

PROPOSITION D'UNE SERIE MATHEMATIQUE ET D'UN INDICATEUR DEDIES A L'ANALYSE DES VARIATIONS DE SIGNAUX LIES A DES DEFAUTS MACHINES

Cyrille CAIRONI IDPE, IPF-010

1) INTRODUCTION

Sur les machines tournantes, les indicateurs classiques de premier niveau sont actuellement des valeurs efficaces. La gestion de ces valeurs implique des réactions à court terme en cas de dépassement des valeurs critiques. L'analyse spectrale permet une estimation plus fine des défauts machines. Cette analyse fait appel à des lois physiques et à l'expérience de l'expert. Un estimateur automatique capable de synthétiser cette approche permettrait de mettre en œuvre des actions préventives dans le cadre de la maintenance des machines tournantes.

Dans cet article, je propose une série mathématique permettant de sélectionner les fréquences retenues par l'expert, de les pondérer et de les lier entre elles par des lois prédéfinies. La multiplication du spectre par cette série et l'intégration du résultat doit nous donner un estimateur de défaut plus avancé que les estimateurs classiques.

2) ANALYSE SPECTRALE

L'analyse spectrale est basée sur l'étude du spectre d'un signal. Ce spectre est obtenu en prenant le module de la transformée de Fourier du signal temporel. Pour notre application nous prenons l'exemple d'un signal sinusoïdal de 50 Hz développant des harmoniques 2, 3, 4, 5, 6 recouvert d'un bruit blanc gaussien (fig. 01). Cet exemple étant destiné à montrer les limites de l'estimateur, l'écart type du bruit blanc est de 10 alors que l'amplitude de la fondamentale n'est que de 4 et celle des harmoniques nous intéressant de l'ordre de 1 à 2.

Dans notre exemple, nous nous intéressons principalement aux harmoniques 2, 3 et 4. Dans le premier cas l'amplitude de ces harmoniques est 1.0 (fig. 01-a et 02-a), dans le deuxième cas 1.0, 1.2 et 1.5 (fig. 01-b et 02-b) et dans le troisième 1.1, 1.5 et 2.0 (fig. 01-c et 02-c). Ces harmoniques sont bien évidemment indécélables à l'œil dans le signal temporel est difficilement décelables dans le spectre (fig. 02) car elles sont noyées dans le bruit.

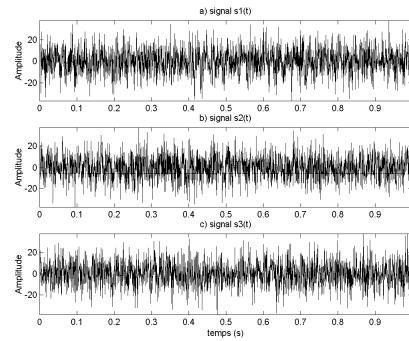


Fig. 01 : signaux temporels

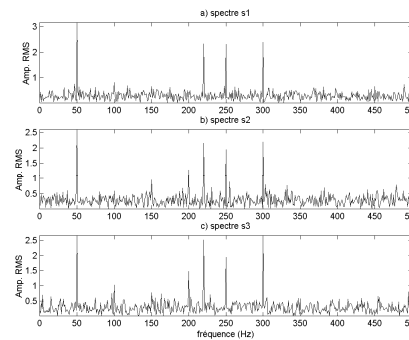


Fig. 02 : spectres des signaux complets

On remarque que l'analyse basée sur ces harmoniques est difficile sans filtrage préalable. De plus une telle analyse se fait de manière déportée.

3) PROPOSITION

3.1) LA SERIE

pour construire l'indicateur présenté dans cet article, je propose une série composée de courbes de Gauss dont la distribution est définie par des lois liées au phénomène physique étudié :

$$E(f) = \sum_{n=0}^N A_n e^{\left(\frac{-2}{l_n^2}(f-f_n)^2\right)} \quad (1)$$

Où N : nombre de fréquences de la série,
 f_n : fréquence centrale d'indice n,
 A_n : amplitude de la courbe pour f_n ,

l_n : largeur de bande pour f_n ,
 $f \in [0, f_{\max}]$.

Les différentes fréquences f_n sont des fonctions dépendantes des paramètres de l'analyse. Dans le cas de notre exemple, elles sont des harmoniques de la fréquence fondamentale :

$$\begin{cases} f_1 = 2 \times f_{fond} \\ f_2 = 3 \times f_{fond} \\ f_3 = 4 \times f_{fond} \end{cases} \quad (2)$$

Le nombre de points de la série et son Δf doivent être identiques à ceux du spectre sur lequel elle s'applique. L'amplitude A_n et la largeur l_n de bande de chaque courbe composant la série dépendent de la précision désirée, du taux d'incertitude et de l'importance de la fréquence considérée pour la construction de l'estimateur.

Cette série est la traduction de l'expérience de l'expert. Elle a l'avantage de pouvoir être programmée en une seule ligne de code d'où une implémentation aisée et compacte.

Dans de notre exemple, trois séries sont comparées. Elles diffèrent uniquement par leur largeur de bande. Pour la première série $l_1=1$ Hz, $l_2=1$ Hz, $l_3=1$ Hz (fig. 03-a). Pour la deuxième série $l_1=3$ Hz, $l_2=3$ Hz, $l_3=3$ Hz (fig. 03-b). Pour la troisième série $l_1=15$ Hz, $l_2=3$ Hz, $l_3=10$ Hz (fig. 03-c).

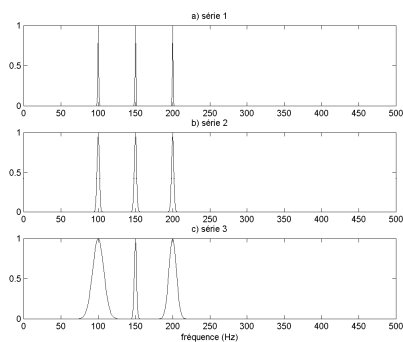


Fig. 03 : séries choisies pour l'estimation des signaux

3.2) SPECTRE RESULTANT

Le spectre et la série sont des vecteurs de même dimension. Donc pour obtenir la sélection choisie pour la construction de l'indicateur, il suffit de

multiplier membres à membres les deux vecteurs. Le spectre résultant est donc :

$$S_R(f) = S(f) \times E(f) \quad (3)$$

On serait tenté d'identifier la série à un filtre (à raison car c'en est un) et de repasser dans le domaine temporel par une transformée de Fourier inverse pour en faire un filtre de convolution. C'est tout à fait possible et si un lecteur a envie de le faire qu'il n'hésite pas ! Cela fera un filtre tout à fait acceptable. Toutefois je rappelle qu'un des avantages de cette série est de lier les fréquences entre elles et donc de prendre en compte leur instabilité. Ce qui ne sera plus le cas si on repasse dans le domaine temporel.

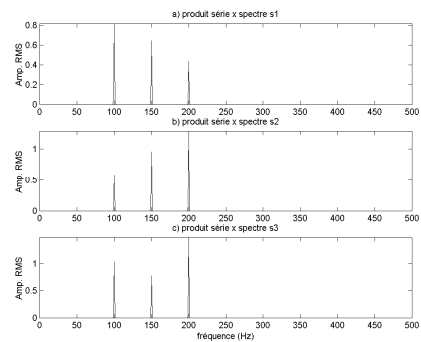


Fig. 04 : spectre résultant de la série 1

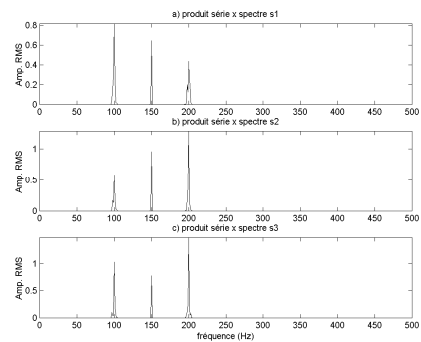


Fig. 05 : spectre résultant de la série 2

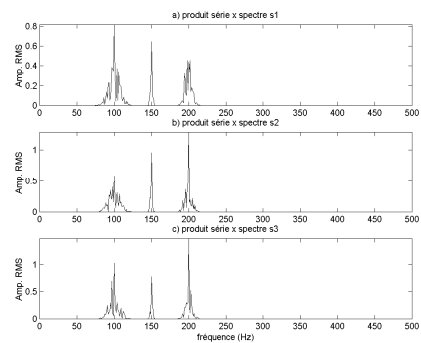


Fig. 06 : spectre résultant de la série 3

Les figures 04, 05, 06 nous montrent l'importance du choix de la bande de fréquence sur la précision. On serait tenté de prendre une bande passante la plus étroite possible pour avoir la plus grande sensibilité (ce qui est le cas). Mais attention, l'analyse que nous faisons est liée à des phénomènes physiques et possède donc un taux d'incertitude. Il en va de même pour les phénomènes sociaux ou économiques où ce genre d'analyse peut s'appliquer.

Le spectre résultant montre uniquement la variation des zones qui intéressent l'analyse avec un taux d'incertitude facilement calculable car la bande de fréquence est égale à deux fois l'écart type (équation 1). Sur la base de ce spectre, un indicateur global peut être calculé.

3.3) L'INDICATEUR

Comme nous l'avons vu, le spectre résultant nous donne les informations qui sont uniquement liées au phénomène étudié. Partant de ce principe l'indicateur le plus simple est son intégrale :

$$Id = \int_0^{f_{\max}} X(f) \cdot E(f) \cdot df \quad (3)$$

Si un lecteur a une meilleure idée il va de soit que je suis preneur. Mais, comme on peut le voir dans le prochain paragraphe, cet indicateur est plutôt efficace.

4) VALIDATION

Le tableau 01 présente les valeurs de l'indicateur pour les signaux s1, s2 et s3 (fig. 01 et 02). Il présente également leur variation en dB et en pourcentage par rapport à s1.

	s1	s2	s3
série 1	10,7233	11,7857	12,0551
série 2	2,1274	3,0536	3,4777
série 3	3,6275	4,3446	4,6804
Variation en dB			
série 1	0	0,8205	1,0168
série 2	0	3,1393	4,2689
série 3	0	1,5668	2,2135
Variation en pourcentage			
série 1	100	109,9074	112,4197
série 2	100	143,5367	163,4718
série 3	100	119,7684	129,0255

Tab. 01 : indicateur et variations

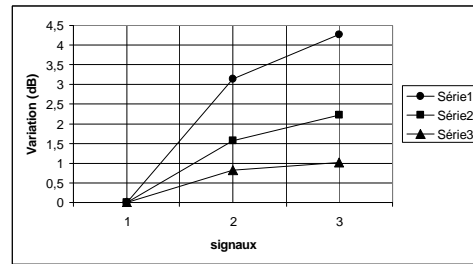


Fig. 07 : Variation de l'indicateur en fonction de la série

L'étude de la variation de l'indicateur (Fig. 07) montre que la série comportant les largeurs de bandes les plus fines présente la meilleure définition (ce qui semble logique). Ce qui est surtout intéressant de remarquer c'est que la variation des harmoniques est encore visible malgré un bruit dont l'énergie est largement supérieure (le rapport est de l'ordre de 1 à 10). Si on compare ce résultat à des signaux de référence composés de ces harmoniques (fig. 08) et à leurs spectres (fig. 09) on peut évaluer la stabilité de l'indicateur.

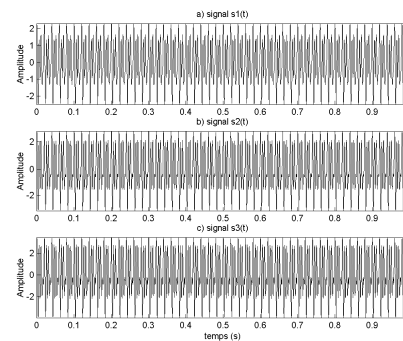


Fig. 08 : signal de référence

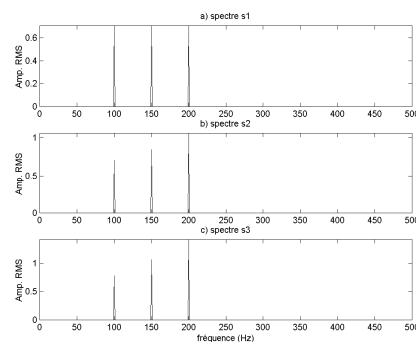


Fig. 09 : spectre de référence

Les spectres résultant des spectres de référence (équation 3) ont strictement la même allure que ces derniers. En effet la définition du signal est assez bonne pour que la largeur des raies soit inférieure à la largeur des enveloppes gaussiennes choisies. Le tableau 02 nous montre les valeurs de l'indicateur et leur variation pour la série 1. Bien

évidemment les valeurs sont les mêmes pour la série 2 et la série 3.

	s1	s2	s3
série 1	1,1213	1,6163	3,2527
Variation en dB			
série 1	0	3,1760	9,2504
Variation en pourcentage			
série 1	100	144,1452	290,0829

Tab. 02 : indicateur et variations

L'examen de la variation de l'indicateur sur les signaux de référence (fig.10) nous permet d'évaluer l'atténuation de l'indicateur en fonction du bruit.

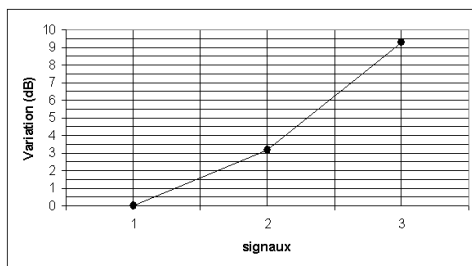


Fig. 10 : variation de l'indicateur en fonction de la série

On remarque une modification de la courbe de variation qui peut, à terme, fausser l'indicateur. Ceci montre non seulement les limites de l'indicateur mais aussi son efficacité. En effet j'ai volontairement choisi un cas extrême pour pousser l'analyse aux limites du possible. Hors bien avant ses limites, l'œil de l'expert ne peut déjà plus rien estimer. Pour tout signal moins bruité que celui

présenté dans notre exemple l'indicateur rejoint très vite la courbe de référence.

5) CONCLUSION

Dans cet article je propose une série permettant l'évaluation d'un spectre en fonction des lois physiques liées au phénomène étudié. L'indicateur en résultant montre une très bonne stabilité.

Un des avantages principaux de cette série est sa simplicité et la facilité avec laquelle elle peut être programmée (une ligne de code suffit).

L'indicateur est stable dans le bruit. Il est l'intégrale d'un spectre modifier en fonction de lois physiques et de l'expérience. Ces deux caractéristiques en font un indicateur avancé. Un tel indicateur peut permettre la gestion d'alarmes liées à la maintenance prédictive on line.

Cette série et cet indicateur sont bien évidemment critiquables. Ils peuvent aussi avoir des applications que je ne soupçonne pas. Pour ces raisons, j'invite les lecteurs à me faire part de leurs remarques, critiques ou suggestions. Elles seront toujours les bienvenues. A cette fin il est possible de me contacter par email à l'adresse :

Caironi@club-internet.fr

Je remercie Fabrice Laurent, Lionel Durantay, Jacques Enon et Mohamed Akdim pour l'aide qu'ils m'ont apportée par leurs critiques.