

## APPLICATION DE L'ANALYSE TEMPS-FREQUENCE A LA CARACTERISATION DE CIBLES

Patrick Flandrin<sup>1</sup>, Jean Sageloli<sup>2</sup>, Jean-Pierre Sessarego<sup>2</sup>, Manell Zakharia<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire de Traitement du Signal, UA 346 CNRS,  
ICPI, 25 rue du Plat, 69288 Lyon Cedex 02

<sup>2</sup> Laboratoire de Mécanique et d'Acoustique, LMA-CNRS,  
31, chemin J. Aiguier, 13402 Marseille Cedex 9

### Résumé

La caractérisation d'une cible élastique par analyse du champ acoustique diffusé nécessite de prendre en compte des caractéristiques à la fois temporelles et fréquentielles des différentes ondes de surface mises en jeu. Nous proposons donc d'aborder le problème directement dans le plan temps-fréquence, en choisissant comme outil de base la transformation de Wigner-Ville. Quelques possibilités de la méthode proposée (séparation d'ondes, estimation de résonances, d'amortissement, de dispersion de vitesse,...) sont illustrées sur un exemple simulé de coque sphérique.

### 1. Introduction

Le problème de la diffusion acoustique par des cibles élastiques immergées dans l'eau est un problème théorique (aux nombreuses applications) ayant reçu au cours de ces dernières années une attention toute particulière [1].

Une bonne compréhension des mécanismes de diffusion permet d'aborder ensuite le problème inverse, qui consiste à retrouver quelques caractéristiques d'une cible (nature du matériau, forme géométrique, épaisseur de paroi,...) à partir de l'observation du champ (rétro)diffusé.

De nombreuses études, théoriques et expérimentales, ont montré que les "résonances acoustiques" d'une cible sont liées à ses propriétés physiques et géométriques, ce qui nécessite de pouvoir caractériser ces résonances avec précision. Différentes méthodes ont été proposées dans le domaine fréquentiel, mais, par construction, elles ne peuvent mettre en évidence la structure temporelle du champ diffusé. Réciproquement, une analyse temporelle de la réponse impulsionnelle acoustique permet de séparer certains événements (comme les arrivées successives de différentes ondes), mais ne peut fournir aucune information sur leur structure fréquentielle.

### Summary

Characterizing an elastic target by analyzing the scattered acoustical field requires both temporal and spectral informations related to the different surface waves which are involved in the echo formation mechanism. We propose therefore to address the problem directly in the time-frequency plane, by choosing the Wigner-Ville transform as a basic tool. Some possibilities of the proposed method (separation of different waves, estimation of resonances, damping factors, velocity dispersion,...) are illustrated on a simulated example of a spherical shell.

Nous proposons donc de dépasser ces limitations en utilisant une analyse conjointe en temps et fréquence, susceptible de mettre en évidence, de façon simultanée, les aspects temporels et fréquentiels du champ diffusé.

Quelques possibilités de la méthode retenue seront illustrées sur un cas simulé de coque sphérique.

### 2. Réponse de coque sphérique

#### 2.1. Théorie

Si on analyse la réponse acoustique d'une sphère élastique en rétrodiffusion, on peut constater des phénomènes liés à la propagation d'ondes de surface, et qui se traduisent, pour certaines fréquences, par des sauts plus ou moins brusques de l'énergie rétrodiffusée.

Dans le cas de cibles de forme simple à symétrie de révolution, on a pu mettre en évidence un grand nombre d'ondes de surface pouvant effectuer plusieurs fois le tour de la cible : ondes de Rayleigh, de Franz, galerie à écho. Pour une longueur d'onde donnée, l'interférence de ces différentes ondes (ayant parcouru un certain nombre de tours) apparaît à l'observateur comme des "résonances" à la fréquence correspondante. Ces résonances apparaissent dans l'expression théorique générale de la fonction de forme



associée au champ diffusé [2] :

$$F_{\infty}(ka, \theta) = \frac{2}{ka} \left| \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n (2n+1) b_n(ka) P_n(\cos \theta) \right|$$

où  $a$  est le rayon de la sphère,  $k$  le nombre d'onde ( $k=2\pi\nu/c$ ,  $\nu$  étant la fréquence et  $c$  la célérité du son), et  $\theta$  l'angle d'observation. Les  $P_n$  sont des polynômes de Legendre et les  $b_n$  des fonctions (rapport de deux déterminants) caractéristiques de la géométrie de la cible. Les résonances correspondent alors aux singularités des fonctions  $b_n(ka)$ .

Il est clair qu'une telle formulation privilégie l'aspect fréquentiel des phénomènes mis en jeu. Une description temporelle équivalente est cependant possible par l'intermédiaire de ce que nous conviendrons d'appeler la réponse impulsionnelle d'une cible. Vue par l'observateur, la cible peut être considérée comme un filtre linéaire (spatio-fréquentiel) dont l'entrée est le signal émis et la sortie l'écho reçu. La réponse impulsionnelle de la cible n'est alors autre que l'écho correspondant à une impulsion acoustique idéale en sortie de transducteur.

Cette réponse contient toute l'information utile sur les phénomènes mis en jeu lors de la formation de l'écho. Une caractérisation de cible peut donc être envisagée à partir de la mesure de cette réponse.

## 2.2. Un exemple de simulation

La figure 1 présente un exemple de simulation d'une telle réponse impulsionnelle en rétrodiffusion sur une coque sphérique d'alliage d'aluminium (rayon extérieur : 1,25 cm ; rapport rayon intérieur / rayon extérieur : 0,90).

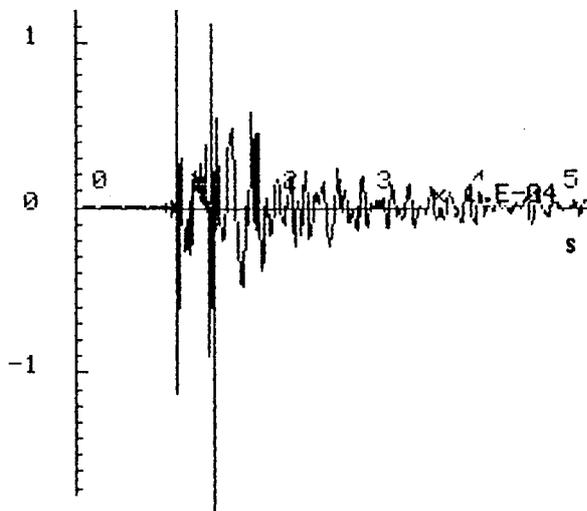


Figure 1

Réponse impulsionnelle de coque sphérique

Outre la réflexion spéculaire située tout au début du signal, on distingue, sans toutefois arriver à les séparer, une succession d'arrivées qui correspondent à des ondes effectuant plusieurs fois le tour de la sphère en rayonnant de l'énergie vers le milieu extérieur.

Une caractérisation complémentaire de cette réponse impulsionnelle repose classiquement sur une description fréquentielle, telle qu'elle est présentée en figure 2.

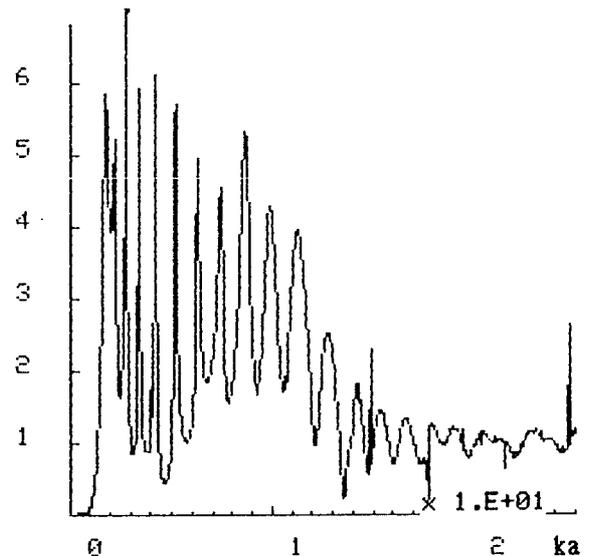


Figure 2

Fonction de forme de coque sphérique

Celle-ci offre une mise en évidence des différentes résonances mises en jeu, mais sans pouvoir les rattacher aux événements temporels correspondants.

Bien que toute l'information utile soit contenue dans chacune de ces représentations, on conçoit qu'une représentation mixte, combinant les aspects temporels et fréquentiels dans un seul diagramme, devrait permettre une meilleure compréhension de la structure des différentes ondes présentes. Ceci est en particulier vrai lorsque sont présents des phénomènes physiques qui, comme la dispersion, s'expriment explicitement en termes de paramètres temporels (temps de propagation) dépendant de la fréquence.

## 3. Analyse temps-fréquence

### 3.1. Transformation de Wigner-Ville

Un grand nombre de travaux ont été consacré ces dernières années aux différentes représentations temps-fréquence. Parmi toutes les solutions proposées, on retiendra ici celle reposant sur la transformation de Wigner-Ville, pour l'ensemble des bonnes propriétés qu'elle



satisfait, et en particulier celle de permettre une bonne localisation simultanément en temps et en fréquence [3-4].

Par définition, la transformation de Wigner-Ville associée à un signal temporel  $x(t)$  la quantité :

$$W_x(t, \nu) = \int_{-\infty}^{+\infty} x\left(t + \frac{\tau}{2}\right) x^*\left(t - \frac{\tau}{2}\right) e^{-i2\pi\nu\tau} d\tau$$

en notant  $\nu$  la fréquence. On dispose donc ainsi d'une fonction mixte pouvant s'interpréter comme décrivant, soit l'évolution temporelle de caractéristiques fréquentielles, soit la décomposition fréquentielle de la structure temporelle du signal analysée.

### 3.2. Calcul

D'un point de vue pratique, lorsqu'on travaille sur des signaux réels à temps discret ( $t = 0, 1, \dots$ ), on peut montrer que la classe la plus souple d'estimateurs permettant le calcul de  $W_x$  s'écrit [4] :

$$SPW_x(t, \nu) = 2 \sum_{n=-N+1}^{N-1} |h(n)|^2 K_M(t, n) e^{-i4\pi\nu n}$$

$$K_M(t, n) = \sum_{m=-M+1}^{M-1} g(m) z(t+m+n) z^*(t+m-n)$$

où  $z$  est le signal analytique associé au signal réel  $x$ ,  $h$  une fenêtre d'analyse à court-terme définie sur  $(2N-1)$  points et  $g$  une fenêtre de lissage définie sur  $(2M-1)$  points.

L'avantage de cette formulation est de permettre un contrôle indépendant des résolutions temporelle et fréquentielle, par l'intermédiaire des fonctions  $g$  et  $h$ , tout en se prêtant aisément à une implantation efficace par transformation de Fourier rapide.

### 4. Analyse temps-fréquence de réponse impulsionnelle

La Figure 3 présente une analyse temps-fréquence de la réponse impulsionnelle décrite au § 2.2. Cette figure montre que cette réponse est constituée d'une superposition d'un très grand nombre d'événements mettant en jeu des caractéristiques à la fois temporelles et fréquentielles. L'intérêt d'une représentation temps-fréquence est alors clairement de pouvoir discerner des événements qui ne peuvent être séparés ni en temps ni en fréquence.

La figure 4 montre une "squelettisation" de la figure 3. Sur cette figure, on peut distinguer les

divers phénomènes acoustiques mis en jeu lors de la formation de l'écho :

- écho spéculaire (a) ;
- existence de fréquences de résonance à divers taux d'amortissement : forts (b) ou faibles (c) ;
- apparition séquentielle d'ondes de surface (d), atténuation et dispersion de vitesse de ces dernières.

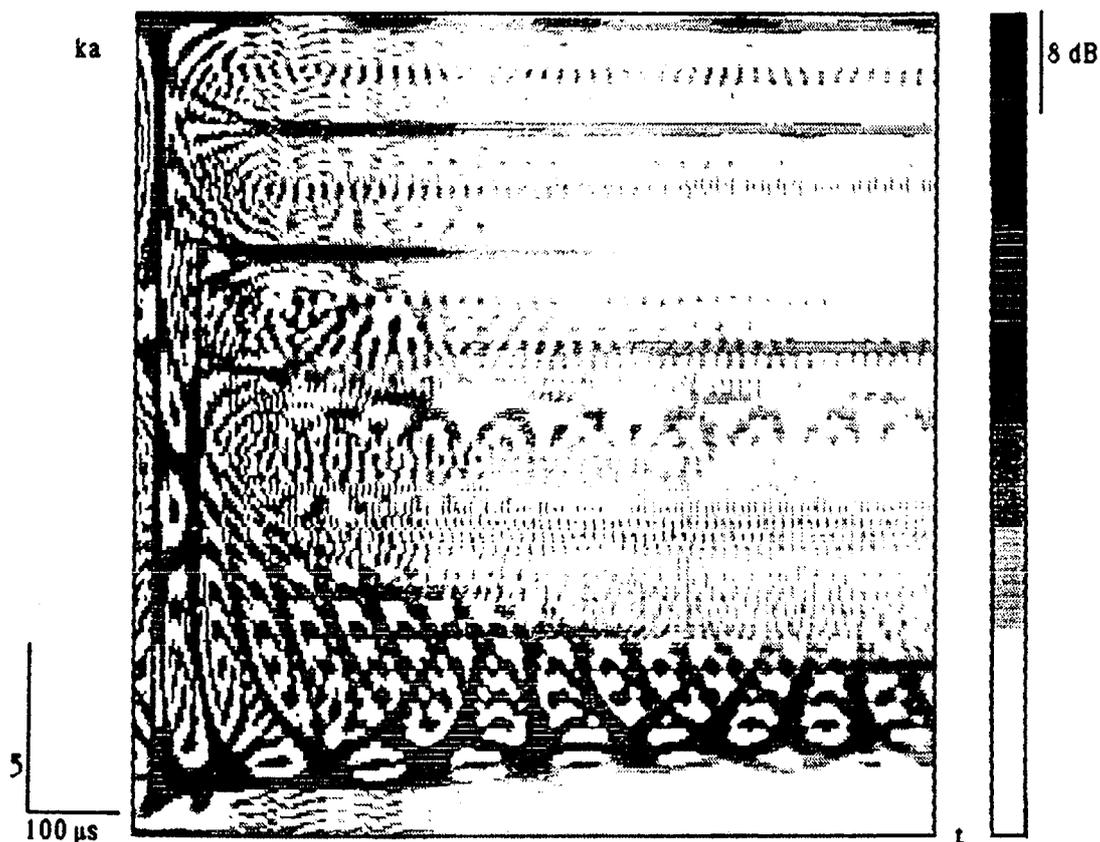
### 5. Conclusion

On a pu montrer, sur un exemple simple de simulation, les avantages apportés par une analyse temps-fréquence à la compréhension des mécanismes de formation d'écho. Cette description, ici qualitative, peut très bien être utilisée pour des caractérisations quantitatives (fréquences de résonance [5], dispersion de vitesse [6]).

L'affinement de telles méthodes devrait permettre une caractérisation plus performante de cibles, pouvant conduire à de nouveaux protocoles de reconnaissance dans le plan temps-fréquence.

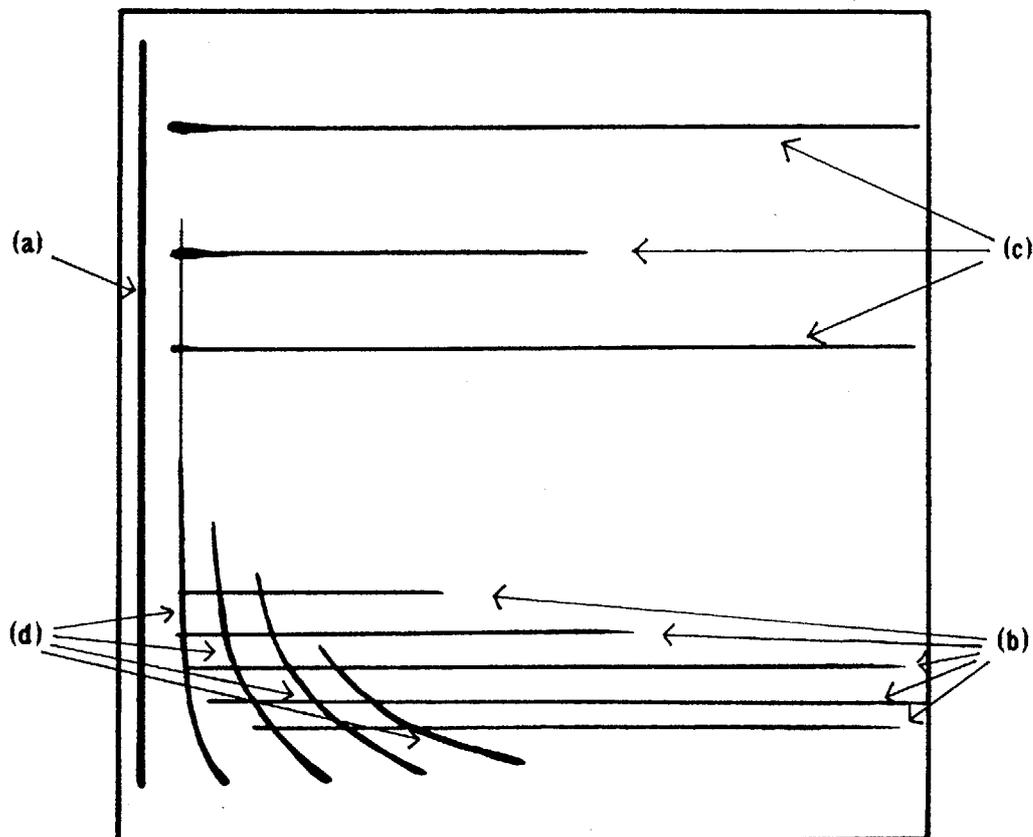
### 6. Références

- [1] D. Brill, G. Gaunard : "Resonance Theory of Elastic Waves Ultrasonically Scattered from an Elastic Sphere", *J. Acoust. Soc. Am.*, **81**(1), pp.1-21, 1987.
- [2] G. Deprez, R. Hazebrouck, "Diffraction d'une Onde Impulsive Sphérique par une Sphère Creuse Plongée dans l'Air", *Rev. Cethedec*, **72**, pp.73-90, 1982.
- [3] T.A.C.M. Claasen, W.F.G. Mecklenbräuer, "The Wigner Distribution - A Tool for Time-Frequency Signal Analysis", *Philips J. Res.*, **35**, pp.217-250, 276-300, 372-389, 1980.
- [4] P. Flandrin, B. Escudié, "Principe et Mise en Oeuvre de l'Analyse Temps-Fréquence par Transformation de Wigner-Ville", *Traitement du Signal*, **2**(2), pp. 143-151, 1985.
- [5] N.C. Yen, "Implementation of the Wigner Distribution Function for Representing the Dynamics of Acoustic Signal Spectra", 111th ASA Meeting, Cleveland, 1986.
- [6] P. Flandrin, J. Sageloli, J.P. Sessarego, M. Zakharia, "Application of Time-Frequency Analysis to the Characterization of Surface Waves on Elastic Targets", *Acoust. Lett.*, **10**(2), pp.23-28, 1986.



**Figure 3**

Analyse temps-fréquence de la réponse impulsionnelle  
Fenêtre d'analyse h de 197  $\mu$ s, fenêtre de lissage g de 9  $\mu$ s



**Figure 4**

"Squelettisation" de l'analyse temps-fréquence de la figure 3, montrant :  
écho spéculaire (a), résonances à amortissements forts (b) et faibles (c), ondes dispersives (d)