



HAL
open science

Cohérence et cohérence spectrale: application à la modélisation de la propagation à travers des éléments tournants

Cécile Capdessus, Ouafae Saboni

► **To cite this version:**

Cécile Capdessus, Ouafae Saboni. Cohérence et cohérence spectrale: application à la modélisation de la propagation à travers des éléments tournants. 3ème conférence internationale sur les méthodes de surveillance et techniques de diagnostic acoustique et vibratoire, 1998, Senlis, France. hal-02188522

HAL Id: hal-02188522

<https://hal.science/hal-02188522>

Submitted on 19 Jul 2019

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.

COHERENCE ET COHERENCE SPECTRALE : APPLICATION A LA MODELISATION DE LA PROPAGATION A TRAVERS DES ELEMENTS TOURNANTS.

COHERENCE AND SPECTRAL COHERENCE : AN APPLICATION TO MODELLING OF THE PROPAGATION OF A WAVE THROUGH ROTATING ELEMENTS.

Cécile CAPDESSUS*, Ouafa SABONI*

* Laboratoire de Physique Electronique de Chartres, Université d'Orléans, IUT de Chartres, 1 place Mendès France, 28000 CHARTRES. Cecile.Capdessus@univ-orleans.fr.

RESUME

L'étude présentée dans cet article concerne les possibilités de diagnostic d'un roulement inter-arbre sur un turboréacteur. Le roulement inter-arbre ne présentant pas de palier fixe, sa surveillance doit être effectuée à partir de signaux reçus par des capteurs placés soit sur le carter du moteur, soit sur des roulements à palier fixe. La vibration produite par l'organe à diagnostiquer subit un certain nombre de modulations d'amplitude lors de sa propagation jusqu'aux capteurs, dues au passage à travers des éléments tournants. On montre comment la cohérence spectrale peut permettre de détecter sur les signaux disponibles les harmoniques dus à ces modulations successives, et de leur attribuer ainsi une origine physique. L'étude est illustrée par des résultats expérimentaux et la cohérence spectrale appliquée aux signaux réels met en évidence les modulations prévues par le modèle analytique des signaux. Nous montrons également comment la cohérence simple permet de déterminer dans quelle mesure les différents capteurs reçoivent la même information, ou des vibrations provenant d'organes différents. Une fois mis en évidence que deux capteurs reçoivent des informations différentes, on peut envisager pour effectuer le diagnostic d'utiliser des traitements inter-capteurs.

SUMMARY

This paper copes with the diagnosis of a bearing on a turbofan. This bearing is located between two rotating shafts, so that it has no fixed support where to put a sensor. The diagnosis should be performed using the signals delivered by sensors placed on the cover and on one of the fixed bearings. The paper presents a study of the propagation of the wave produced by the bearing to be diagnosed towards the available sensors. As this wave propagates through rotating elements, it undergoes several amplitude modulations. It is shown how spectral coherence may be used to detect these modulations on the signals collected from the sensors. Some experimental results are presented, which agree with our analytical model of the vibrations. In addition, coherence is applied to the same signals in order to know to what extent the information received by the different sensors is redundant. The analysis points out that depending on their situation on the turbofan, the sensors get information from different elements of the system. This lets us consider using cross-analysis methods to solve the problem of diagnosis.

I INTRODUCTION

La surveillance d'organes mécaniques par analyse de leurs vibrations est une méthode largement utilisée pour la maintenance prédictive des installations et systèmes. Du fait de la grande diversité des systèmes rencontrés, le nombre de méthodes de traitement du signal qu'on peut appliquer directement à cette surveillance sans connaissance a priori des signaux reste limité. De plus, même sur des systèmes fabriqués à l'identique, les vibrations ont souvent une allure différente, du fait des imperfections de la fabrication (déséquilibres et autres) et de l'historique de la machine. Aussi est-il important, lorsqu'on veut mettre en place un système de diagnostic efficace, d'analyser au préalable les vibrations émises par l'organe à surveiller et leur transmission à travers la machine jusqu'aux capteurs disponibles. L'étude des principaux organes mécaniques produisant des vibrations (engrenages et roulements) a permis la caractérisation des fréquences qu'ils émettent [6]. Lorsqu'on travaille sur un dispositif complexe, comme un turboréacteur, même si ces fréquences peuvent être calculées, on obtient tant de valeurs possibles, et une telle forêt d'harmoniques sur le spectre du signal réel, qu'il devient difficile de faire la synthèse entre les fréquences prévues et les fréquences observées. Nous présentons dans cet article une méthode utilisant la cohérence spectrale qui permet de déterminer plus aisément les phénomènes physiques à

l'origine de chaque raie du spectre. Cette méthode met notamment en évidence des modulations subies par le signal lors de sa propagation à travers des éléments tournants.

II - DESCRIPTION DU PROBLEME.

La machine étudiée est un turboréacteur dont les figures 1-a et 1-b donnent une représentation schématique. Ce turboréacteur comprend deux ensembles tournants composés chacun d'une série de compresseurs et de turbines. Ces deux ensembles tournent à des vitesses différentes que nous appellerons les régimes N1 pour l'ensemble basse pression (le plus lent) et N2 pour l'ensemble haute pression. Ces deux régimes sont liés par des phénomènes aérodynamiques difficiles à modéliser, et non par des phénomènes mécaniques. Il n'y a donc pas de relation simple entre N1 et N2.

Les vibrations du turboréacteur sont produites par différents phénomènes mécaniques (engrenages, roulements) et aérodynamiques (aubes). Les fréquences produites par ces différents éléments sont prévisibles lorsqu'on connaît les deux régimes. Sur la figure 1-a sont indiqués les différents roulements. Celui qui nous intéresse plus particulièrement est un roulement inter-arbre, ne comportant pas de palier fixe.

Les machines sont équipées de différents capteurs, certains montés en série, d'autres uniquement sur des machines d'étude. On peut donc disposer d'enregistrements effectués soit en vol, mais pour un nombre limité de capteurs, soit lors d'une expérimentation, pour un nombre plus important de capteurs. Les différents capteurs sont indiqués sur la figure 1-b. Il s'agit d'accéléromètres, à l'exception du capteur situé sur le roulement inter-arbre, qui est une jauge. Chaque capteur reçoit un mélange des différentes vibrations, qui ont chacune subi des transformations entre leur source et le capteur lors de leur propagation à travers la structure, et en particulier à travers des éléments tournants.

Le but final est de mettre en place un dispositif permettant de diagnostiquer le roulement inter-arbre à partir des signaux issus des seuls capteurs série. La mise en place d'un tel dispositif suppose une étude préalable comprenant l'analyse des vibrations produites par l'organe à diagnostiquer et de leur transmission jusqu'aux capteurs utilisés. Il faut également déterminer dans quelle mesure ces vibrations sont reçues sur le capteur, et par quels traitements on peut espérer les isoler (ou du moins isoler l'information qui nous intéresse) des vibrations produites par les autres organes. A cette fin, il est intéressant de déterminer si les différents capteurs disponibles reçoivent des vibrations issues des mêmes sources, ou si chaque capteur, selon sa situation, reçoit des informations particulières. Par ailleurs, il faut établir un critère permettant de prendre une décision concernant l'état du roulement.

L'étude que nous présentons ici se situe au niveau des premières analyses, celles qui concernent la nature des vibrations à la source, leur transmission à travers le turboréacteur, et la redondance d'information entre les différents capteurs. Les outils de traitement du signal que nous avons utilisés pour conduire cette analyse sont principalement la cohérence, qui permet d'étudier la redondance d'information entre les différents capteurs, et la cohérence spectrale, qui permet de mettre en évidence la présence de modulations lors de la transmission des vibrations à travers des éléments tournants.

III - COHERENCE ET COHERENCE SPECTRALE.

III - 1 Cohérence simple.

La cohérence est une mesure statistique dont on peut trouver la définition et les propriétés dans l'ouvrage [1]. Elle permet de mesurer, pour chaque fréquence, le degré de corrélation entre deux signaux. Son expression est donnée par :

$$C_{xy}(f) = \frac{E[X(f).Y^*(f)]}{\left(E[|X(f)|^2].E[|Y(f)|^2]\right)^{1/2}}$$

où $X(f)$ et $Y(f)$ désignent respectivement les transformées de Fourier de $x(t)$ et $y(t)$, $x(t)$ et $y(t)$ étant les deux signaux dont on veut mesurer le degré de corrélation. $E[...]$ désigne l'espérance mathématique, $E[|X(f)|^2]$ (resp.

$E[|Y(f)|^2]$ est donc la densité spectrale de puissance du signal $x(t)$ (resp. $y(t)$), et $E[X(f).Y^*(f)]$ la densité spectrale d'interaction des signaux $x(t)$ et $y(t)$.

La valeur de la cohérence spectrale est toujours comprise entre zéro et un. Une cohérence égale à zéro pour une fréquence donnée indique que les composantes des deux signaux à cette fréquence sont complètement décorrélées. Au contraire, une cohérence égale à un, pour cette fréquence indique que les composantes à cette fréquence sont totalement corrélées, ou encore que l'une des composantes peut être obtenue par filtrage linéaire et stationnaire de l'autre composante.

Ainsi, si deux capteurs reçoivent un signal de fréquence f n'ayant subi entre la source et chacun des capteurs qu'un filtrage linéaire et stationnaire, on trouvera à cette fréquence une cohérence entre les signaux issus des deux capteurs égale à un. Dans la pratique, on utilise un estimateur de la cohérence spectrale, compte tenu du fait qu'on travaille sur un signal de durée finie. On n'aura donc jamais des valeurs strictement égales à un ou à zéro. Cependant, selon la valeur de la cohérence, on peut avoir des renseignements intéressants sur l'information que reçoivent les différents capteurs.

La méthode d'estimation utilisée est celle du périodogramme moyenné, qui utilise la FFT (Fast Fourier Transform) [1].

III - 2 Cohérence spectrale.

La cohérence spectrale a d'abord été introduite par Hurd [2], puis largement étudiée par Gardner [3] dans le cadre d'une théorie non probabiliste. On trouve sa définition et ses propriétés dans le cadre probabiliste dans [5] et [1], et c'est sous cette forme que nous la retiendrons.

La cohérence spectrale asymétrique du signal $x(t)$ pour la fréquence cyclique α est donnée par (cf. [1]) :

$$C_x^\alpha(f) = \frac{E[X(f).X^*(f-\alpha)]}{\left(E[|X(f)|^2].E[|X(f-\alpha)|^2]\right)^{1/2}}$$

où $X(f)$ est la transformée de Fourier du signal $x(t)$ et $X(f-\alpha)$ la transformée de Fourier du même signal décalé en fréquence de α .

On voit sur cette expression que la cohérence spectrale est en fait une cohérence calculée entre un signal et ce même signal décalé en fréquence. Elle a donc les mêmes propriétés que la cohérence simple : elle est normée, donc comprise entre zéro et un, et peut s'interpréter de la même façon. Une cohérence spectrale proche de un à la fréquence f et pour une fréquence cyclique α indiquera une forte corrélation entre les composantes du signal $x(t)$ aux fréquences f et $f-\alpha$.

On peut la calculer pour différents décalages fréquentiels possibles. La fréquence de décalage est appelée fréquence cyclique, par opposition à la fréquence spectrale f qui apparaît dans la cohérence simple. Nous avons choisi d'estimer la cohérence spectrale par la méthode du périodogramme lissé, pour éviter certains problèmes de phase que pose l'estimateur par périodogramme moyenné. Ces problèmes, ainsi que l'algorithme du périodogramme lissé, sont décrits dans [4].

IV - SIGNAUX REELS. RESULTATS OBTENUS ET INTERPRETATION.

IV - 1 Modèle des signaux.

Le signal qui nous intéresse est une vibration produite au niveau du roulement inter-arbre, par un défaut situé sur la bague extérieure du roulement. On trouve une étude des vibrations produites par ce type de défaut dans [6]. Il s'agit de vibrations périodiques à la fréquence à laquelle les billes (ou galets) passent sur le défaut. Cette fréquence, que nous appellerons f_D , est donnée par :

$$f_D = \frac{Z}{2} \cdot |N_2 - N_1| \cdot \left(1 - \frac{d}{D_m} \cos \theta\right)$$

où Z est le nombre de galets du roulement, d le diamètre d'un galet, θ l'angle de contact et D_m le diamètre moyen des bagues externe et interne.

Le signal source est donc composé de chocs à cette fréquence, qui pourraient être symbolisés idéalement par des impulsions de Dirac, mais ont dans la pratique nécessairement une forme moins pure que celle d'un Dirac. Le spectre de ce signal est donc composé de raies aux fréquence f_D et ses harmoniques. L'enveloppe de ce spectre de raies est déterminée par la forme des impulsions.

Les résultats que nous allons présenter ont été obtenus à partir des signaux recueillis sur les capteurs C_{ext} et C_{int} qui sont montés en série sur la plupart des machines. La jauge n'est disponible que sur les moteurs d'étude et peut servir à vérifier que les vibrations à la source ont l'allure attendue. On peut prévoir, en étudiant la transmission des vibrations à travers la structure, quelle sera la nature du signal reçu par chacun de ces capteurs.

Signal reçu par le capteur C_{int} .

Le signal source traverse d'abord le roulement inter-arbre pour gagner sa bague interne et à travers le quel il subit une première modulation d'amplitude due au balourd (cf. [6]), périodique de fréquence N_2-N_1 (vitesse relative de l'arbre le plus rapide par rapport au plus lent). Après propagation à travers l'arbre tournant au régime N_1 , il traverse le roulement (1), à travers lequel il subit une autre modulation due au balourd, cette fois-ci périodique de fréquence N_1 .

On peut écrire l'expression de ce signal. Appelons $s_D(t)$ le signal à la source, $s_{N_2-N_1}(t)$ la première modulation et $s_{N_1}(t)$ la seconde modulation.

D'après [6] :

$$s_D(t) = A \cdot \sum_k a_k \cdot \cos(2\pi k f_D t + \varphi_D)$$

$$s_{N_2-N_1}(t) = 1 + \gamma \cdot \sum_m b_m \cdot \cos(2\pi m (N_2 - N_1)t + \varphi_{N_2-N_1})$$

où γ est le taux de modulation à travers le roulement inter-arbres.

$$s_{N_1}(t) = 1 + \lambda \cdot \sum_n c_n \cdot \cos(2\pi n N_1 t + \varphi_{N_1})$$

où λ est le taux de modulation à travers le roulement (1).

Le signal $s_{int}(t)$ reçu sur le capteur C_{int} a pour expression : $s_{int}(t) = s_D(t) \cdot s_{N_2-N_1}(t) \cdot s_{N_1}(t)$

Le spectre de ce signal est un spectre de raies dont l'amplitude est donnée par $\frac{A}{4} \cdot \gamma \cdot \lambda \cdot a_k \cdot b_m \cdot c_n$ et la fréquence par $k \cdot f_D \pm m \cdot f_{N_2-N_1} \pm n \cdot f_{N_1}$

Notons qu'outre la vibration produite par le défaut, C_{int} peut recevoir également les vibrations produites par les autres organes du turboréacteur, en particulier par le roulement (1) lui-même.

Signal reçu par le capteur C_{ext} .

Ce capteur n'étant pas placé directement sur le palier d'un roulement, mais sur le carter du turboréacteur, il est difficile de prévoir quelles sont les principales vibrations qu'il reçoit. L'analyse du signal livrera plus d'informations.

IV - 2 Traitement et analyse des signaux.

Les résultats expérimentaux présentés dans cet article ont été obtenus dans le cadre d'un stage ingénieur réalisé à la SNECMA [7]. Sur les diagrammes présentés dans cette partie les fréquences seront données en fréquence réduite (f/f_e , où f_e est la fréquence d'échantillonnage). L'expérience montre que les signaux qui nous intéressent

sont principalement situés dans une bande de fréquence qui va de 0.2 Hz à 0.3 Hz. Toute l'analyse a donc été conduite dans cette bande de fréquence.

La figure 2 donne une représentation temps-fréquence du signal prélevé sur la jauge de contrainte. Cette jauge étant placée sur la bague interne du roulement inter-arbres, on peut supposer qu'elle reçoit la vibration produite par le défaut après modulation par le signal $s_{N_2-N_1}(t)$. La mesure des fréquences observées sur ce diagramme confirme bien le modèle établi pour le signal $s_D(t)$, puisqu'on trouve trois harmoniques de la fréquence $f_{N_2-N_1}$ centrés sur la fréquence f_D .

Lorsqu'on observe cette représentation temps-fréquence du signal source, on voit que même une fois établi le régime permanent, les différentes composantes fréquentielles ne sont pas d'amplitude strictement constante. Nous pouvons modéliser ces fluctuations aléatoires en posant que l'amplitude A du signal source peut se décomposer en somme d'une constante A_c et une variable aléatoire centrée A_a .

On peut supposer que les fluctuations aléatoires de deux composantes fréquentielles (d'un même signal ou de signaux issus de capteurs différents) seront corrélées si les deux composantes ont la même origine physique, et décorrélées si leur origine physique est différente. Cette hypothèse est confirmée par la représentation temps-fréquence de la figure 2, sur laquelle on constate que les fluctuations d'amplitude des quatre harmoniques apparaissent corrélées.

C'est pourquoi la mesure du degré de corrélation entre les différents harmoniques va nous permettre d'étudier la transmission du signal à travers le turboréacteur.

En effet, si l'on mesure la cohérence entre les signaux issus de deux capteurs à une fréquence donnée, une cohérence élevée indiquera qu'à cette fréquence, les deux capteurs reçoivent une information issue du même phénomène physique. A l'inverse, une cohérence faible indiquera qu'à cette fréquence, il n'y a pas de redondance entre l'information reçue par les deux capteurs.

De même, une forte cohérence spectrale pour le couple de fréquences (f, α) indiquera que les harmoniques aux fréquences f et $f-\alpha$ sont issus du même phénomène physique. Ils peuvent par exemple avoir été obtenus par modulation d'un signal source par un signal périodique à la fréquence α .

Ainsi, d'une part l'application de la cohérence aux deux signaux issus des capteurs C_{int} et C_{ext} nous permettra de savoir si l'un apporte par rapport à l'autre une information originale. D'autre part l'application de la cohérence spectrale au signal issu du capteur C_{int} devrait mettre en évidence les modulations prévues par le modèle.

Il est à noter que comme les composantes fréquentielles des signaux observés ont une partie déterministe, la cohérence comme la cohérence spectrale ne pourront jamais présenter des valeurs proches de zéro. Un fort degré de corrélation des parties aléatoires se manifestera à la fréquence concernée par un pic approchant de un, mais un faible degré de corrélation de ces mêmes parties se manifestera par un « creux » ne descendant pas jusqu'à zéro. C'est pourquoi nous ne représenterons pas les cohérences de zéro à un, mais seulement dans le domaine où elles prennent leurs valeurs.

Les figures 3-a, 3-b et 3-c représentent la cohérence cyclique calculée sur $s_{int}(t)$ respectivement pour les fréquences cycliques N_2-N_1 , N_1 et N_2 . Chaque cohérence spectrale est représentée conjointement avec le spectre de puissance du signal $s_{int}(t)$. Les cohérences spectrales ont été estimées sur 32768 échantillons, avec une moyenne glissante sur 30 échantillons. Lorsqu'on observe un pic sur la cohérence spectrale à une fréquence f , cela signifie que la composante du signal à cette fréquence est corrélée avec la composante du signal à la fréquence $f-\alpha$, où α vaut N_2-N_1 , N_1 ou N_2 selon le diagramme observé. Nous avons représenté sur la figure 4 ces liens par des flèches entre les harmoniques corrélés.

L'observation de la figure 3-a nous montre un certain nombre de groupes d'harmoniques. Dans chaque groupe, les harmoniques sont liés pour la fréquence cyclique N_2-N_1 , mais les groupes sont décalés les uns par rapport aux autres de fréquences non proportionnelles à N_2-N_1 . On remarque par ailleurs qu'aucun de ces harmoniques n'a une fréquence directement proportionnelle à N_2-N_1 . Ces groupes d'harmoniques sont les suivants : (2,4,8), (3,6,9,13,17), (11,15), et (12,16). On peut expliquer ces observations en supposant que ces harmoniques sont issus du roulement inter-arbre (modulation par $s_{N_2-N_1}(t)$) et modulés ensuite, ce qui expliquerait les décalages.

Cette hypothèse se confirme lorsqu'on observe la figure 3-b. On peut déterminer quatre groupes principaux d'harmoniques liés entre eux pour la fréquence cyclique N_1 : (1,2,3), (4,6), (8,9,11,12,14), et (13,15,16,18).

On repère enfin les groupes d'harmoniques liés entre eux pour la fréquence cyclique N_2 . (On trouve les groupes (2,6), (3,7), (9,15) et (5,10).

L'inventaire de ces liens concorde avec le modèle établi pour les vibrations. En effet, la plupart de raies observées ont pour origine le roulement inter-arbre. Leur position est fixée par un certain nombre de modulations aux fréquences N_2-N_1 et N_1 . Certaines de ces raies sont également liées pour la fréquence N_2 , mais ceci peut tout à fait s'expliquer par le fait que certaines combinaisons des fréquences N_2-N_1 et N_1 peuvent donner une fréquence N_2 . En effet, $N_2-N_1+N_1 = N_2$. Ceci concerne les groupes d'harmoniques (2,6), (3,7) et (9,15). On peut donc supposer qu'ils ne sont pas issus d'une modulation à la fréquence N_2 , mais plutôt de deux modulations successives aux fréquences N_2-N_1 et N_1 .

Par contre, les harmoniques du groupe (5,10) semblent ne pas avoir de liens avec les autres raies du spectre. On peut donc supposer que ces deux raies proviennent d'un phénomène physique lié directement à l'ensemble tournant au régime N_2 , probablement le roulement (3), à partir duquel les vibrations peuvent se propager directement jusqu'au capteur à travers des parties fixes.

La figure 5 montre la cohérence simple calculée entre $s_{int}(t)$ et $s_{ext}(t)$, conjointement avec le spectre de puissance de $s_{int}(t)$. On observe une forte cohérence entre les deux capteurs pour les harmoniques 5 et 10. Par contre, les autres harmoniques ne semblent pas être corrélés. On observe en particulier un creux marqué sur la cohérence pour l'harmonique 3. Autrement dit, la seule information redondante entre les deux capteurs concerne le roulement (3). Ceci nous donne l'espoir de pouvoir nettoyer le signal $s_{int}(t)$ de l'information concernant ce roulement (qui ne nous intéresse pas) par des méthodes de soustraction de bruit avec référence bruit seul.

V CONCLUSION ET PERSPECTIVES.

Nous avons montré dans cet article comment la cohérence et la cohérence spectrale, appliquées à des signaux vibratoires, permettent de préciser le mode de propagation des ondes mécaniques à travers un système à surveiller. L'étude concerne un turboréacteur sur lequel on souhaite surveiller l'état d'un roulement inter-arbre. Nous avons montré comment la cohérence spectrale, outil adapté à la détection de modulations d'amplitude, permet de préciser la provenance de chaque composante du signal reçu sur un capteur. Nous avons pu en particulier mettre en évidence les modulations subies par le signal source lors de sa propagation à travers des éléments tournants. Nous avons montré de plus comment la cohérence simple peut être utilisée pour analyser la redondance d'information entre capteurs. Ceci permet de décider des capteurs les plus pertinents pour l'utilisation de méthodes de traitement inter-capteurs.

BIBLIOGRAPHIE.

- [1] MAX et LACOUME « Méthodes et techniques de traitement du signal et application aux mesures physiques. Tome 1 : Principes généraux et méthodes classiques », 355 pages, 5^e édition, MASSON, 1996.
- [2] HURD « An investigation of periodically correlated processes » Ph. D dissertation in engineering, Duke University, 1970.
- [3] GARDNER « Statistical Spectral Analysis. A non Probabilistic Theory », Prentice Hall, 1988.
- [4] CAPDESSUS « Aide au diagnostic des machines tournantes par traitement du signal » Thèse de l'Institut National Polytechnique de Grenoble, 15 décembre 1992.
- [5] CAPDESSUS, SIDAHMED, LACOUME « Apport de la théorie des processus cyclostationnaires à l'analyse et au diagnostic des engrenages » 2^{ème} Conférence Internationale sur les méthodes de surveillance et techniques de diagnostic acoustique et vibratoires, Senlis, 10-12 octobre 1995, pp. 391-401

[6] BIGRET, FERON, PACHAUD « Diagnostic maintenance disponibilité des machines tournantes », MASSON 1995, 468 pp.

[7] PRIEUX « Etude des possibilités de détection d'endommagements de roulements par la surveillance des vibrations », stage ingénieur de l'ENSIEG, réalisé à la SNECMA en 1997.

FIGURES

Figure 1-a
Représentation schématique du turboréacteur.

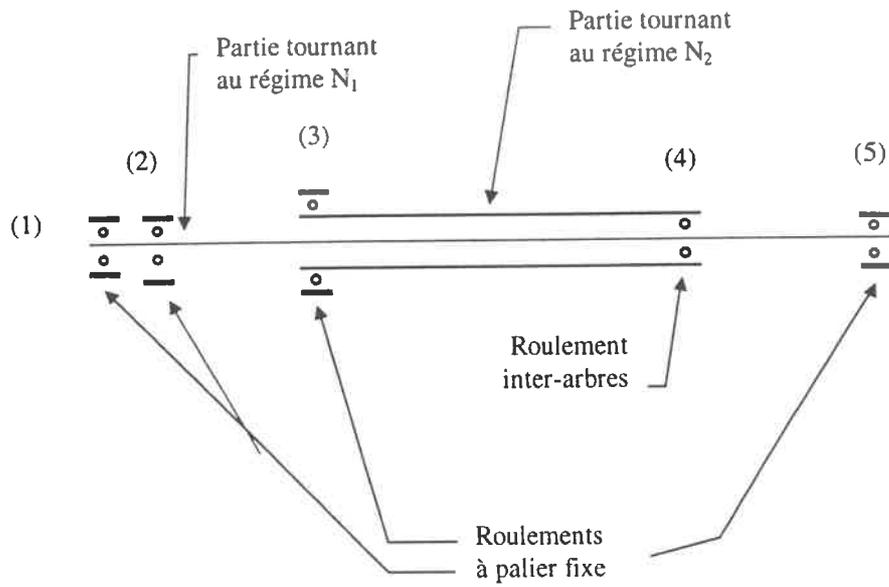


Figure 1-b
Représentation schématique du turboréacteur. Position des capteurs.

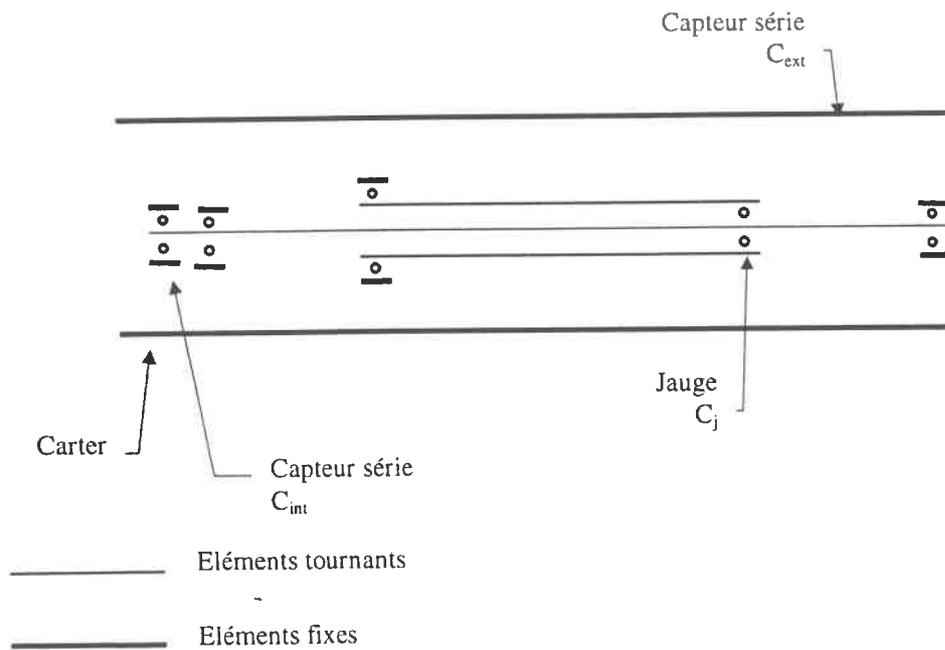


Figure 3-b

En haut : spectre de puissance du signal $s_{int}(t)$.

En bas : cohérence spectrale du signal $s_{int}(t)$ estimée pour la fréquence cyclique N_1 .

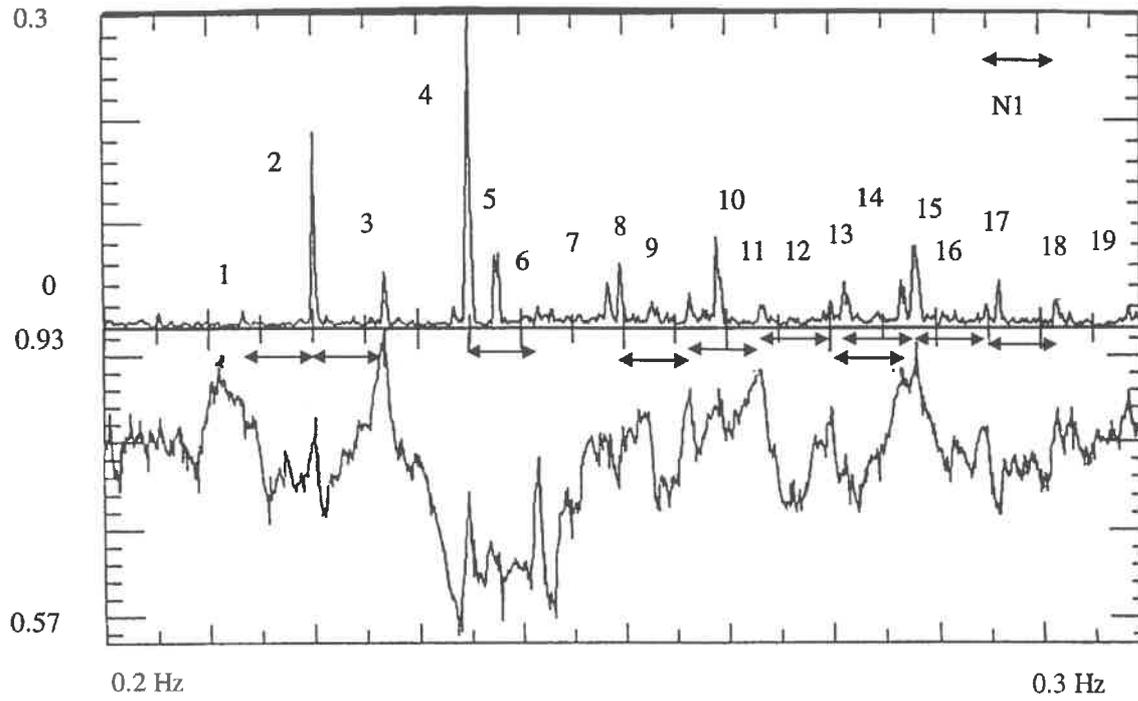


Figure 3-c

En haut : spectre de puissance du signal $s_{int}(t)$.

En bas : cohérence spectrale du signal $s_{int}(t)$ estimée pour la fréquence cyclique N_2 .

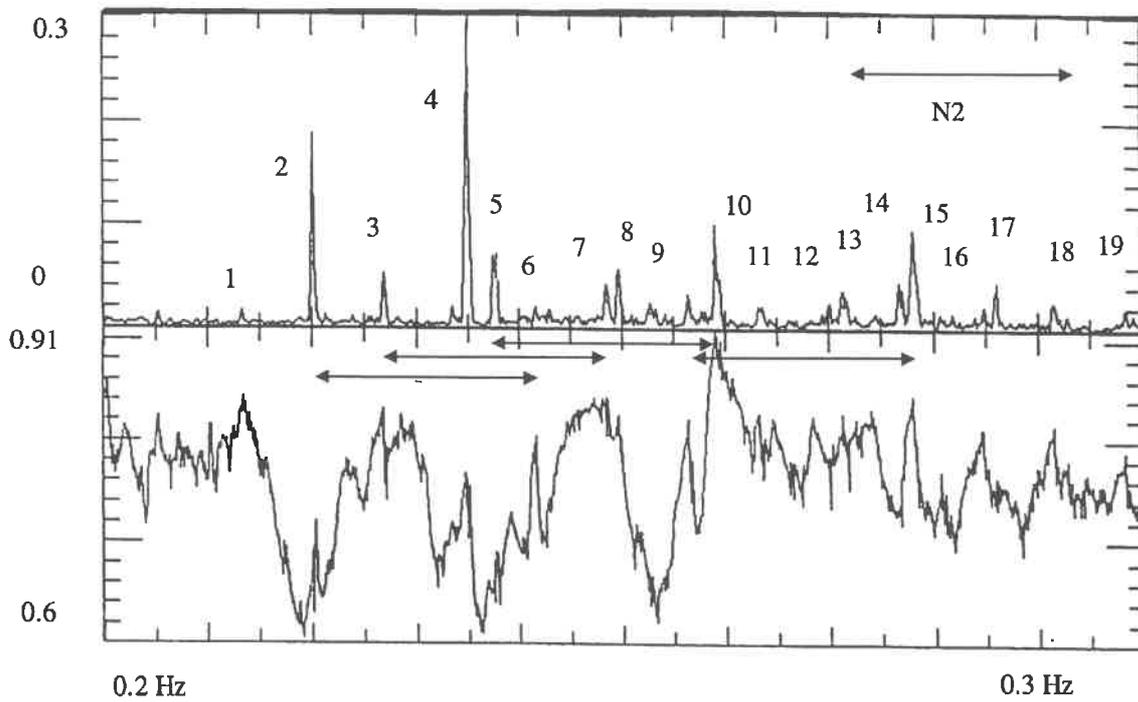


Figure 2
 Représentation temps-fréquence du signal reçu sur la jauge de contrainte.

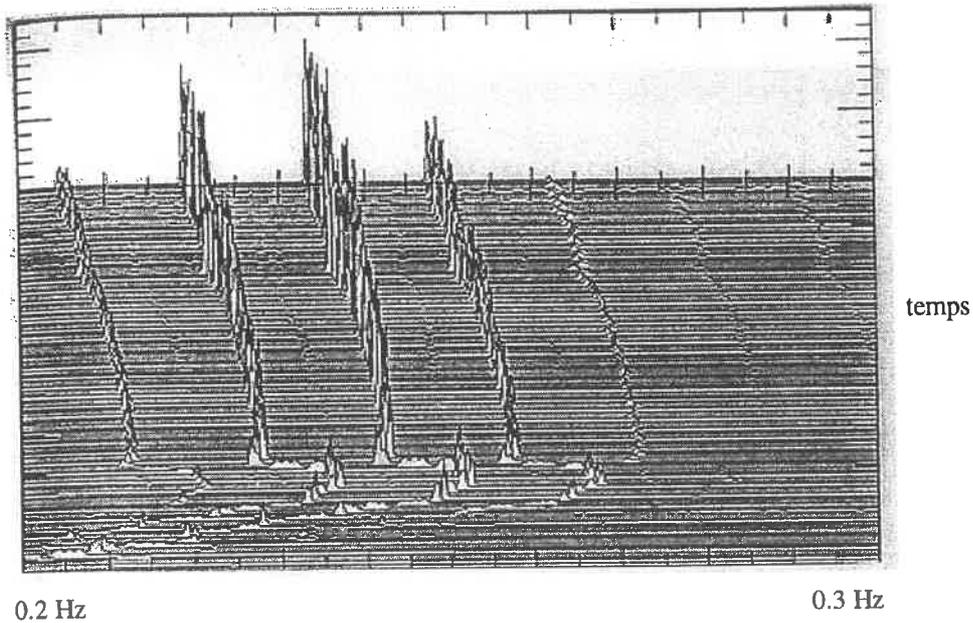


Figure 3-a
 En haut : spectre de puissance du signal $s_{int}(t)$.
 En bas : cohérence spectrale du signal $s_{int}(t)$ estimée pour la fréquence cyclique N_2-N_1 .

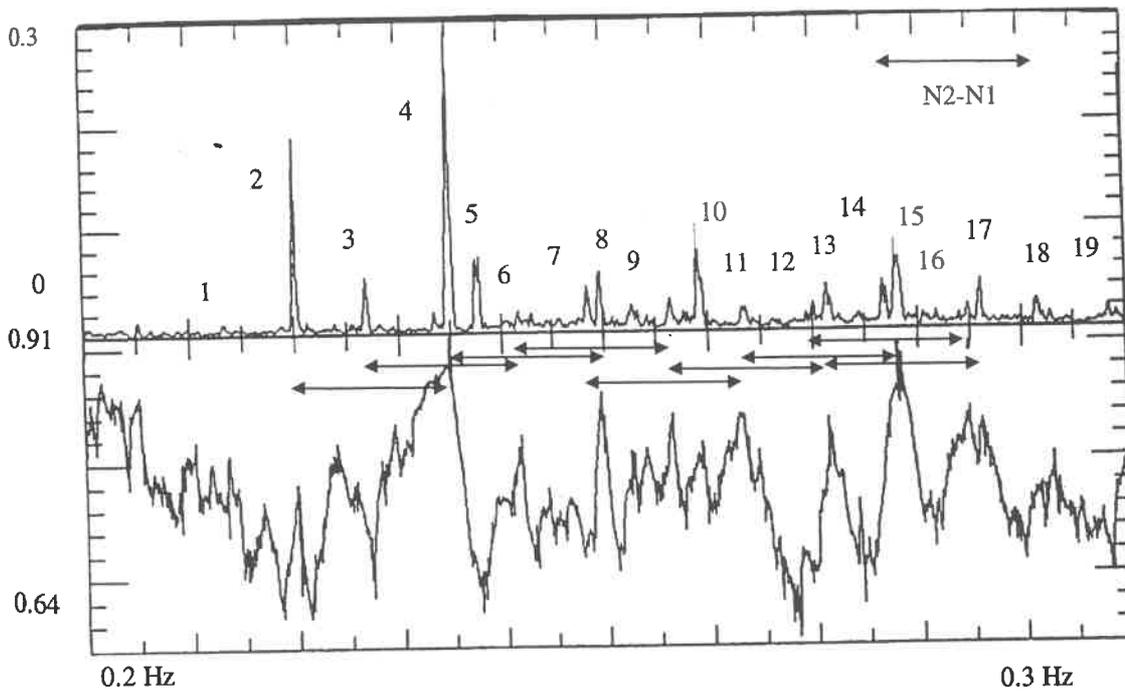


Figure 4
Représentation schématique des liens entre harmoniques.

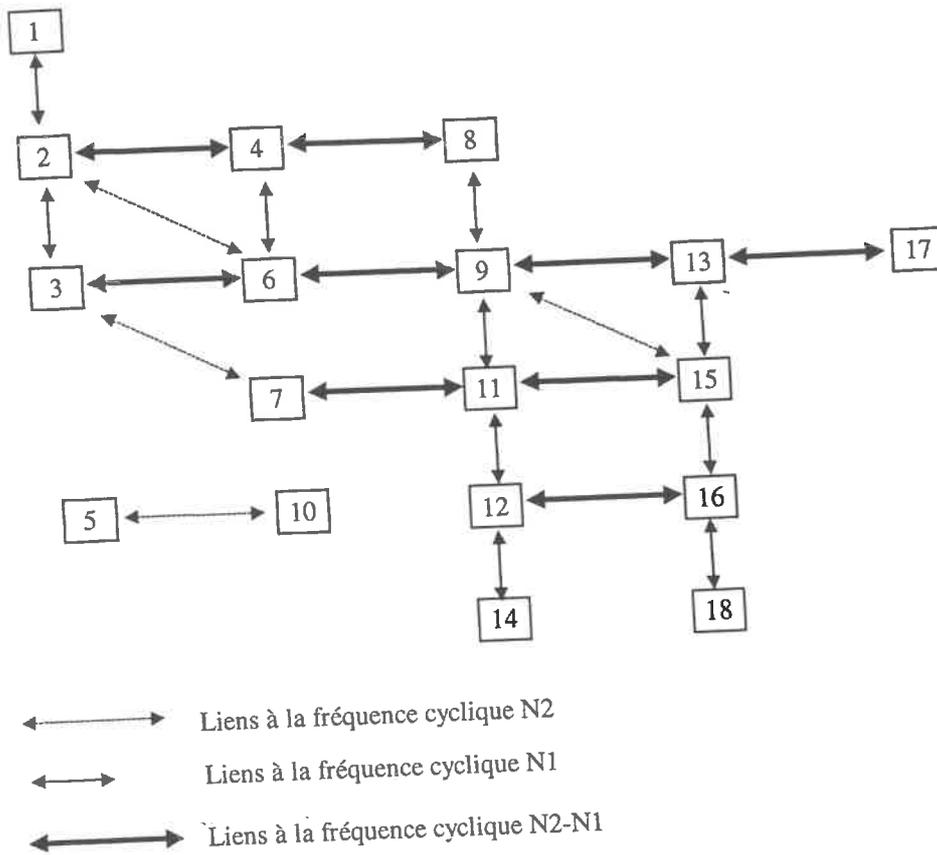


Figure 5
En haut : spectre de puissance de $s_{int}(t)$.
En bas : cohérence simple calculée sur les signaux $s_{int}(t)$ et $s_{ext}(t)$.

