ETUDE DE BRUITS IMPULSIFS PAR ANALYSE PAR BANC DE FILTRES A Q CONSTANT

Alain MAGUER * - Pierre ALINAT * - Georges GOULLET **

* THOMSON SINTRA ASM - Chemin des travails - Cagnes sur mer
** GERDSM/DCN - Le brusc - Six fours

RESUME :

Dans ce papier on s'intéresse à l'étude de méthodes de traitement du signal pour l'analyse de bruits impulsifs. Ceux-ci sont en effet de plus en plus utiles, en acoustique sous-marine, pour la détection et la classification de sources complexes de bruit.
La méthode retenue est l'analyse par banc de filtres à Q constant, qui bien que très ancienne, possède des propriétés très intéressantes pour l'analyse de tels signaux. On énonce les principales et montre le lien étroit existant avec la transformation en ondelettes.
Finalement on présente des résultats temps-fréquence obtenus sur quelques signaux réels d'acoustique sous-marine.

SUMMARY :

In this paper we deal with the study of signal processing methods for the analysis of transients.
Those signals become more and more useful, in underwater acoustics, to detect and classify complex noisy sources.
The chosen method is the well known constant Q spectral analysis which has very interesting properties for characterizing such signals. We also show its analogy with the wavelets by giving its main properties.
Finaly we give time-frequency results obtained on some underwater real signals.

1. INTRODUCTION

L'étude de signaux non stationnaires présente un intérêt de plus en plus important en acoustique sous-marine. En effet, ils vont devenir de plus en plus utiles pour pouvoir détecter des sources de bruit complexes.

La description de tels signaux n'a pas encore trouvée de formulation générale et unique, comme pour le cas de signaux stationnaires où la transformée de Fourier occupe une place privilégiée. Parmi les méthodes étudiées on peut citer : la transformée de Fourier à court-terme, les méthodes de Prony, Kumaresan et Tuft, autorégressives, la transformée de Wigner-Ville, l'analyse par banc de filtres à Q constant et la transformation en ondelettes.

Dans cet article, on présente plus particulièrement l'analyse par banc de filtres à Q constant ,méthode très ancienne qui nous est apparue cependant comme la plus intéressante pour procéder à une analyse grossière des bruits impulsifs (instant d'apparition, durée, fréquence centrale, bande, ...) en présentant aussi l'avantage d'être tolérante vis-à-vis des modèles et rapides en temps de calcul.

On énonce les principales propriétés de l'analyse à Q constant ainsi que la façon de la réaliser. Une représentation temps-fréquence des signaux est obtenue en procédant à une détection - intégration effectuée sur chacun des signaux issus de la batterie de filtres.

On s'attache à montrer le parallèle très étroit existant entre cette méthode et la transformation en ondelettes et on donne finalement des résultats obtenus sur des signaux réels d'acoustique sous-marine.

2. ANALYSE PAR BANC DE FILTRES A Q CONSTANT

L'analyse par banc de filtres à Q constant, c'est-à-dire à $\Delta f/f$ constant, a été utilisée dans les domaines de la parole et sur des signaux acoustiques. C'est une analyse à court-terme dont la durée d'analyse varie avec la fréquence, contrairement à l'analyse de Fourier à court-terme où celle-ci est constante. Ainsi, le signal est supposé stationnaire sur des durées inversement proportionnelles à chacune des fréquences centrales d'analyse.

2.1 Définition

Par définition, l'analyse à court-terme réalisée à travers un banc de filtres de bande passante non uniformes (qui inclut les filtres à Q constant) est donnée par la relation :

$$\boxed{F_{\omega_c}(\omega,t_o)=\int_{-\infty}^{t_o} x(t).g_{\omega_c}(t_o-t).\exp(-j\omega t).dt} \qquad (1)$$

où $g_{\omega c}(t)$: fonction de pondération qui dépend de la fréquence centrale ω_c du filtre.

Pour obtenir une analyse à Q constant il suffit de choisir, comme fonction de pondération $g\omega_c(t)$, l'expression suivante :

$$g_{\omega c}(t) = A(\omega_c).\ k(\omega_c t) \qquad (2)$$

ce qui correspond dans le domaine fréquentiel à :

$$G_{\omega_c}(\omega) = \frac{A(\omega c)}{\omega_c}.\ K(\omega/\omega_c) \qquad (3)$$

Ainsi, avec cette fenêtre de pondération on obtient parfaitement des largeurs de bande Δf proportionnelles à la fréquence centrale du filtre f d'où un $Q(f/\Delta f)$ constant. L'expression (1) devient alors :

$$\boxed{F_{Q,\omega_c}(\omega,t_o)=A(\omega_c).\int_{-\infty}^{t_o} x(t)\ .\ K\left[\omega_c(t_o-t)\right].\exp(-j\omega t).dt} \qquad (4)$$

Cette expression (4) représente l'expression mathématique associée à l'analyse par banc de filtres à Q constant.

Le signal à analyser x(t) est donc filtré par une batterie de filtres passe-bande mis en parallèle dont les largeurs de bande Δf sont proportionnelles à leur fréquence centrale. Dans le domaine temporel cela revient à dire que les réponses impulsionnelles des filtres sont d'autant plus longues que la fréquence centrale est basse.

2.2 Propriétés

- L'analyse par banc de filtres à Q constant permet de faire varier la durée d'analyse du signal avec la fréquence ; celle-ci diminue quand la fréquence centrale du filtre augmente.
- Les fréquences centrales des filtres sont espacées logarithmiquement. Ainsi, une homothétie se traduira par une translation sur l'échelle des fréquences et la forme du spectre sera conservée.
- Le choix du $\Delta f/f$ sera fonction de la rapidité d'évolution des bruits qu'on désire analyser et donc, de la surtension des structures et cavités excitées à bord des bruiteurs par les sources sonores.
- Elle est a priori adaptée aux signaux réels (même plage de Q quelle que soit la fréquence). De là vient certainement le fait d'être répandue chez les êtres vivants supérieurs (cochlée des mammifères en particulier).
- Les systèmes mécaniques qui, excités, fournissent les impulsions qu'on analyse, ont une plage de Q qu'on peut considérer comme grossièrement indépendante de leur taille. Par contre, la fréquence de résonance est elle, proportionnelle à la taille du système mécanique.

2.3 Réalisation

Ces paramètres de la batterie de filtres sont :

- Bande de fréquence analysée : fréquence min, fréquence max.
- Choix des filtres élémentaires (définis par leurs fonctions de transfert fréquentielles ou alors par leurs réponses impulsionnelles) :
  par exemple : - nature : Butterworth, Bessel, Cauer, ...,
  - ordre,
  - récursif,
  - filtre à Réponse Impulsionnelle Finie (RIF) avec éventuel compensation du retards.
- La batterie de filtres peut être précédée d'un filtre d'emphase pour s'adapter à la densité spectrale du bruit de fond (ou parfois à celle du signal comme pour la parole).

Au lieu de générer une structure comportant tous les filtres passe-bande en parallèle on a préféré prendre une structure en cascades (pour réduire les calculs) en utilisant des filtres passe-bas qui permettent de passer d'une octave à l'autre par sous-échantillonnage. La structure utilisée est donnée par la figure 1.

Le nombre total de filtres de la batterie se détermine à partir du choix du $\Delta f/f$ désiré et de la bande de fréquence (fmax-fmin) qu'on veut analyser :

Ainsi :

N_{oct} = nombre d'octaves

$$N_{oct} = E\left[\mathrm{Log}\,\frac{f_{max}}{f_{min}} \,/\, \mathrm{Log}2\right] + 1$$

et N_{FPB} = nombre de filtres passe-bande par octave vérifie :

$$\frac{\Delta f}{f} = 2 \cdot \frac{\sqrt[N_{FPB}]{2} - 1}{1 + \sqrt[N_{FPB}]{2}}$$

Par suite N_T = nb total de filtres = $N_{oct} \times N_{FPB}$.

- Descriptif des filtres passe-bas et passe-bande :

Les filtres passe-bas employés doivent avoir de bonnes performances, c'est-à-dire un minimum d'ondulation en bande passante et coupante, ceci afin d'éviter d'avoir une distorsion non tolérable sur certaines composantes du signal. De plus, les filtres passe-bas entraînent des retards qu'il faut compenser (voir figure 1).

Le filtre passe-bas utilisé est un filtre RIF, qui est un filtre non récursif qui présente l'avantage d'être toujours stable et causal. De plus, on le prend à réponse de phase linéaire. Ainsi, le signal se trouvant dans la bande passante du filtre est reproduit exactement à la sortie, avec un retard donné par la pente de la réponse fréquentielle de phase.

Les filtres passe-bande choisis sont des filtres de Butterworth, à minimum de phase sans compensation de retards. Ainsi, sur la représentation temps-fréquence obtenue en sortie de la batterie de filtres on observera donc une dérive temporelle due à ce phénomène de retard non corrigé.

- Représentation utilisées en sortie de la batterie de filtres :

  Elles sont données sur la figure 2. Quatre représentations sont possibles :

  . représentation temporelle de tous les signaux obtenus en sortie de chaque filtre,
  . énergie totale du signal dans chaque bande et dans chaque octave (relativement peu intéressante car ne permet pas de faire intervenir aspect temporel du signal),
  . représentations temps-fréquence du signal obtenu en procédant à une détection-intégration opérant sur des fenêtres glissantes pour chacun des signaux filtrés. Deux représentations sont alors possibles qui donnent la variation de l'amplitude du signal en fonction du temps et de la fréquence
  * une représentation 3D,
  * une représentation en niveaux de couleurs.

3. COMPARAISON Q CONSTANT - ONDELETTES

3.1 Analyse par ondelettes

L'analyse par ondelettes, proposée en 1983 par le géophysicien J. MORLET pour étudier les couches géologiques de sous-sols en recherche pétrolière, est une technique d'analyse temps-échelle qui permet d'analyser efficacement des signaux où se combinent des phénomènes d'échelles très différents.

Elle consiste à analyser un signal par une base de fonctions élémentaires $\Psi_{a,b}$ très particulières (dites ondelettes) fonctions du temps b et de la fréquence 1/a. Cette base peut dans certains cas être orthogonale.

Les coefficients $C_{a,b}$ qu'on affecte à chaque fonction élémentaire $\Psi_{a,b}$ pour décomposer un signal, donnent une information directe sur les propriétés temporelles et fréquentielles du signal. Ils se calculent en faisant l'intégrale du produit du signal x(t) par la fonction élémentaire $\Psi_{a,b}(t)$.

$$\boxed{C_{a,b} = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \cdot \Psi_{a,b}(t) \cdot dt} \qquad (5)$$

Chaque ondelette $\Psi_{a,b}(t)$ est déduite d'une fonction mère $\Psi(t)$ (dite fonction analysante) en opérant une translation en fréquence (paramètre b) et une contraction ou dilatation en temps (suivant que a est plus petit ou plus grand que 1), à savoir :

$$\boxed{\Psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \cdot \Psi\left[(t-b)/a\right]} \qquad (6)$$

D'après (5) et (6), on déduit l'expression mathématique associée à l'analyse par ondelettes, c'est-à-dire :

$$\boxed{C_{a,b} = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \cdot \frac{1}{\sqrt{a}} \cdot \Psi\left[(t-b)/a\right] \cdot dt} \qquad (7)$$

Parmi les propriétés des ondelettes on peut citer les plus importantes :

- les coefficients d'ondelette $C_{a,b}$ sont d'autant plus faibles que le signal x(t) à analyser est régulier,
- toutes les ondelettes $\Psi_{a,b}$ sont à moyenne nulle,
- l'analyse par ondelettes est inversible dans le cas où la base des ondelettes est orthogonale. On peut ainsi reconstruire le signal x(t) à partir des coefficients d'ondelettes $C_{a,b}$ en effectuant la somme en continu du produit $C_{a,b}$ par $1/a^2 . \Psi_{a,b}(t)$ pour toutes les valeurs des paramètres a et b.

$$x(t) = \iint_{a,b} C_{a,b} \frac{1}{a^2} \Psi_{a,b}(t) \cdot da \cdot db \qquad (8)$$

3.2 Comparaison

Au vue des propriétés citées ci-dessus pour l'analyse à Q constant et l'analyse par ondelettes, on peut dresser le parallèle suivant :

Q CONSTANT	ONDELETTES
- Les filtres passe-bande sont à $\Delta f/f$ constant. Ainsi, dans le domaine temporel, il est équivalent de dire que les réponses impulsionnelles des filtres sont d'autant plus longues que la fréquence centrale des filtres est basse.	- Les ondelettes $\Psi_{a,b}(t)$ sont d'autant plus dilatées (plus longues) que la fréquence 1/a est basse.
- L'amplitude des réponses impulsionnelles des filtres est d'autant plus importante que la fréquence centrale des filtres est élevée.	- L'amplitude des ondelettes $\Psi_{a,b}(t)$ est d'autant plus importante que la fréquence 1/a est élevée.
- Les fréquences centrales des filtres sont espacées logarithmiquement.	- Une échelle logarithmique en fréquence est adaptée à la nature de la transformation en ondelettes.

Pour chacun des filtres utilisés dans l'analyse à Q constant, on peut définir l'équation de convolution suivante :

$$s(t) = x(t) * g_{\omega_c}(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(\lambda) \cdot g_{\omega_c}(t - d) \cdot d\lambda \qquad (9)$$

En comparant les expressions (7) et (9), et en tenant compte des remarques du tableau ci-dessus, on en déduit que les fonctions ondelettes $\Psi_{a,b}(t)$ représentent en fait des choix particuliers des réponses impulsionnelles $g_{\omega c}(t)$ des filtres à Q constant.

La seule particularité originale au niveau ondelettes est l'utilisation de fonctions $g_{\omega c}(t)$ constituant des bases orthogonales permettant la synthèse des signaux analysés. Un progrès décisif, pour les ondelettes, serait la découverte d'un algorithme rapide de transformée en ondelettes, comme la FFT pour l'analyse de Fourier.

4. RESULTATS SUR SIGNAUX REELS

Les figures 4 et 5 présentent les résultats obtenus sur signaux réels d'acoustique sous-marine. Pour chaque signal on présente respectivement son allure temporelle et les représentations temps-fréquence associées à la transformée de Fourier court-terme et l'analyse pas bans de filtres à Q constant.

Sur la figure 4, on observe que le signal est composé d'une succession de deux clics comme indiqué sur le signal temporel. L'analyse de Fourier à court-terme ne nous permet pas de détecter parfaitement ces deux phénomènes. Par contre, l'analyse par banc de filtres à Q constant permet leurs détections et une analyse grossière. En effet, chacun des clics est composé de deux bosses relativement haute fréquence. Sur la représentation en niveaux de couleur que nous n'avons pas pu montrer ici on mesure parfaitement les durées des 2 impulsions ainsi que l'intervalle de temps qui les sépare.

Le signal traité figure 5 comporte quant à lui 3 impulsions caractéristiques. L'analyse de Fourier court-terme ne permet pas de détecter la 1ère impulsion et souffre d'un manque de résolution fréquentielle pour les deux dernières. L'analyse à Q constant détecte les trois impulsions : la première et la troisième impulsion sont bande étroite alors que la seconde comporte deux formants principaux. Ces conclusions sur l'allure fréquentielle sont comme pour le signal précédent, surtout visibles sur la représentation tempsfréquence en niveaux de couleur.

5. CONCLUSION

Les divers résultats obtenus sur signaux synthétiques et signaux réels ont montré tout l'intérêt de l'analyse par banc de filtres à Q constant dans l'étude de signaux dont les formants présentent un rapport $\Delta f/f$ sensiblement indépendant de la fréquence ce qui est souvent le cas des bruits impulsifs. Elle est en fait la méthode d'analyse primaire type, tolérante vis-à-vis des modèles rapides en temps de calcul et qui permet une détection et une analyse grossière (formes générales en temps et en fréquence, bandes occupées, instant d'apparition, données, ...) des bruits impulsifs.

BIBLIOGRAPHIE

[1] . MICHAEL W.F
Constant Q spectral analysis by means of an approximate fast Fourier transform.
NUSC Technical report 5585 ADA040813 April 1977

[2] . PAULUS E
A fast convolution procedure for discrete short -time spectral analysis with frequency-dependent resolution.
IEEE Trans. on ASSP,Vol 32,5,Oct 84,p1100-1104

[3] . KATES J.M
An auditory spectral analysis model using the chirp-Z transform
IEEE Trans. on ASSP,Vol 31,1,Feb 83,p148-156

Remerciements

Cette étude a été financée par le GERDSM.

FIGURE 1

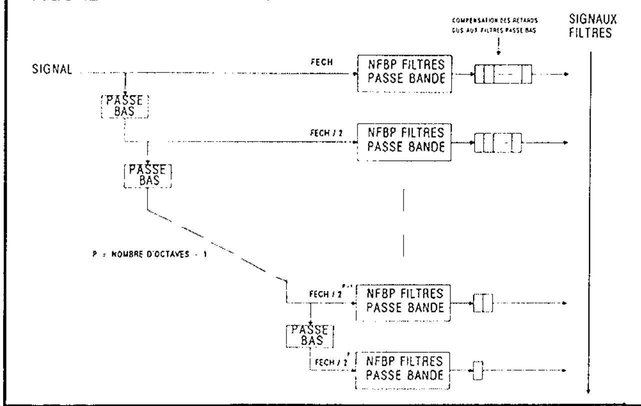

FIGURE 2

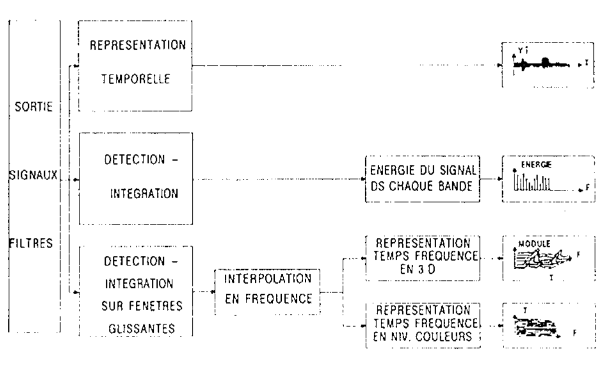

FIGURE 3

REPONSES IMPULSIONNELLES DES FILTRES

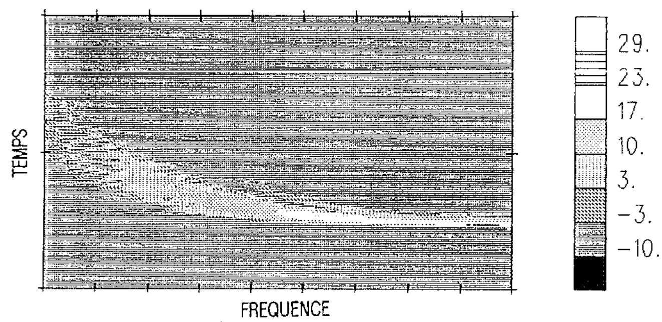

FIGURE 4

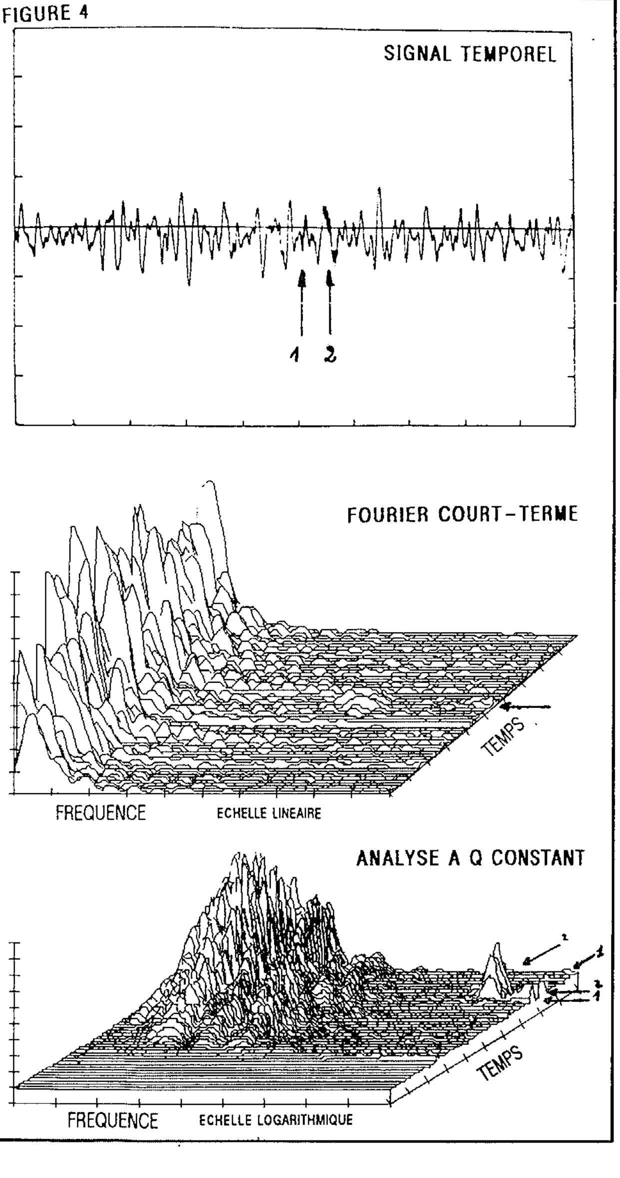

FIGURE 5