

Analyse fine de la fréquence de rotation d'un organe tournant.

Cécile CAPDESSUS, Edgard SEKKO, Ouafae SABONI.

Laboratoire de Physique Electronique de Chartres
IUT de Chartres
1, place Mendès France
28000 CHARTRES
{Cecile.Capdessus, Edgard.Sekko, Ouafae.Saboni}@univ-orleans.fr.

Résumé.

Dans l'industrie, l'analyse des vibrations de machines est de plus en plus utilisée pour la maintenance. La plupart des machines surveillées ayant des mouvements périodiques, (engrenages, roulements, moteurs...), les vibrations qu'elles émettent sont également à caractère périodique. Il est indispensable pour la mise en œuvre de certaines méthodes de diagnostic de connaître avec précision la fréquence de rotation des organes à diagnostiquer. Les capteurs utilisés pour mesurer cette vitesse délivrent un signal périodique à une fréquence multiple de celle recherchée. Cependant, les conditions de fonctionnement n'étant pas idéales, non plus que les caractéristiques du capteur, ce signal présente des fluctuations aléatoires qui peuvent nuire à la détermination précise de la fréquence fondamentale. Dans cet article, nous présentons une méthode de détermination de cette fréquence qui utilise le caractère aléatoire du signal pour optimiser la précision. Les performances de cette méthode sont comparées à celles des méthodes classiques d'analyse spectrale.

Mots clés : maintenance prédictive, analyse vibratoire, analyse spectrale, cyclostationnarité.

Introduction.

Cette étude s'inscrit dans le cadre de la maintenance préventive des machines tournantes par analyse vibratoire. L'analyse des vibrations est de plus en plus utilisée pour la détection précoce de défauts sur les machines : machines de production sur site, test de boîtes de vitesse en sortie de chaîne de fabrication, diagnostic d'organes tournants en cours d'utilisation (boîtes de vitesse d'hélicoptères, réacteurs d'avions...). L'avantage de ce type de tests est qu'ils peuvent être conduits pendant le fonctionnement normal du dispositif et permettent d'en planifier les arrêts, ainsi que de prévenir des pannes graves.

Les vibrations produites par les machines tournantes, du fait de la périodicité des phénomènes mécaniques, électromagnétiques ou aérodynamiques qui les génèrent, présentent également un caractère périodique. De ce fait, nombre de méthodes permettant de les diagnostiquer sont basées sur des analyses statistiques périodiques, ou analyses cyclostationnaires : moyennage synchrone lorsqu'il s'agit d'une étude à l'ordre un, corrélation et cohérence spectrale lorsqu'il s'agit d'une étude à l'ordre deux. A cet effet, il est indispensable de déterminer avant l'application de tels traitements les fréquences de rotations des organes à diagnostiquer avec la plus grande précision possible.

Notre étude porte sur la détermination de la fréquence de rotation d'un axe à partir d'un signal électrique délivré par une roue phonique. Ce signal est périodique mais non sinusoïdal, et présente un caractère aléatoire qui le rend cyclostationnaire.

Dans un premier temps, nous montrons comment les méthodes traditionnelles d'analyse spectrale [2],[3],[4], à base de transformée de Fourier discrète ou de modèles paramétriques risquent de ne pas être adaptées pour une détermination automatique précise de cette fréquence. Dans un second temps, nous proposons une méthode, [1], basée sur les propriétés statistiques à l'ordre deux du signal. Cette approche présente par rapport aux méthodes classiques d'analyse spectrale des avantages concernant la précision et la simplicité de mise en œuvre, permettant d'envisager une procédure automatique.

1. Présentation des signaux réels et des signaux utilisés pour les simulations.

1.1 Signaux réels.

Dans le cas de notre étude, la machine étudiée est un turboréacteur double corps double flux qui présente deux arbres concentriques tournant à des vitesses différentes. Le signal permettant de déterminer la fréquence de rotation de l'axe le plus lent est délivré par une roue phonique placée sur l'arbre. Cet arbre tourne à une

fréquence que nous appellerons f_0 et la roue phonique qu'il supporte délivre un signal électrique périodique à une fréquence $30.f_0$. Une représentation temporelle de ce signal est donnée en figure 1 et un spectre logarithmique en figure 2.

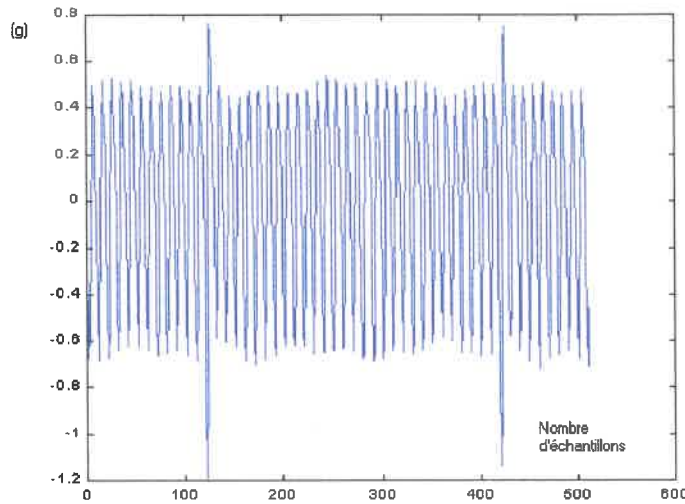


Figure 1. Représentation temporelle du signal régime.

Le principe de la roue phonique est le suivant : une roue dentée est placée sur l'arbre dont on veut mesurer la vitesse. Un capteur magnétique, placé sous la roue, délivre un signal électrique qui varie en fonction de la distance du capteur à la roue.

Le capteur délivre donc un signal périodique dont la fréquence est égale à la fréquence de rotation de l'axe multipliée par le nombre de dents de la roue. Notons que ce signal n'est pas sinusoïdal. La forme d'une période de signal dépend de la configuration du dispositif : forme des dents, caractéristiques du capteur. Le spectre du signal sera donc un spectre de raies dont l'enveloppe est déterminée par la forme d'une période du signal temporel. La raie la plus importante n'est donc pas toujours le fondamental. Remarquons aussi que ce signal peut subir de petites variations si l'arbre vibre ou ne présente pas un mouvement parfaitement circulaire, ou si la symétrie de la roue n'est pas parfaite.

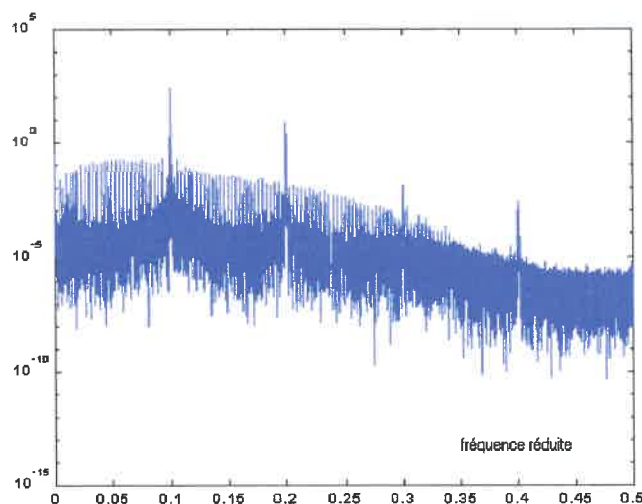


Figure 2. Spectre logarithmique du signal délivré par la roue phonique.

Le spectre logarithmique est une simple transformée de Fourier discrète appliquée à 32768 échantillons du signal. La FFT est calculée sur 131072 points, le signal étant complété par des échantillons nuls. Autant l'une que l'autre représentation révèle le caractère périodique de ces signaux. Sur les trente tops par tours que délivre le capteur, l'un est d'amplitude plus importante et permet de se recalculer sur une position angulaire donnée. Les

raies les plus importantes du spectre caractérisent les trente tops par tour, et les raies de plus faible amplitude sont des harmoniques directs de la fréquence de rotation.

Outre le caractère périodique de ces signaux, un zoom autour de l'une des raies en fréquence (figure 3) met en évidence également leur caractère aléatoire : chaque raie a en fait une certaine largeur de bande due à des fluctuations de la composante fréquentielle correspondante. Compte tenu du fait que les harmoniques appartenant à une même famille de raies (multiples du même fondamental) sont produits par un même phénomène physique, nous supposons que les fluctuations observées sur ces raies sont corrélées d'un harmonique à l'autre.

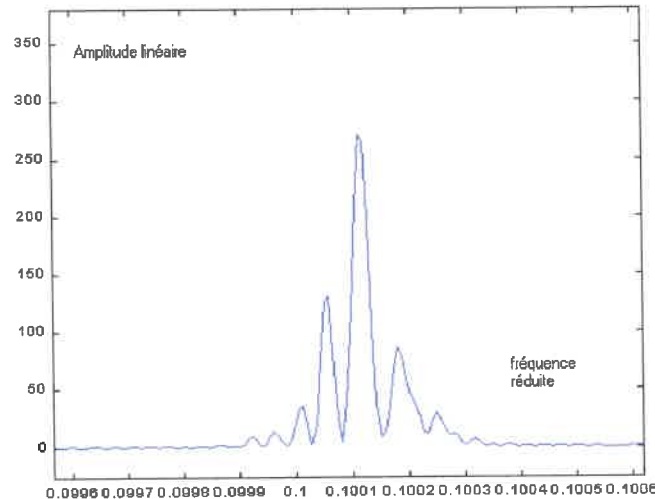


Figure 3. Zoom autour de l'harmonique le plus important du spectre.

En s'appuyant sur la nature de ces signaux, on peut s'orienter vers un éventail de méthodes qui devraient permettre de déterminer les fréquences recherchées. La nature harmonique des signaux nous oriente d'abord vers une analyse de Fourier, avec les méthodes classiques du périodogramme et du corrélogramme [4].

Connaissant les limites de ces méthodes, dues au compromis inévitable entre la résolution fréquentielle et la variance du résultat, nous nous sommes plutôt orientés vers les méthodes d'analyse spectrale dites « haute résolution ». Les méthodes que nous avons utilisées dans le cadre de cette application sont des méthodes paramétriques basées sur la modélisation AR. Cependant, l'utilisation de ces méthodes est délicate. Il est bien connu que leur efficacité dépend du bon choix de l'ordre du modèle. Aussi risquent-elles de s'avérer peu robustes lors d'une détermination automatique.

Eu égard aux inconvénients des méthodes paramétriques, nous avons mis en œuvre une nouvelle approche basée sur l'étude de la cyclostationnarité du signal à l'ordre deux, en particulier par l'utilisation de la cohérence spectrale.

Dans la suite, nous comparons les performances des différentes méthodes évoquées précédemment dans la perspective d'une détermination automatique en ligne des fréquences recherchées.

1.2 Signaux synthétiques.

En vue de comparer la précision que donnent les différentes méthodes, nous avons généré un certain nombre de signaux synthétiques de même type que le signal à traiter, mais dont nous connaissons les caractéristiques exactes. Toutes les simulations, ainsi que les traitements appliqués aux signaux réels, sont effectués à l'aide du logiciel MATLAB.

Le signal S_n^1 est somme de deux fréquences harmoniques (fondamental et harmonique d'ordre 2) modulées par un signal aléatoire à bande étroite.

$$S_n^1 = b_n \cdot [a_1 \cdot \cos(2\pi n f_1 + \varphi_1) + a_2 \cdot \cos(2\pi n f_2 + \varphi_2)]$$

où

$$f_1 = 0,10006$$

$$f_2 = 0,020012$$

$$a_1 = 42$$

$$a_2 = 1,8$$

$$\varphi_1 = 0,8164rad$$

$$\varphi_2 = -0,464rad$$

et b_n est un bruit blanc aléatoire filtré par un filtre passe-bas de fréquence de coupure $f_c = 0.001$. Le signal est généré sur 32768 échantillons et toutes les fréquences sont données en fréquence réduite.

Le signal S_n^1 , peu riche en harmoniques, permettra d'évaluer la capacité des méthodes évoquées à estimer la fréquence de ces raies. Nous utiliserons également un signal S_n^2 qui est la somme du signal S_n^1 et d'un second signal périodique simulant la composante à la fréquence de rotation.

$$S_n^2 = S_n^1 + S_n^{rot}$$

$$\text{avec } S_n^{rot} = \sum_{k=1}^K A_k \cdot \cos\left(2\pi n \left(\frac{k \cdot f_1}{30}\right) + \varphi_k\right)$$

où $K=100$ est le nombre d'harmoniques, les coefficients A_k sont les amplitudes de ces harmoniques (qui décroissent linéairement avec l'ordre des harmoniques) et les φ_k les phases (aléatoire, comprises entre 0 et 2π) de ces harmoniques.

2. Application aux signaux simulés des méthodes classiques d'analyse spectrale.

Chacune des méthodes sera appliquée au signal synthétique S_n^1 sur une durée de 32768 échantillons. Il est intéressant de comparer les performances respectives des différentes méthodes d'analyse spectrale pour un nombre donné d'échantillons. En effet, la machine à surveiller ne fonctionnant pas en régime constant, les phases de stabilisation du régime sont ponctuelles et de courte durée.

2.1 Analyse de Fourier.

La figure 4 montre le module de la FFT du signal calculé sur 131072 points dont 32768 échantillons de signal complétés par des zéros, sans moyennage ni fenêtre d'apodisation. Du fait de l'amplitude aléatoire du signal S_n^1 , son spectre ne présente pas de raies pures. Chaque raie a une certaine largeur de bande et il est difficile de déterminer dans quel canal de fréquence exactement tombe la fréquence porteuse. Pour améliorer la qualité du résultat, il vaut mieux estimer le spectre par une méthode prenant en compte le caractère aléatoire du signal.

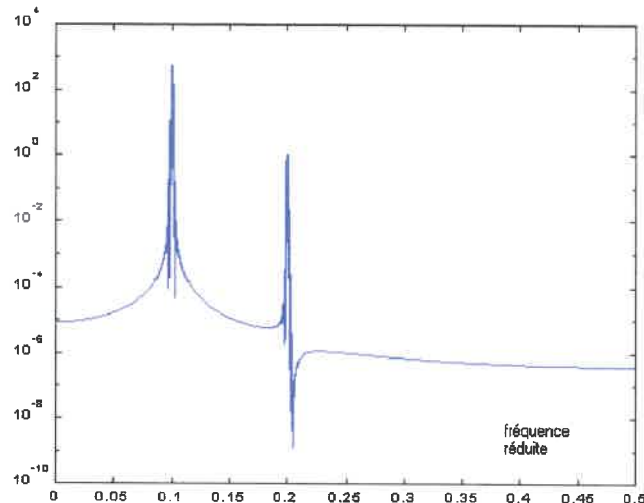


Figure 4. Spectre logarithmique du signal S_n^1

La figure 5 montre une estimation du spectre par la méthode de Welch, ou périodogramme moyenné. Selon le compromis classique résolution fréquentielle/variance de l'estimateur, on constate que le moyennage temporel, s'il nous permet de stabiliser le résultat, nous fait perdre en résolution.

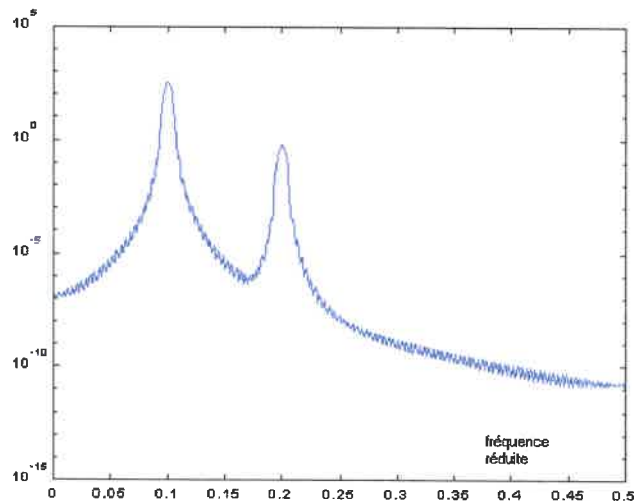


Figure 5. Spectre logarithmique du signal S_n^1 estimé par la méthode de Welch.

2. 2 Méthodes paramétriques.

Lorsqu'on dispose d'une séquence finie d'échantillons, il est possible d'étudier son contenu fréquentiel avec une précision supérieure à celle qu'offre la F.F.T. en utilisant des méthodes paramétriques. Le principe de ces méthodes est le suivant : si l'on arrive à trouver un modèle du signal, on est capable de générer à partir de ce modèle un signal synthétique ayant les mêmes propriétés fréquentielles que le signal réel dont on dispose, mais de durée supérieure, ce qui améliorera la résolution en fréquence. Le modèle choisi est un bruit blanc filtré par un filtre autorégressif dont on peut choisir l'ordre. Il s'agit ensuite de calculer les coefficients du filtre de façon à ce que le bruit filtré soit identique au signal initial.

Si l'on choisit pour calculer les coefficients du filtre d'imposer que l'autocorrélation du bruit filtré coïncide avec celle estimée du signal initial, on est conduit à résoudre un système d'équations linéaires plus communément appelées équations de Yule Walker (méthode Yule-AR) [2].

On peut aussi calculer ces coefficients en considérant que le filtre peut être utilisé pour prédire le signal à un instant donné en utilisant les échantillons aux N instants précédents (pour un filtre d'ordre N). La différence entre la valeur prédite du signal et sa valeur réelle est l'erreur de prédiction directe. La méthode de la covariance consiste à minimiser cette erreur de prédiction pour tous les échantillons dont on dispose.

Si l'on minimise conjointement l'erreur de prédiction directe et l'erreur de prédiction rétrograde (obtenue lorsqu'on estime un échantillon du signal à un instant donné en fonction des échantillons aux instants futurs), on obtient la méthode de Burg [3].

Ces méthodes n'offrent des résultats fiables que lorsque l'ordre du modèle (c'est à dire celui du filtre) est bien choisi. Sachant qu'une paire de pôles complexes conjugués va donner une raie sur le spectre du bruit filtré, il faut choisir pour ordre du filtre (et donc du modèle) le double du nombre de composantes fréquentielles contenues dans le signal.

La figure 6 montre les spectres estimés par les trois méthodes pour un modèle d'ordre 4.

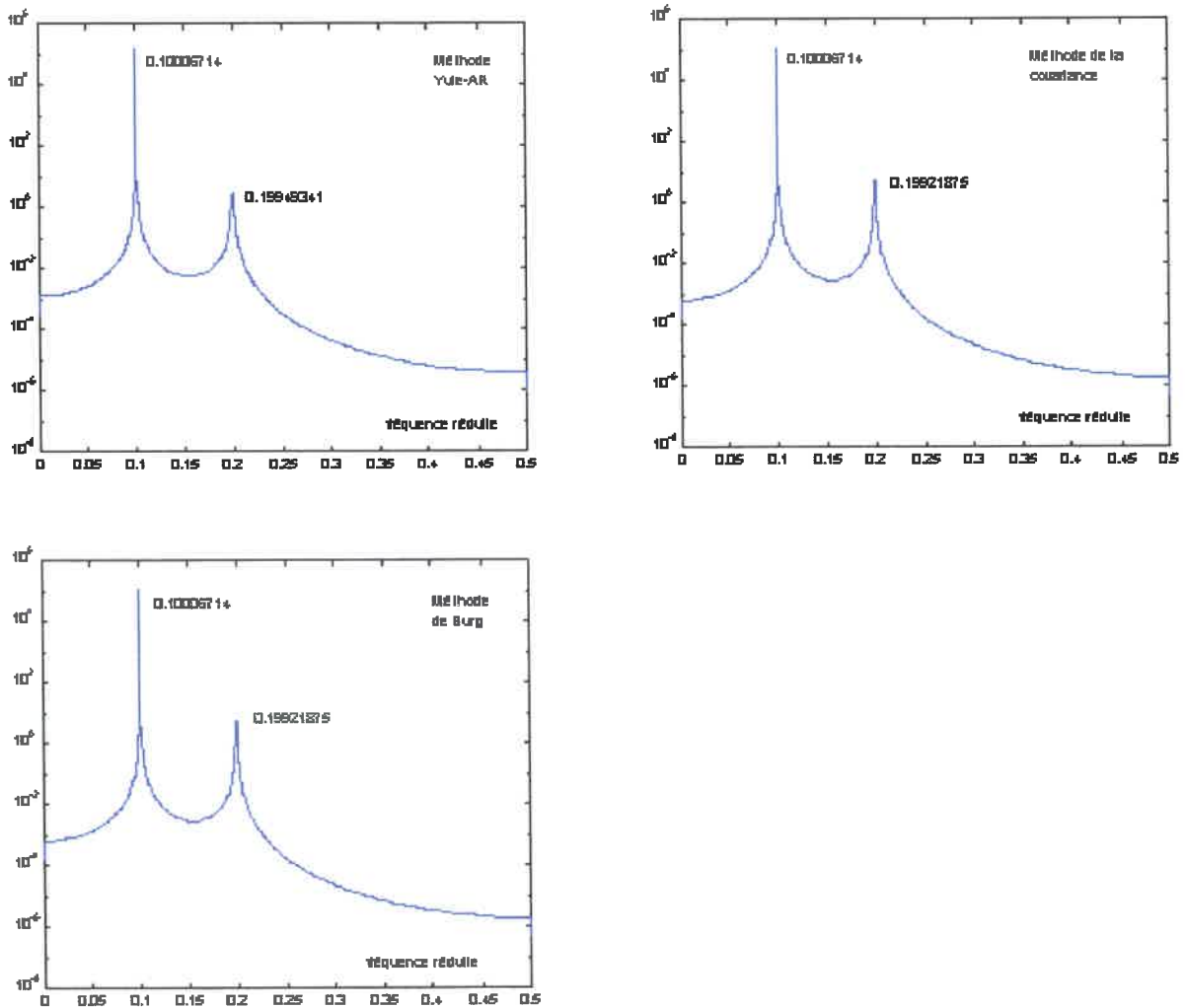


Figure 6. Spectre logarithmique du signal S_n^1 par les méthodes paramétriques (ordre 4)

Les trois spectres sont représentés en échelle logarithmique, ils ont été estimés chacun pour un ordre 4, et l'estimée du spectre est tracée sur 32768 points. A côté de chacune des deux raies détectées est inscrite la fréquence réduite de cette raie. On constate que le fondamental est détecté avec une excellente précision (0.100067 au lieu de 0.10006) tandis que l'erreur commise sur la fréquence de la seconde raie est plus importante (0.19922 au lieu de 0.20012). On obtient donc un bon résultat avec les méthodes paramétriques sur un signal synthétique dont le nombre d'harmoniques est connu exactement et pour la fréquence de l'harmonique le plus important.

La figure 7 montre le spectre estimé dans les mêmes conditions pour la méthode Yule_AR sur le signal S_n^2 . Ce signal correspond mieux au signal réel puisqu'il comprend une composante à la fréquence de rotation, c'est à

dire à une fréquence trente fois moins élevée que celle des deux harmoniques principaux. Cette composante présente des harmoniques d'amplitude moins élevée mais s'étalant sur presque tout le spectre.

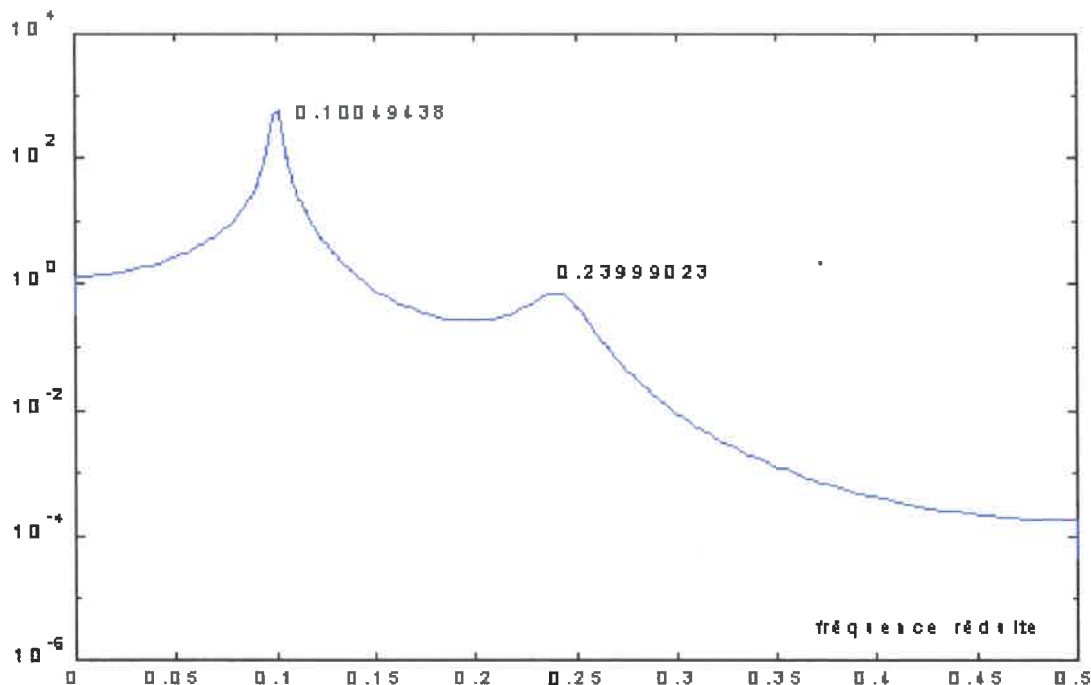


Figure 7. Spectre logarithmique du signal S_n^2 par les méthodes paramétriques (ordre 6)

Sur le signal S_n^2 le choix de l'ordre du modèle devient problématique, à cause du grand nombre d'harmoniques introduits par le phénomène de rotation. Un certain nombre d'essais avec des ordres différents montre que le résultat le plus réaliste est obtenu avec un ordre 6. La méthode parvient alors à détecter deux raies principales, mais leur fréquence ne correspond plus du tout aux fréquences réelles des deux raies recherchées. On observe des résultats similaires avec les méthodes de Burg et de la covariance.

Notre conclusion sur ces méthodes est que pour les utiliser dans le contexte qui nous intéresse, il convient de procéder en trois étapes :

- Détermination approximative de la fréquence recherchée, par une méthode de type Fourier.
- Filtrage du signal autour de cet harmonique de façon à éliminer toutes les composantes aux autres fréquences.
- Application d'une méthode haute résolution au signal filtré, avec un ordre deux, puisque celui-ci ne contient plus qu'une composante fréquentielle.

3. Présentation de la cohérence spectrale, application aux signaux synthétiques, comparaison des performances.

3.1 La cohérence spectrale.

Comme nous l'avons énoncé auparavant, notre objectif est de trouver la fréquence de la roue phonique. Cette fréquence peut être aussi évaluée en recherchant la fréquence du fondamental du spectre du signal. La méthode utilisée à cette fin est la cohérence spectrale. La cohérence spectrale étant une normalisation de la corrélation spectrale, nous rappelons d'abord en quoi consiste la corrélation spectrale. Ensuite nous introduisons la cohérence spectrale et présentons comment cette méthode est utilisée dans le cas de notre problème.

La corrélation spectrale relative à un couple (f, α) pour un signal $x(t)$ est donnée par :

$$S_X^\alpha(f) = E \left\{ X\left(f + \frac{\alpha}{2}\right) X^*\left(f - \frac{\alpha}{2}\right) \right\}$$

E : Espérance mathématique

$$X(f) = \mathbf{TF}(x(t))$$

α : fréquence cyclique.

Ainsi si deux composantes $X(f_a)$ et $X(f_b)$ sont corrélées, $S_X^\alpha(f_b)$ sera non nul pour $\alpha = f_b - f_a$.

Lorsque le signal étudié comporte des composantes fréquentielles de faible énergie relativement au niveau global du spectre, la corrélation spectrale sera faible quand bien même ces composantes seraient liées. Il pourrait donc en résulter une interprétation erronée. Pour pallier cette déficience, une version normalisée de la corrélation spectrale a été introduite. Il s'agit de la cohérence spectrale.

La cohérence spectrale pour un couple (f, α) est donnée par :

$$C_X^\alpha = \frac{E \left\{ X\left(f + \frac{\alpha}{2}\right) X^*\left(f - \frac{\alpha}{2}\right) \right\}}{\sqrt{E \left\{ \left| X\left(f + \frac{\alpha}{2}\right) \right|^2 \right\} E \left\{ \left| X\left(f - \frac{\alpha}{2}\right) \right|^2 \right\}}}$$

Des composantes fréquentielles fortement corrélées apparaîtront nettement dans la cohérence spectrale avec une valeur proche de 1 alors qu'elles auraient été masquées dans la corrélation spectrale.

L'application de la cohérence spectrale à notre problème revient à rechercher l'existence d'une famille de composantes fréquentielles dont les fréquences associées constituent un ensemble de fréquences harmoniques.

3. 2 Application aux signaux synthétiques.

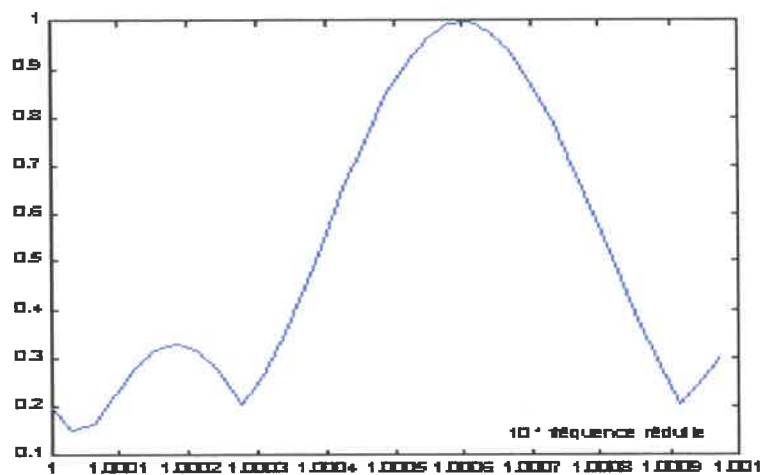


Figure 8. Maximum de la cohérence spectrale du signal S_n^1 pour différentes valeurs de la fréquence cyclique.

La figure 8 représente la valeur maximale de la cohérence spectrale en fonction de la fréquence cyclique. La cohérence spectrale a été estimée sur 32768 échantillons pour chaque valeur de la fréquence cyclique. La fréquence cyclique varie de 0.1 à 0.1001 en fréquence réduite par pas de $1/(10 \cdot 32768)$. Pour chaque courbe obtenue, on a relevé le maximum de la cohérence spectrale, la fréquence cyclique pour laquelle ce maximum

apparaît, et les fréquences des deux harmoniques corrélés. On voit qu'une forte cohérence apparaît pour la fréquence cyclique 0.10006, et les relevés effectués indiquent que cette cohérence révèle la présence d'un lien statistique fort entre les deux harmoniques présents dans le signal. Ce qu'on estime n'est donc pas la fréquence de l'un des deux harmoniques, mais la distance en fréquence entre ces deux harmoniques, qui est la valeur du fondamental, ou la fréquence recherchée. Cette fréquence est déterminée avec une précision supérieure à celle qu'offraient les autres méthodes.

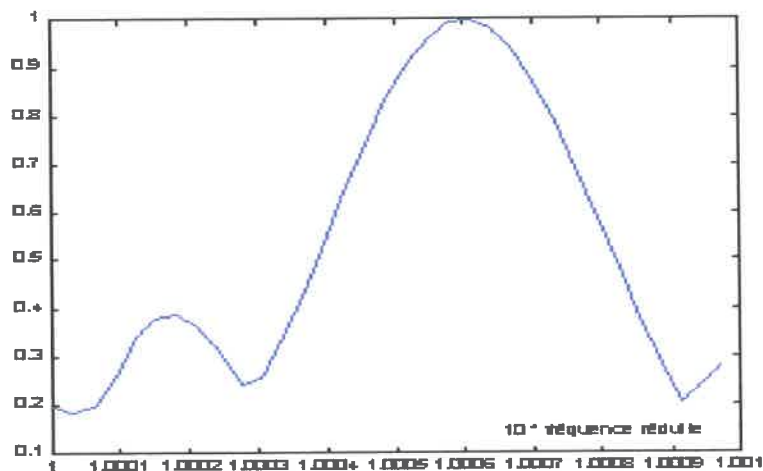


Figure 9. Maximum de la cohérence spectrale du signal S_n^2 pour différentes valeurs de la fréquence cyclique.

La figure 9 montre la même courbe que celle présentée en figure 8, mais calculée cette fois sur le signal S_n^2 . On voit que la présence du signal de rotation ne perturbe pas l'estimateur. Le lien entre les deux harmoniques est détecté avec la même précision que sur le signal S_n^1 . Comme nous l'avons observé précédemment, en présence de raies "parasites", les méthodes paramétriques ou hautes résolutions semblent moins performantes.

IV – Application aux signaux réels.

A présent, afin de déterminer la fréquence régime N1 à partir du signal expérimental, nous avons retenu deux méthodes. La méthode Yule-AR et la méthode de la cohérence spectrale qui ont été appliquées à un échantillon de 32768 du signal expérimental. Les données expérimentales présentant un caractère confidentiel, nous présentons les fréquences des raies en fréquence réduite.

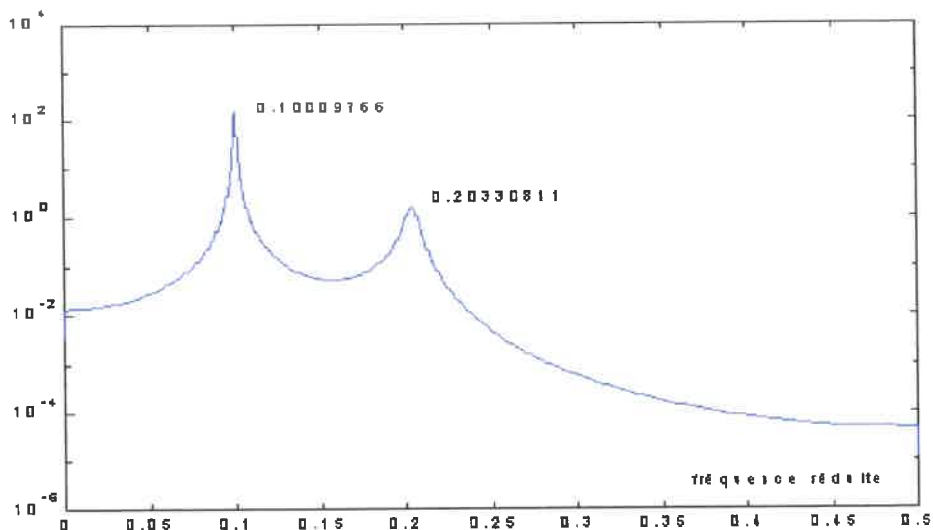


Figure 10. Spectre logarithmique du signal expérimental par la méthode de Yule AR (ordre 4)

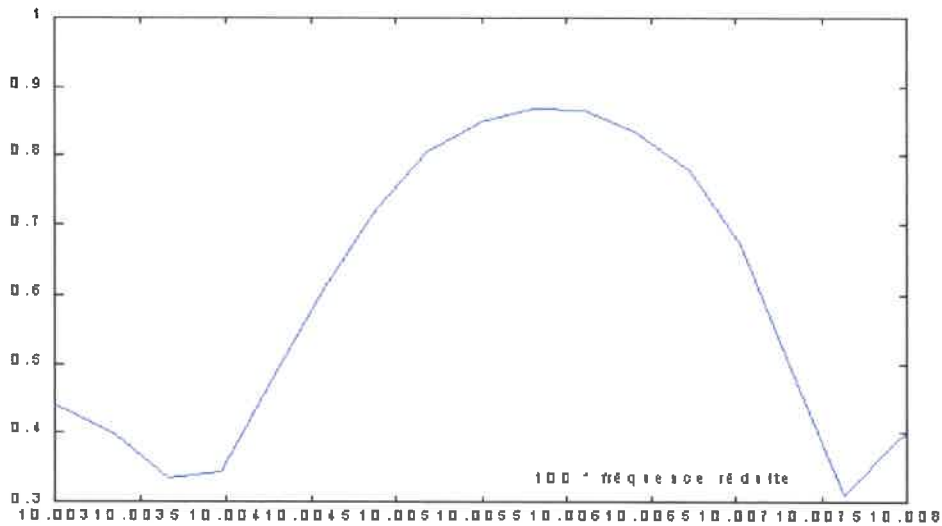


Figure 11. Maximum de la cohérence spectrale du signal expérimental pour différentes valeurs de la fréquence cyclique.

On constate sur la figure 11 que la cohérence spectrale présente un pic élevé pour une fréquence réduite de 0.10006, et que cette valeur de la fréquence réduite ne coïncide pas avec celle de la première raie détectée par la méthode haute résolution. Ayant appliqué des traitements aux signaux vibratoires en utilisant différentes valeurs de la fréquence de rotation, on a pu constater que la valeur de cette fréquence qui permet d'obtenir les meilleurs résultats est bien celle qu'on obtient à partir de la cohérence spectrale. Ceci vient du fait que cette méthode non seulement tient compte du caractère aléatoire des signaux, mais l'utilise même pour améliorer la qualité de l'estimation, puisque ce qu'on mesure est la corrélation entre les fluctuations des différents harmoniques. Ses bonnes performances s'expliquent donc par le fait qu'elle correspond bien à la nature des signaux.

V – Conclusion.

L'évaluation de la fréquence de rotation d'un axe à partir d'un signal délivré par une roue phonique nous a conduits à passer en revue quelques méthodes dédiées à ce problème. Après avoir montré les performances qu'offrent les méthodes paramétriques ou haute résolution, nous avons introduit une nouvelle approche consistant à l'adaptation de la méthode de la cohérence spectrale à notre problème. Son application aux signaux synthétiques nous a permis de mettre en évidence sa robustesse. C'est donc cette dernière approche que nous avons retenue pour la mise en œuvre d'un 'capteur' logiciel de détermination de la fréquence régime N1.

VI – Références bibliographiques.

- [1] Capdessus Cécile (1992), Aide au diagnostic des machines tournantes par traitement du signal, thèse de doctorat de l'INPG, Grenoble.
- [2] Marple S.C (1987), Digital Spectral Analysis, Englewood Cliffs, NJ : Prentice Hall.
- [3] Proakis J.G, Manolakis D.G (1996), Digital Signal Processing : Principles, Algorithms and Applications, Englewood Cliffs, NJ : Prentice Hall.
- [4] Welch P.B (juin 1967), The use of Fast Fourier Transform for the Estimation of Power Spectra : A method base on Time Averaging over short, Modified Peridograms, IEEE Trans.Audio Electroacoustic vol. AU-15.