaut. Des études expérimentales vont également être réalisées pour conforter les résultats obtenus par simulation sur un banc d'émulation d'une éolienne. Plus particulièrement, le caractère non-stationnaire, dû au profil du vent dans les systèmes à vitesse variable ou au caractère fugitif de certaines défaillances, va être mis en relief dans le but de proposer des outils fiables et sûrs pour la détection et le diagnostic des défaillances des génératrices dans les systèmes éoliens.

#### Références

- [1] S. Faulstich, B. Hahn and P.J. Tavner, "Wind turbine downtime and its importance for offshore deployment," *Wind Energy*, DOI: 10.1002/we.421, July 2010.
- [2] A. Kusiak and W. Li, "The prediction and diagnosis of wind turbine faults," *Renewable Energy*, vol. 36, n°1, pp. 16-23, January 2010.
- [3] C.S. Gray and Simon J. Watson, "Physics of failure approach to wind turbine condition based maintenance," *Wind Energy*, DOI: 10.1002/we.360, August 2010.
- [4] S. Benelghali, M.E.H. Benbouzid and J.F. Charpentier, "Marine tidal current electric power generation technology: State of the art and current status," in *Proceedings of the IEEE IEMDC'07, Antalya (Turkey)*, vol. 2, pp. 1407-1412, May 2007.
- [5] Y. Amirat, V. Choqueuse and M.E.H. Benbouzid, "Condition monitoring of wind turbines based on amplitude demodulation," in *Proceedings of the IEEE ECCE'10, Atlanta (USA)*, pp. 2417-2421, September 2010.
- [6] Y. Amirat, M. Benbouzid, E. Al-Ahmar, B. Bensaker and S. Turri, "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.

- [7] W.T.Thomson and M.Fenger, "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.
- [8] J. Cusido, L. Romeral, J.A. Ortega, J.A. Rosero, and A.G. Espinosa, "Fault detection in induction machines using power spectral density in wavelet decomposition," IEEE Trans. Industrial Electronics, vol. 55, n°2, pp. 633-643, February 2008.
- [9] J.A. Antonio-Daviu, M. Riera-Guasp, J. Folch, and M.P.M. Palomares, "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, pp. 990-996, July/August 2006.
- [10] M. Blödt, J. Regnier, and J. Faucher, "Distinguishing load torque oscillations and eccentricity faults in induction motors using stator current Wigner distributions," IEEE Trans. Industry Applications, vol. 45, n°6, pp. 1449-1456, November/December 2009.
- [11] J.A. Antonino-Daviu, M. Riera-Guasp, M. Pineda-Sanchez, and R.B. Pérez, "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, pp. 1794-1803, September/October 2009.
- [12] G. Houdouin, G. Barakat, B. Dakyo, E. Destobbeleer and C. Nichita, "A Coupled magnetic circuit based global method for the simulation of squirrel cage induction machines under rotor and stator faults", in Proceedings of ELECTRIMACS'02, Montreal (Canada), August 2002.
- [13] N. Thirion-Moreau et P. Y. Arquès, Analyse Temps Fréquence Linéaires et Quadratiques, Techniques de l'Ingénieur, Traité Télécoms.
- [14] P. Flandrin, Time Frequency/Time-Scale Analysis. San Diego, CA: Academic, 1999.
- [15] L. Cohen, "Time-frequency Distributions - A review," Proceeding of the IEEE, vol. 77, pp. 941-981, July 1989.
- [16] W. Mecklenbräuker and F. Hlawatsch, Eds., The Wigner Distribution: Theory and Applications in Signal Processing. Amsterdam, The Netherlands: Elsevier, 1997.
- [17] N. Huang, Z. Shen, S. Long, M. Wu, H. Shih, Q. Zheng, N. Yen, C. Tung, and H. Liu, "The empirical mode decomposition and Hilbert spectrum for nonlinear and nonstationary time series analysis," Proc. Roy. Soc. London, vol.454, pp.903-995, 1998.
- [18] B. Picinbono, "On instantaneous amplitude and phase of signals," IEEE Trans. Signal Processing, vol. 45, n°3, pp. 552-560, March 1997.
- [19] G. Rilling, P. Flandrin, and P. Goncalves, "On empirical mode decomposition and its algorithms," in Proceedings of the IEEE/EURASIP Workshop on Nonlinear Signal and Image Processing, Grado (Italy), July 2003.
- [20] J.C. Cexus, "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.
- [21] F. Auger, P. Flandrin, P. Goncalves, and O. Lemoine, "Time-frequency toolbox, for use with Matlab," CNRS, GDR ISIS, Tech. Rep., 1997.
- [22] S. Theodoridis and K. Koutroumbas, *Pattern Recognition*. Elsevier Academic Press, 2003.
- [23] I.Y. Onel and M.E.H Benbouzid, "Induction motor bearing failure detection and diagnosis: Park and Concordia transform approaches comparative study, IEEE/ASME Trans. Mechatronics, vol. 13, n°2, pp. 257-262, April 2008.
- [24] B. Trajin, M. Chabert, J. Regnier, and J. Faucher, "Hilbert versus concordia transform for three phase machine stator current time-frequency monitoring," Mechanical Systems & Signal Processing, vol. 23, n°8, pp. 2648-2657, 2009.
- [25] J.F. Martins, V.F. Pires, and A.J. Pires, "Unsupervised neural-networks-based algorithm for on-line diagnosis of three-phase induction motor stator fault," IEEE Trans. Industrial Electronics, vol. 54, n°1, pp. 259-264, February 2007.
- [26] M. Blödt, M. Chabert, J. Regnier, J. Faucher, and B. Dagues, "Detection of mechanical load faults in induction motors at variable speed using stator current time-frequency analysis," in Proceedings of the IEEE SDEMPED'05, Vienna (Austria), pp. 1-6, September 2005.
- [27] G. Salles, F. Filippetti, C. Tassoni, G. Grellet, and G. Franceschini, "Monitoring of induction motor load by neural network," IEEE Trans. Power Electron., vol. 15, n°4, pp. 762-768, Jul. 2000.

- [28] S. F. Legowski, A. H. M. S. Ula, and A. M. Trzynadlowski, "Instantaneous power as a medium for the signature analysis of induction motors," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 32, n°4, pp. 904-909, Jul./Aug. 1996.
- [29] W.T. Thomson, "on-line current monitoring to detect electrical and mechanical faults in three-phase induction motor drives," in *Proceedings of the International Conference on Life Management of Power Plants*, Edinburgh (UK), pp. 66-73, December 1994.