

## ESTIMATION DU RETARD DE SIGNAUX DECORRELES

Min CAI\*

Alexis ROY\*\*

\*EDF/Etudes et recherches, 6 quai Watier, 78400 Chatou

\*\*Télécom Paris, 46 rue Barrault, 75013 Paris

### Résumé

Pour de la surveillance, on cherche le retard entre deux enregistrements de chocs. La difficulté est liée au fait que les deux enregistrements sont décorrés entre eux (mais dépendants). Le problème est couramment rencontré avec des capteurs hétérogènes. Les outils existants qui sont fondés sur l'intercorrélation ne permettent pas de le résoudre. Nous proposons une méthode qui exploite l'enveloppe du signal et qui permet de s'affranchir du problème de décorrélation. Par le biais de l'intercorrélation entre enveloppes, on accède en effet aux informations statistiques d'ordre 4 du signal. Les résultats de simulation sur signaux réels montrent ses performances.

### Abstract

In surveillance we try to estimate the delay between two shocks records. What makes it difficult is that the two records are decorrelated (but not independent). We often have this problem with heterogeneous sensors. The usual techniques based on the intercorrelation does not work. We propose a method which exploits the signal envelope and overcomes the decorrelation problem. By means of intercorrelation between envelopes, we accede to information of 4th order statistics. The simulation results obtained with real signals show its performances.

## 1 Introduction

Le circuit primaire fait partie des composants les plus surveillés d'une centrale nucléaire. Les accéléromètres sont placés le long du circuit pour détecter les ondes de chocs produits sur les parois. Les chocs enregistrés sur plusieurs voies présentent un décalage temporel dû aux différents temps de propagation. Le diagnostic du phénomène nécessite la connaissance des décalages. L'étude présentée ici concerne l'estimation du retard d'un capteur par rapport à celui le plus proche.

Les méthodes classiques de l'estimation du retard exploitent essentiellement l'intercorrélation entre deux voies. Détecter le maximum de l'intercorrélation, identifier le système linéaire transformant une voie en une autre, ou estimer la phase de l'interspectre : tous ces procédés génèrent de nombreuses variantes de cette approche. L'hypothèse de base est que l'intercorrélation ne soit pas identiquement nulle, c'est-à-dire, les supports spectraux de deux voies se recouvrent.

Les statistiques d'ordre supérieur ont permis le développe-

ment des méthodes insensibles aux bruits gaussiens. Nikias et Pan [1] ont proposé une méthode fondée sur le bi-spectre. Le retard est estimé à partir du déphasages des bi-spectres. Zhang et Raghuvver [2] ont généralisé la méthode précédente à un nombre quelconque de capteurs avec des polyspectres. Tugnait [3] cherche à identifier la réponse impulsionnelle d'un système linéaire à retard. Les cumulants d'ordre 4 sont utilisés en identification pour se débarrasser du bruit gaussien. Ces méthodes supposent toujours que les signaux décalés soient identiques, ce qui limite le domaine d'application.

Les signaux de chocs ont des caractéristiques bien particulières. Le bruit de choc se transmet par plusieurs ondes de vitesses différentes. Les formes d'un même choc perçu par des capteurs à différentes distances sont loin d'être identiques. Par conséquent, on ne peut pas appliquer les méthodes d'ordre supérieur citées précédemment. En plus, les capteurs ont souvent des bandes passantes disjointes, si bien que les signaux ont des supports spectraux disjoints et sont donc décorrés. Les méthodes classiques d'ordre 2 ne s'appliquent donc pas.



En modélisant les signaux de chocs comme une enveloppe modulée par des sinus, la méthode que nous proposons travaille en deux étapes : 1) extraire les enveloppes des signaux, 2) estimer le retard entre les enveloppes. L'extraction d'enveloppe est explicitée dans le paragraphe 2. Les paragraphes 3 et 4 présentent deux méthodes d'estimation du retard. Nous verrons comment estimer le retard entre les débuts des enveloppes de formes différentes.

## 2. Définition du problème et extraction d'enveloppes.

Les ondes de chocs se propagent jusqu'aux capteurs, comme les sorties des canaux de transmission sous excitation impulsionnelle. Pour deux capteurs distincts, une impulsion est retardée et filtrée par le milieu de deux façons que l'on note  $a(t)$  et  $b(t-\tau)$ ,  $\tau$  étant lié à la différence du temps de propagation. Par effet de filtrage,  $a(t)$  et  $b(t)$  sont à très basse fréquence (bande étroite). Ce que l'on recueille avec les accéléromètres sont des résonnances de capteurs excités par  $a(t)$  et  $b(t)$ . On peut modéliser ces signaux comme un résultat de modulation :

$$x_a(t) = a(t) \sin(2\pi f_a t + \phi_a)$$

$$x_b(t) = b(t) \sin(2\pi f_b t + \phi_b)$$

$$\text{avec } a(t)=b(t)=0, \text{ si } t < 0.$$

$f_a$  et  $f_b$  sont les fréquences de résonnance des capteurs et  $\phi_a$ ,  $\phi_b$  leur phase. Un exemple des signaux  $x$  est donné dans la figure 1.

Il est clair que dans ce modèle, les sinus sont uniquement liés aux caractéristiques des capteurs. Seules les enveloppes  $a(t)$  et  $b(t)$  et le retard  $\tau$  nous renseignent sur les phénomènes physiques produits au moment de l'impact et au cours de la propagation. L'objectif de l'étude est d'estimer le retard.

Comme ce qui a été rappelé auparavant, les méthodes classiques d'estimation de retard sont fondées sur l'intercorrélation entre  $x_a$  et  $x_b$ . Pour qu'elle ne soit pas nulle partout, il faut que les supports spectraux de  $x_a$  et  $x_b$  se recouvrent. Malheureusement, ces signaux sont à bande étroite, centrés sur  $f_a$  et  $f_b$ , et leur spectres sont disjoints quand les fréquences de résonnance sont différentes.

L'idée est de se débarrasser des fréquences de résonnance qui nous apportent peu d'informations et de travailler sur les enveloppes  $a(t)$  et  $b(t)$ . La première étape consiste donc à extraire les enveloppes. Ces dernières sont basses fréquence et se trouvent donc dans la même bande. On peut leur

appliquer les méthodes classiques d'estimation du retard.

Pour extraire les enveloppes, on utilise la méthode classique de l'élévation au carré. On rappelle que le carré d'un signal modulé a deux composantes : une en bande de base et l'autre à la fréquence double :

$$x_a(t)^2 = a^2(t)\sin^2(2\pi f_a t + \phi_a) = a^2(t)/2 - (a^2(t)/2)\cos(4\pi f_a t + 2\phi_a)$$

Un filtrage passe-bas permet d'éliminer le cosinus et de restituer le signal  $a^2(t)/2$ . Pour éviter le recouvrement spectral lors de l'élévation au carré, on peut filtrer le signal capteur avec un passe-bas.

**Remarques :**

a) L'enveloppe extraite par cette méthode n'est pas l'enveloppe du départ  $a(t)$  mais son carré  $a^2(t)$ . Bien que les formes soient différentes, les débuts sont les mêmes. Par conséquent, le retard  $\tau$  entre  $a(t)$  et  $b(t-\tau)$  peut être estimé à partir de leur carré.

b) Les enveloppes ainsi restituées sont homogènes au carré du signal. Si l'on applique sur les enveloppes une méthode d'estimation de retard fondée sur la statistique d'ordre 2, cela revient à exploiter les informations d'ordre 4 du signal brut.

On présente dans la figure 2 quelques résultats de simulation sur signaux réels. La qualité de l'extraction est satisfaisante.

## 3. Estimation du retard par intercorrélation des enveloppes.

Nous définissons la date d'un choc sur une voie comme étant le début du signal. Dans tout ce qui suit, nous cherchons à obtenir un estimateur de la différence de dates d'un choc entre 2 voies.

Nous effectuons l'intercorrélation des enveloppes obtenues avec la méthode du paragraphe 2. Cette intercorrélation est maximale pour une valeur de l'indice de la fonction d'intercorrélation qui superpose au mieux les deux enveloppes, donc pour une valeur d'indice proche du retard réel entre les signaux. (figure 3)

Le principal avantage de la méthode de l'intercorrélation est sa grande facilité de mise en oeuvre. Cependant, l'intercorrélation présente deux inconvénients :

a) nous effectuons un calcul sans paramètres et donc sans contrôles;

b) cette méthode mesure le décalage entre maxima

d'énergie sur les deux voies et non entre les débuts des signaux. L'estimateur est donc valable dans la mesure où les temps de montée des signaux sont les mêmes (figure 3). Plus les formes des signaux se ressemblent, meilleur est l'estimation du retard.

En figure 4, nous présentons une simulation d'intercorrélation entre deux enveloppes dont les temps de montée sont différents : les signaux à comparer sont séparés de 50 échantillons mais les sommets de leurs enveloppes sont décalés de 91 échantillons. Leur intercorrélacion est maximale pour un décalage de  $a(t)$  par rapport à  $b(t)$  de 73 échantillons, au lieu des 50 attendus.

#### 4. Estimation du retard entre les enveloppes par méthode paramétrique.

L'estimation du retard par l'intercorrélacion d'enveloppes de signaux de choc dépend fortement de la forme des enveloppes. Une solution serait donc de se ramener à des formes d'enveloppes identiques avant d'effectuer une estimation du retard entre les signaux.

Nous avons constaté que le signal que l'on capte en premier (sur la voie appelée voie primaire) et qui donc correspond au capteur situé le plus près de la source des chocs, a les enveloppes les plus courtes et les plus nettes. Les autres voies (voies secondaires) sont plus bruitées, et les enveloppes sont plus longues. L'enveloppe de la voie primaire  $a(t)$  a une bande spectrale plus large que l'enveloppe d'une voie secondaire  $b(t)$  et le support spectral de  $b(t)$  est inclus dans le support spectral de  $a(t)$ .

Si on filtre convenablement  $a(t)$  par un filtre à réponse impulsionnelle finie, il est possible de retrouver  $b(t)$ . L'estimation du retard se ramène donc à l'estimation des coefficients d'un filtre  $h(n)$  tel que :

$$b(t) = \sum_{i=0}^{\infty} h(i)a(t-i).$$

Le retard pourra alors être lu sur les coefficients  $h(i)$ . Il correspond à l'indice  $i_0$  du premier  $h(i)$  non-négligeable.

Toutefois, cette méthode nécessite d'avoir un bon conditionnement de la matrice de Toeplitz d'autocorrélacion de  $a(t)$ . Le rang de cette matrice nous est inconnu et nous risquons, pour retrouver les coefficients  $h(i)$ , d'inverser des termes non-significatifs qui vont avoir des conséquences importantes sur les résultats. La figure 5 présente une simulation de l'estimation du retard avec la méthode

d'estimation du filtre RIF  $h(i)$ ,  $i=0, \dots, N$ . Dans cet exemple, la méthode d'intercorrélacion des signaux d'enveloppe n'a pas donné de bons résultats alors que la méthode d'estimation du filtre RIF est satisfaisante.

#### 5. Lien entre la méthode de l'intercorrélacion des enveloppes et les cumulants d'ordre 4.

Le cumulant est une fonction statistique de  $n$  variables aléatoires. Il se confond avec le moment statistique de variables aléatoires aux ordres 1 et 2 et a l'avantage de conserver la propriété de multilinéarité pour des variables aléatoires indépendantes. C'est donc un outil très intéressant pour les statistiques d'ordres supérieurs.

Rappelons les traitements que nous avons appliqués aux signaux de la voie primaire.  $x_a(t)$  et secondaire  $x_b(t)$ .

a) Sous l'hypothèse que  $x_a$  et  $x_b$  n'ont pas de composantes spectrales au-dessus de  $f_c/4$ , où  $f_c$  est la fréquence d'échantillonnage des signaux captés, on élève au carré de  $x_a$  et  $x_b$ .

b) Par filtrage passe-bas de  $x_a^2$  et  $x_b^2$  avec un filtre RIF  $P(i)$ , on extrait les enveloppes des chocs :  $a^2$  et  $b^2$ .

c) On effectue l'intercorrélacion des enveloppes  $a^2(t)$  et  $b^2(t)$ .

d) On recherche le maximum de l'intercorrélacion pour estimer le retard entre voies.

Mathématiquement, nous formons les termes  $r(n)$  de l'intercorrélacion des enveloppes :

$$r(n) = \sum_{t=0}^{\infty} a^2(t-n)b^2(t), \text{ si } a(t)=0 \text{ pour } t < 0.$$

Mais,  $a^2(t)=P(t)*x_a^2(t)$  et  $b^2(t)=P(t)*x_b^2(t)$ , où  $(\cdot * \cdot)$  représente l'opérateur de convolution.

$$D'où, r(n) = \sum_{t=0}^{\infty} [P(t)*x_a^2(t-n)][P(t)*x_b^2(t)].$$

En exploitant le fait que  $P(t)$  est un filtre RIF, que  $x_a$  et  $x_b$  sont deux signaux décorrelés,  $r(n)$  s'exprime comme une double somme de cumulants croisés d'ordre 4 des deux variables aléatoires  $x_a(t-n)$  et  $x_b(t)$ , pondérée par les produits de la forme  $(P(t_1)P(t_2))$ , avec  $t_1 > 0$  et  $t_2 > 0$ .



## 6. Conclusion

Nous avons pu estimer le retard entre deux signaux de chocs décorrélés (mais dépendants) selon deux méthodes : l'intercorrrelation des enveloppes des signaux et l'identification d'un filtre à réponse impulsionnelle finie entre les enveloppes. La méthode de l'intercorrrelation a été appliquée sur des signaux réels et a donné des résultats satisfaisants qui mettent en évidence l'utilisation des informations statistiques d'ordre 4 des signaux.

Les enveloppes des signaux ne sont pas superposables et, sous certaines hypothèses concernant les supports spectraux des enveloppes, nous pouvons estimer le filtre RIF liant les enveloppes. Ce filtre permet d'accéder à l'information de retard entre les signaux en examinant ses premiers coefficients non-négligeables. Cette méthode a permis, sur des signaux simulés, de retrouver l'information de retard qui n'avait pas pu être retrouvée par la seule intercorrrelation des signaux d'enveloppe.

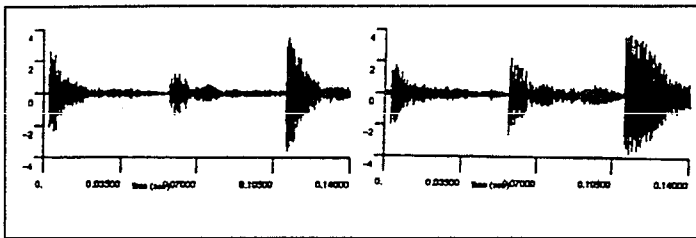


Figure 1 : Exemple de signal de chocs captés sur plusieurs voies.

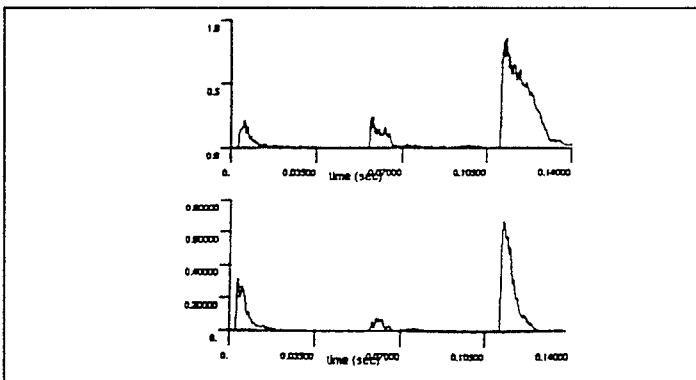


Figure 2 : Extraction de l'enveloppe par élévation au carré et filtrage passe-bas sur signal réel.

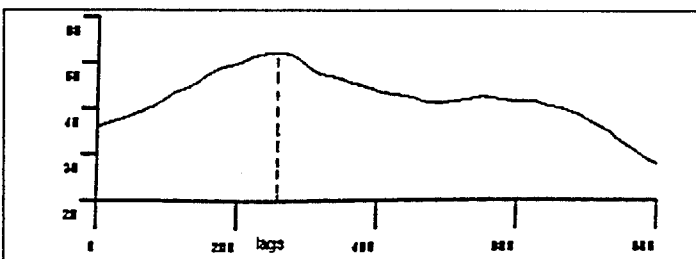


Figure 3 : Intercorrrelation des enveloppes de signaux réels.

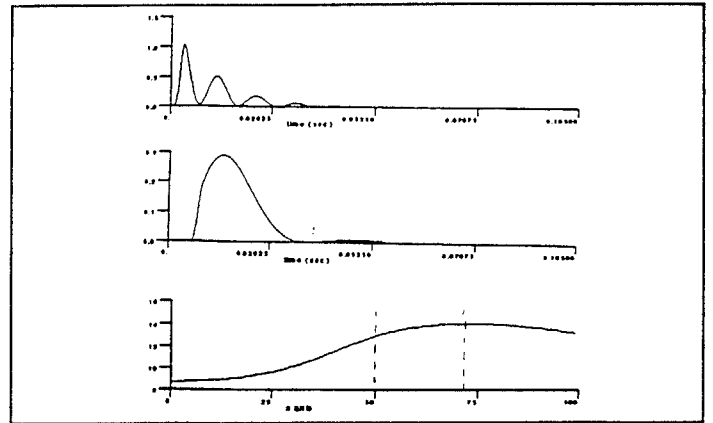


Figure 4 : Intercorrrelation de signaux synthétiques de formes différentes. Le retard entre les débuts des signaux est de 50 échantillons mais le retard entre les sommets des enveloppes est de 91 échantillons.

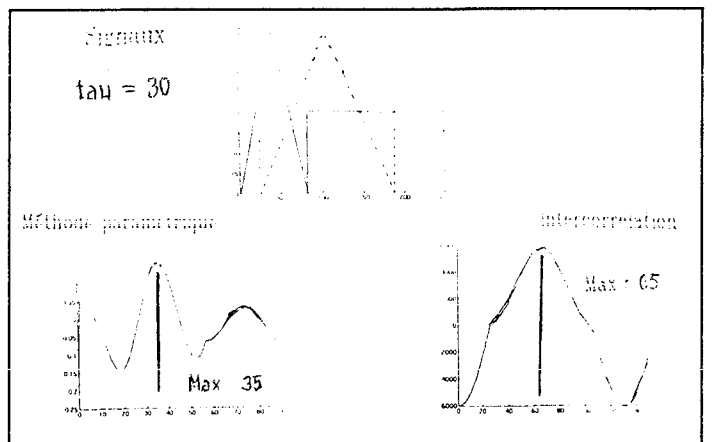


Figure 4 : Signaux synthétiques pour lesquels l'estimation du retard par la méthode paramétrique est bonne alors que la méthode de l'intercorrrelation fonctionne mal.

## Bibliographie

- [1] Nikias & Pan - **Time delay estimation in unknown gaussian spatially correlated noise** - IEEE transactions on acoustics, speech and signal processing, Vol 36, n°11 - Novembre 1991.
- [2] Zhang & Raghuveer - **Non-parametric bispectrum-based time-delay estimators for multiple sensor data** - IEEE transactions on signal processing, Vol 39, n°3 - Mars 1991.
- [3] Tugnait - **On time delay estimation with unknown spatially correlated gaussian noise using fourth order cumulants and cross-cumulants** - IEEE transactions on signal processing, Vol 39, n°6 - Juin 1991
- [4] Fertner & Sjölund - **A comparison of various time delay estimation methods by computer simulation** - IEEE transactions on acoustics, speech and signal processing, Vol 34, n°5 - Octobre 1986.
- [5] Min Cai & John Ball - **Noise cancellation with uncorrelated reference** - EUSIPCO - Bruxelles - 1992.
- [6] Mendel - **Tutorial on Higher Order Spectra** - Proceedings of IEEE, Vol 79, n°3 - Mars 1991.
- [7] Giannakis - **Cumulants : a powerful tool in signal processing** - Proceedings of IEEE, Vol 75, n°9 - Septembre 1987.