

Analyse des échos de cibles Sonar par Transformation de Huang-Teager (THT)*

Analysis of Sonar targets by Teager-Huang Transform (THT)

**Jean-Christophe Cexus^{1,2}, Abdel-Ouahab Boudraa^{1,2},
Abdelkhalak Bouchikhi^{1,2} et Ali Khenchaf²**

¹IRENav, École Navale, Lanvéoc-Poulmic, BP600, 29240 Brest-Armées

²E312 (EA 3876), ENSIETA, 2 rue François Verny, 29806 Brest Cedex 9

{boudra,bouchkhi}@ecole.navale.fr

{Jean-Christophe.Cexus,Ali.khenchaf}@ensieta.fr

Manuscrit reçu le 18 novembre 2006

Résumé et mots clés

Dans cet article, nous présentons une approche de l'analyse des échos de cibles Sonar basée sur une nouvelle représentation temps-fréquence appelée Transformation de Huang Teager (THT). Cette méthode est une combinaison de la décomposition modale empirique de Huang et de l'opérateur de démodulation de Teager-Kaiser. Contrairement aux représentations temps-fréquence classiques, la THT ne présente pas d'interférences et ne nécessite pas de fonctions de base pour la décomposition des signaux. L'analyse des échos de cibles Sonar est réalisée à partir de leurs réponses impulsionnelles en champ libre. Nous comparons les résultats d'analyse des réponses impulsionnelles de cibles sphériques et cylindriques de la THT à ceux de la transformation de Wigner-Ville lissée.

Analyse temps-fréquence, Décomposition modale empirique, Opérateur d'énergie de Teager-Kaiser, Transformation de Huang-Teager (THT), Échos de cibles Sonar.

Abstract and key words

In this paper, an approach for Sonar targets analysis based on a new energy-time-frequency representation, called Teager-Huang Transform (THT), is presented. The THT is the combination of the empirical mode decomposition of Huang and the Teager-Kaiser signal demodulation method. The THT is free of interferences and does not requires basis functions for signals decomposition. The analysis is carried out, in free field, from the impulse responses of Sonar targets. We compare the analysis results of impulse responses of spherical and cylindrical targets given by THT to those of the smoothed Wigner-Ville transformation.

Time frequency analysis, Empirical mode decomposition, Teager-Kaiser energy operator, Teager Huang Transform (THT), Sonar echos.

* Des résultats préliminaires de ce travail ont été présentés au congrès CMM'06.

1. Introduction

Au cours de ces dernières années, le problème de la diffusion acoustique par des cibles immergées dans l'eau a reçu une attention toute particulière. En effet, une bonne compréhension des mécanismes de diffusion permet de résoudre par la suite le problème inverse qui consiste à caractériser un objet (forme géométrique, épaisseur du matériaux...) à partir de l'analyse du signal rétrodiffusé par celui-ci. La reconnaissance d'une cible Sonar à partir de sa signature acoustique présente un grand intérêt dans le domaine militaire (classification de mines et de sous-marins) ou civil (reconnaissance des espèces de poisson en pêche). Par exemple, dans le contexte de la lutte anti-sous-marine, la reconnaissance de cibles Sonar présente un intérêt opérationnel important. De nombreux travaux, théoriques et expérimentaux, ont montré que la signature acoustique d'une cible (ou Réponse Impulsionnelle (RI)) est liée à la nature du matériau et sa forme géométrique [1-3]. Inversement, il est possible de caractériser finement une cible insonifiée à partir du seul signal rétrodiffusé par celle-ci [4]. Différentes méthodes ont ainsi été proposées dans le domaine fréquentiel, mais, par construction, elles ne peuvent mettre en évidence la structure temporelle du champ diffusé. Inversement, une analyse temporelle de la RI permet de séparer certains événements (comme les arrivées successives de différentes ondes), mais ne peut fournir aucune information sur leur structure fréquentielle [5]. Pour y remédier, des approches qui tiennent compte à la fois du paramètre temps et celui de la fréquence ont été proposées. Ces méthodes Temps-Fréquence (TF) ont permis une meilleure compréhension des phénomènes mis en jeu permettant ainsi la mise en place de stratégies de classification de cibles [6-10] et ont montré leur efficacité aussi bien pour la discrimination entre des cibles naturelles et manufacturées que pour l'estimation des caractéristiques physiques de la cible. Ainsi, des stratégies basées sur la Distribution de Wigner-Ville (DWV) pour la description des RI des cibles Sonar ont été proposées [6, 11, 12]. On montre que ce type de représentation est approprié pour la compréhension fine des mécanismes physiques de formation de l'écho d'une cible Sonar (écho spéculaire, ondes de surface...). D'autre part, il est à noter que les méthodes basées sur l'analyse TF ne nécessitent qu'une seule RI, et donc une seule mesure réelle, à l'inverse des méthodes classiques fréquence par fréquence [13]. Ainsi, la DWV appliquée à la RI d'une cible Sonar permet d'obtenir la signature TF caractéristique de cette cible insonifiée. Cette signature TF se caractérise principalement par deux catégories de structures : les interférences dues à la nature bilinéaire de la DWV (non pertinentes) [14] et des structures énergétiques que l'on peut associer à l'écho spéculaire ainsi qu'à des phénomènes physiques de propagation à la surface de l'objet [12]. Ces structures énergétiques peuvent se décrire dans le plan TF par des grandeurs caractéristiques que sont l'Amplitude Instantanée (AI) et la Fréquence Instantanée (FI), qui permettent d'observer respectivement les variations d'amplitudes et spectrales en fonction du temps [14-17].

L'un des problèmes de la DWV (ou toute autre distribution de la classe de Cohen) est l'existence de termes d'interférences [14, 16, 17] qui dégradent la lisibilité et l'interprétation des Représentations TF (RTF). En effet, ils ne correspondent à aucun phénomène physique de propagation. D'autre part, ces interférences peuvent être faussement interprétées comme une composante supplémentaire du signal et, d'autre part, peuvent interférer avec les composantes propres du signal, ce qui a pour effet de les masquer. Par conséquent le recours au lissage TF pour diminuer les effets des interférences s'impose. Plus exactement un compromis est nécessaire entre la suppression des interférences et la perte de résolution TF de l'analyse et celle des propriétés sur les marginales, le retard de groupe et la FI. Par exemple, pour la DWV une fenêtre de lissage (temporelle ou fréquentielle) trop petite supprime les interférences mais affaiblit la résolution temps-fréquence. Bien que la plupart de ces difficultés d'interprétation puissent être plus ou moins surmontées par un filtrage approprié [14, 16, 17] ou de post-traitement comme par exemple la réallocation [16-18], la méthode reste toujours basée sur le noyau de la transformée de Fourier et donc reste tributaire des complications possibles inhérentes à celle-ci [19]. D'autre part, un autre inconvénient de la plupart des RTF est le pavage TF qui n'est pas naturellement adapté à la forme des signaux [20]. Enfin en plus des RTF classiques, d'autres méthodes de décomposition telles que les ondelettes ou le matching poursuit ont été aussi utilisées pour analyser des signaux non stationnaires. Là encore, une limite de ces dernières est que les fonctions de base (ondelette mère) sont fixes, et des adaptations sont nécessaires pour mieux représenter ou approximer le signal [21], [22]. Pour pallier ces limites nous proposons la Décomposition Modale Empirique (DEM ou EMD pour Empirical Mode Decomposition), récemment introduite par Huang *et al.* [19], pour analyser les RI de cibles Sonar qui sont, en général, des signaux non stationnaires et multi composantes [23]. Le principe repose sur la décomposition, de manière adaptative de la RI en composantes oscillantes appelées fonctions modes empiriques ou IMF (pour Intrinsic Mode Functions). Ces fonctions sont obtenues directement à partir de la RI au moyen d'un processus itératif appelé *tamisage* (ou Sifting) [19]. Les IMF sont adaptées (intrinsèques) au signal car elles représentent directement les oscillations naturelles présentes dans le signal. L'essence même de l'EMD repose sur une décomposition adaptée du signal comme étant une succession de contribution d'oscillations rapides et lentes.

Comme l'EMD n'est pas une RTF au même titre, par exemple que la DWV, l'adjonction d'une méthode de démodulation pour estimer les AI et les FI de la RI de chaque IMF est nécessaire pour une analyse TF. En utilisant la Transformée de Hilbert (TH) on obtient une projection bidimensionnelle du signal, de type TF, appelée transformation de Huang-Hilbert [19]. Une approche analogue de démodulation d'un signal a été développée par Maragos *et al.* [24, 25] en se basant sur l'Opérateur d'Énergie de Teager-Kaiser (OETK ou TKEO pour Teager-Kaiser Energy Operator). Alors que la TH repose sur un opérateur intégral linéaire, l'approche par TKEO est basée sur un

opérateur différentiel non linéaire [26]. La conjonction EMD et TKEO est appelée: Transformation de Huang-Teager (THT) [23, 27]. D'autre part, le TKEO qui est une méthode locale donne une bonne approximation de la FI et l'AI avec un faible temps de calcul.

Dans cet article, nous décrivons dans le plan TF la signature acoustique d'un écho de cible Sonar par THT. Notons, que contrairement au TKEO, la THT n'est pas limitée aux signaux à bande étroite [23, 27]. Des résultats récents ont montré l'intérêt de la THT pour l'identification des cibles Sonar de nature différentes: cible naturelle pleine et cible manufacturée creuse [10]. Nous montrons dans cet article que la THT est un outil adapté pour l'analyse et l'identification des mécanismes de formation de la diffusion acoustique par des cibles immergées dans l'eau: identification de l'écho spéculaire et des ondes de surface. Nous comparons la RTF de la THT avec d'autres RTF classiques comme la DWV, la Pseudo Distribution Wigner-Ville Lissée (PDWVL) sur des RI synthétiques de cibles sphériques ou cylindriques.

2. Mécanismes acoustiques de formation d'écho

Le problème de la diffusion acoustique par des objets immergés dans l'eau a été abondamment étudié dans la littérature [1-3, 28, 29]. Des travaux sur des obstacles cylindriques ou sphériques [3, 30] ont mis en évidence que la pression diffusée $P_{\text{diffusée}}$ par la cible insonifiée par une onde incidente s'écrit comme la somme de différentes contributions (Fig. 1):

$$P_{\text{diffusée}} = P_{\text{géométrique}} + P_{\text{surface}} \quad (1)$$

avec $P_{\text{diffusée}}$ la pression acoustique diffusée par l'obstacle (fonction de transfert de la RI de la cible Sonar), $P_{\text{géométrique}}$ associée à l'ensemble des ondes incidente, réfléchi et trans-

mise (acoustique géométrique) et P_{surface} l'ensemble des ondes de surface (internes ou externes). Cette pression diffusée dépend, entre autre, des caractéristiques du matériau et de la forme géométrique de la cible. Ainsi, dans le cas de cibles de formes simples à symétrie de révolution, le signal temporel est constitué d'un écho spéculaire correspondant à la réflexion géométrique et une série d'échos liés aux ondes de surface pouvant effectuer plusieurs tours autour de la cible. On montre que, pour une longueur d'onde donnée, l'interférence des ondes de surface entre elles se manifeste par des résonances à la fréquence considérée. Ces résonances apparaissent dans l'expression théorique de la fonction de forme du champ rétrodiffusé par la cible [1, 4]. Cette formulation privilégie l'aspect fréquentiel des phénomènes physiques mis en jeu. Une expression temporelle équivalente est possible en considérant la transformée de Fourier inverse du champ de pression [1]. La RI contient alors toutes les informations de formation de l'écho et une caractérisation est alors envisageable à partir de la connaissance unique de ce signal temporel via une analyse TF.

3. Transformation de Huang-Teager (THT)

Dans cet article, l'EMD est utilisé conjointement avec le TKEO pour estimer les grandeurs instantanées (AI et FI) du signal. La combinaison de l'EMD (ou Transformation de Huang) et le TKEO est la THT. L'EMD décompose le signal en IMF et les grandeurs FI et AI de chaque IMF sont estimées par un algorithme de démodulation énergétique, basé sur le TKEO, appelé ESA (Energy Separation Algorithm) [25]. Contrairement à l'approche ESA, la THT n'est pas limitée à des signaux à bande étroite. Si $x(t)$ est un signal à plusieurs composantes AM-FM, alors un filtrage passe-bande est nécessaire pour isoler chaque composante avant l'application de l'ESA. Ainsi, l'EMD est vu comme un filtrage en bandes de fréquences pour séparer les différentes composantes du signal dans le domaine temporel et par

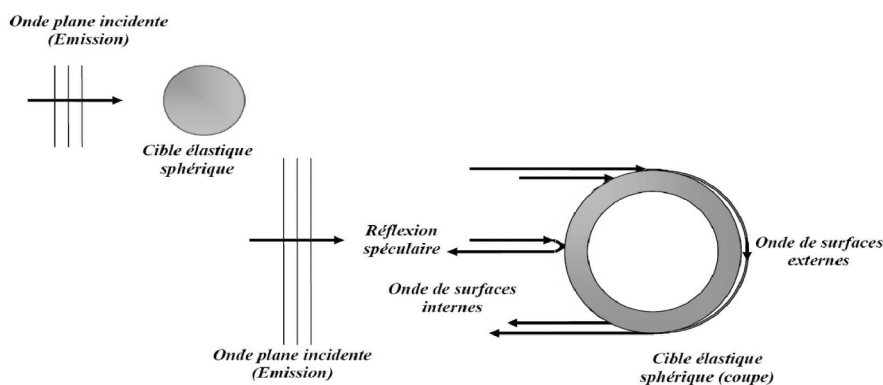


Figure 1. Phénomènes de diffusion acoustique sur une cible (coque sphérique élastique): propagation des ondes de surface et écho spéculaire [4].

conséquent décrire le signal initial en une somme de composantes AM-FM. La représentation finale des FI et des AI du signal est une RTF. Le schéma de la THT est divisé en deux parties : séparation du signal en IMF par tamisage, et démodulation par ESA pour l'estimation des FI et des AI des IMFs obtenues [23, 27, 31]. Notons que la THT est basée sur l'EMD et le TKEO qui sont deux méthodes non-linéaires [23]. De plus, le lien établi entre le TKEO et la DWV montre que la THT permet d'analyser les signaux non-stationnaires [32] et multi-composantes [23, 27, 31].

3.1. Décomposition modale empirique

La décomposition par EMD s'auto-détermine à partir des caractéristiques naturelles du signal. Ainsi, l'EMD est entièrement pilotée par les données et, contrairement à la transformée de Fourier ou aux ondelettes, cette décomposition ne repose sur aucune famille de fonctions (ondelette mère) définie à priori. L'EMD peut être vue comme l'équivalent de l'analyse en composantes principales mais dédiée aux signaux non-stationnaires. Tout signal peut être décomposé en un nombre fini d'IMF de type AM-FM. L'appellation IMF vient du fait que celle-ci est déterminée par les caractéristiques oscillatoires et locales présentes dans le signal. Un mode est une IMF si sa moyenne est nulle et si les nombres de ses maxima et de ses minima sont les mêmes ou différents de un [19]. L'EMD sélectionne, en premier lieu, l'oscillation dont la fréquence est la plus élevée du signal. Ainsi, localement, chaque IMF contient l'oscillation de plus basse fréquence que celle extraite juste avant [19, 33]. L'EMD n'a pas de base théorique mais est uniquement défini par un algorithme de tamisage. Ce processus est réalisé en deux étapes : (i) la détection des extrema du signal et (ii) l'interpolation par ces extrema dont les étapes sont données par le pseudo-code suivant :

où T est la durée du signal et \leftarrow est l'opération d'affectation. Le tamisage est répété plusieurs fois (i fois) jusqu'à ce que h soit une IMF vérifiant les conditions : (R1) chaque mode a le même nombre (à un près) de passages par zéro et d'extrema ; (R2) la moyenne des enveloppes supérieure et inférieure de chaque mode est nulle. Le résultat du tamisage appliqué à un signal $x(t)$ est une somme d'IMF, $IMF_j(t), j = 1, \dots, N$ et un résidu $r_N(t)$ que l'on peut écrire sous la forme :

$$x(t) = \sum_{j=1}^N IMF_j(t) + r_N(t), \quad (2)$$

avec N est le nombre de modes trouvé. La décomposition est entièrement pilotée par les données et ne nécessite pas de pré-traitement. L'EMD est composée de deux boucles : l'une pour extraire l'IMF (qui détermine le niveau de profondeur N de la décomposition) et l'autre conditionne la fonction $IMF_j(t)$ de manière à valider la définition d'une IMF [19] : c'est le processus de tamisage. Ce processus a principalement deux effets : (a) éliminer les petites oscillations (*riding waves*) et (b) adoucir les trop fortes amplitudes d'oscillations. La boucle de tamisage est pilotée par un critère d'arrêt (étape : 3f) noté $SD(i)$, compris en pratique entre 0.2 et 0.3, [19]. Ce critère permet de garantir que les composantes des IMF ont une signification physique en terme de modulation d'amplitude et de fréquence d'un signal mono-composante [19]. En fait, les contraintes imposées aux IMF (moyenne nulle et symétrique) permettent d'estimer la FI et l'AI en utilisant la TH [19]. Enfin l'objectif principal de l'EMD est de réaliser une décomposition temporelle du signal en mono-composantes pour pouvoir calculer leurs FI et AI. Par la suite, l'estimation des FI et de AI permet de construire une RTF [19].

Tableau 1. Pseudo-code de l'EMD.

<p>Étape 1) Fixer $\epsilon, j \leftarrow 1$ (j^e IMF)</p> <p>Étape 2) $r_{j-1}(t) \leftarrow x(t)$ (résidu)</p> <p>Étape 3) Extraire la j^e IMF :</p> <p>(a) $h_{j,i-1}(t) \leftarrow r_{j-1}(t), i \leftarrow 1$ (i, itération de la boucle de <i>sifting</i>)</p> <p>(b) Extraire les maxima et minima locaux de $h_{j,i-1}(t)$</p> <p>(c) Calculer les enveloppes supérieure et inférieure : $U_{j,i-1}(t)$ et $L_{j,i-1}(t)$ par interpolation avec les maxima et minima locaux de $h_{j,i-1}(t)$ respectivement.</p> <p>(d) Calculer l'enveloppe moyenne : $\mu_{j,i-1}(t) \leftarrow (U_{j,i-1}(t) + L_{j,i-1}(t))/2$</p> <p>(e) Mettre à jour : $h_{j,i}(t) \leftarrow h_{j,i-1}(t) - \mu_{j,i-1}(t), i \leftarrow i + 1$.</p> <p>(f) Calculer le critère d'arrêt : $SD(i) = \sum_{t=0}^T \frac{ h_{j,i-1}(t) - h_{j,i}(t) ^2}{(h_{j,i-1}(t))^2}$</p> <p>(g) Décision : répéter l'étape (b)-(f) tant que $SD(i) < \epsilon$ et mettre $IMF_j(t) \leftarrow h_{j,i}(t)$</p> <p>Étape 4) Mettre à jour le résidu : $r_j(t) \leftarrow r_{j-1}(t) - IMF_j(t)$</p> <p>Étape 5) Répéter l'étape 3 ($j \leftarrow j + 1$) jusqu'à ce que le nombre d'extrema dans $r_j(t)$ soit < 2</p>

3.2. Opérateur d'énergie de Teager-Kaiser

Le TKEO, $\Psi[\cdot]$, appliqué à un signal $x(t)$ à valeurs réelles est défini dans le domaine continu par [25]:

$$\Psi[x(t)] = [\dot{x}(t)]^2 - x(t)\ddot{x}(t) \quad (3)$$

où $\dot{x}(t)$ et $\ddot{x}(t)$ correspondent respectivement à la dérivée première et seconde de $x(t)$. Dans le cas discret et en fonction de la forme de discrétisation choisie pour l'opérateur de dérivation, différentes formules discrètes de l'opérateur $\Psi[\cdot]$ peuvent être obtenues [25, 34]. Ici, nous ne considérons qu'un seul cas, à savoir la différence finie du premier ordre à gauche [25]:

$$\Psi[x[n]] = x^2[n] - x[n+1] \cdot x[n-1] \quad (4)$$

Une des propriétés importantes du TKEO est qu'il est quasi instantané. En effet, il ne nécessite à chaque instant que seulement trois échantillons pour calculer l'énergie. Cette excellente résolution en temps, permet alors de capturer les fluctuations d'énergie du signal. En outre, il est très facile à mettre en oeuvre. Rappelons que la sortie du TKEO est l'énergie créée par un système harmonique (masse + ressort) pour générer le signal à analyser. La démodulation par ESA consiste à estimer l'énergie du système $\Psi[\cdot]$ permettant de séparer l'AI $a(t)$ et la FI $f(t)$ d'un signal mono-composante AM-FM $x(t)$ [25]:

$$f(t) \approx \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\Psi[\dot{x}(t)]}{\Psi[x(t)]}}, \quad a(t) \approx \frac{\Psi[x(t)]}{\sqrt{\Psi[\dot{x}(t)]}}; \quad (5)$$

Une des formes discrètes associées à la méthode ESA, appelée DESA (Discrete ESA), est donnée par [25, 35]:

$$\tilde{FI}(n) = \arccos\left(1 - \frac{(\Psi[y_n] + \Psi[y_{n+1}])}{4(\Psi[x_n])}\right), \quad (6)$$

$$\tilde{AI}(n) = \sqrt{\frac{(\Psi[x_n])}{1 - \left(1 - \frac{(\Psi[y_n] + \Psi[y_{n+1}])}{4(\Psi[x_n])}\right)}}, \quad (7)$$

avec $y[n] = x_n - x_{n-1}$.

L'estimation de la FI par la relation (6) d'un signal multi-composantes impose les mêmes contraintes que celles avec la TH [23, 26, 36]. Notons que l'implémentation de la méthode DESA n'est pas complexe et possède une meilleure résolution temporelle que la démodulation par TH [26]. D'autre part, l'approche basée sur la TH nécessite le calcul d'une intégrale (mesure globale), linéaire, sur tout le support du signal alors que l'approche DESA, basée sur $\Psi[\cdot]$, est limitée à trois échantillons (mesure locale). L'une des limites du TKEO ou de l'approche DESA est la sensibilité en environnement très bruité [31]. En outre, ces méthodes sont limitées aux signaux de petites largeurs de bandes de fréquences (faible variation par rapport à la porteuse) [24, 26].

4. Résultats et Discussion

L'analyse TF des RI de cibles Sonar par THT est illustrée par deux types de cibles: cylindre et sphère (creux(se), plein(e)) avec différents rapports de rayons b/a où a est le rayon externe et b le rayon interne. Deux matériaux sont utilisés: Nickel (Ni) et Nickel-Molybdène (NiMol). On se limite aux cas de cibles en champ libre. La figure 2(a) montre le cas d'une RI d'une cible sphérique creuse en NiMol ($b/a = 0.94$). Les figures 2(a), 2(b), 2(c), 2(d) montrent les RTF associées à la RI obtenues avec respectivement: la transformée de Fourier à court terme ($|STFT|^2$) (Fig. 2(a)), la DWV (Fig. 2(b)), la PDWVL (Fig. 2(c)), la PDWVL réallouée (Fig. 2(d)) ainsi qu'avec la THT (Fig. 3(b)). La figure 3(a) illustre la décomposition de la RI en IMF. Les IMF_1 et IMF_9 correspondent respectivement aux plus hautes fréquences (oscillation rapide) et aux plus basses fréquences (oscillation lente) du signal. La dernière IMF correspond à la tendance globale de la RI. Sur les RTF des figures 2 et 3 sur lesquelles les différentes composantes des ondes de surface (échos ou motifs énergétiques) notées « 0 », « 1 », « 2 », « 3 » et « 4 » ont été entourées par un trait rouge de façon à faciliter leur identification. La figure 2(d) montre que malgré un lissage et une réallocation de la DWV, les interférences persistent et les motifs « 1 », « 2 », « 3 » et « 4 » situés autour de $t = 70 \mu s$ ne sont pas bien séparés. Ces mêmes motifs sont mieux identifiés sur la représentation de la THT (Fig. 3). Nous présentons les résultats de la DPWVL et de la THT pour des RI associées à des cibles de formes différentes: sphérique (Figs. 5, 7) et cylindrique (Figs. 6, 8), de matériaux différents: NiMol (Figs. 4), Nickel (Fig. 5) et d'épaisseurs différentes ($b/a = 0.94$ et $b/a = 0.96$) (Figs. 4, 5, 7). L'observation du signal temporel ou RI (Figs. 2a, 3a) fait apparaître une succession de composantes plus ou moins distinctes. La première arrivée correspond à l'écho spéculaire. On note par la suite une succession d'échos qui finissent pas se chevaucher et, dans ces conditions, les mesures deviennent difficiles, voire impossibles. Ces phénomènes physiques peuvent être mis en évidence plus facilement, par exemple, dans les différentes RTF illustrées par les figures 2 et 3(b). Elles permettent ainsi de mettre en évidence le changement local des propriétés associées au signal et, notamment de mettre en lumière le caractère fugitif du contenu spectral présent dans le signal [4, 6, 11]. On y observe, plus clairement, l'effet de la dispersion des ondes de surface. L'ensemble des motifs observés sur la RTF constitue alors ce que l'on appelle la signature TF de la cible Sonar. On y distingue, outre l'écho spéculaire (motif « 0 »), une succession d'arrivées qui correspondent à des réflexions éventuelles à l'intérieure de la cible. Finalement, on observe des arrivées plus tardives qui correspondent à des ondes de surface plus ou moins dispersives effectuant plusieurs fois le tour de la cible et rayonnant de l'énergie vers le milieu extérieur.

Dans le cas considéré (Figs. 2, 3), le modèle théorique de diffusion acoustique¹ prédit que seules des ondes dispersives de type Lamb (symétriques et antisymétriques) peuvent se propager. C'est ce qui est mis en évidence à l'aide des diverses analyse TF indiquant les différents types d'ondes de surface que l'on peut observer [4, 11, 37], (Figs. 2, 3(b)):

- « 0 »: l'écho spéculaire, réplique du signal émis,
- « 1 »: les ondes de Lamb antisymétriques a_0^+ ,
- « 2 »: les ondes de Lamb antisymétriques a_0^- ,
- « 3 »: les ondes de coïncidence ou ondes d'interactions entre a_0^+ et a_0^- ,
- « 4 »: les ondes de Lamb symétriques S_0 .

Les motifs « 3 » sont associés à l'interaction entre les ondes de Lamb a_0^+ et a_0^- . Ces motifs peuvent s'interpréter comme des arrivées successives d'une onde acoustique tournant autour de la cible. A noter que dans certains cas, notamment pour les coques fines voir très fines, ces motifs peuvent être plus énergétiques que le spéculaire (motif « 0 ») [37]. Qualitativement, on peut noter que la RI perd de son énergie, à chaque tour. On peut remarquer que cette perte est plus importante dans les hautes fréquences que dans les basses fréquences. D'autre part, on peut remarquer la dispersion de vitesse des ondes de surface (essentiellement dans les motifs « 3 »). En effet, il y a une inclinaison des motifs TF due au fait que la vitesse de propagation diminue avec la fréquence. En d'autres termes, les structures basses fréquences se déplacent plus vite (peu dispersive) que celles de hautes fréquences (plus dispersive) (Figs. 2, 3(b), 4, 6). Ainsi, grâce à la RTF, les différentes structures qui ne peuvent pas être séparées dans le domaine temporel ou fréquentiel peuvent être plus facilement identifiées (Figs. 2(c), 2(d), 3(b)). Les motifs « 3 » semblent donc appropriés pour caractériser finement les propriétés des coques [7, 37, 38]. Les différents motifs sont bien identifiés avec les différentes représentations mais davantage mieux localisés avec la THT (Fig. 3(b)) qu'avec la DPWVL (Fig. 2(c)) ou encore que sa version réallouée (Fig. 2(d)). Il est important de garder à l'esprit que le THT est une approche conduite par les données et n'exige ainsi aucune fonction de base comparée aux RTF classiques telles que la DPWVL ou autres approches. Si l'on compare les différentes RTF selon le type de cible, on peut noter que la signature acoustique est différente suivant le type de matières considérées (Figs. 4, 5) ou encore selon la forme considérée (Fig. 6) voir aussi selon l'épaisseur de la cible ($e = b - a$) (Figs. 7, 8). On peut remarquer, dans le cas de la sphère creuse, que les ondes de surface s'atténuent rapidement et se concentrent essentiellement en des

motifs présents à basse fréquence. À l'opposé, la sphère (ou cylindre) plein(e) est décrite par des phénomènes moins localisés et plus diffus dans le plan TF. La localisation et l'identification des différentes ondes de surface sont beaucoup plus difficiles à réaliser notamment due d'une part aux caractéristiques physiques des ondes de surface et d'autre part à la présence importante des interférences présentes dans la PDWVL. Les images obtenues à l'aide de la THT présentent moins d'interférences mais l'identification des phénomènes physiques présents à la surface reste délicate. Cette difficulté s'explique par les caractéristiques physiques même de ce type d'onde [4, 28].

5. Conclusion

Dans cet article, la THT est appliquée à l'analyse des échos de cibles Sonar à partir de leurs RI. Contrairement aux RTF classiques la THT ne présente pas de termes d'interférences et ne nécessite pas la spécification d'une fonction de base pour la décomposition de la RI. La THT est entièrement pilotée par les données. Les résultats d'analyse de quelques RI synthétiques de cibles de Sonar, creuses et pleines, montrent que ces signaux non-stationnaires présentent des motifs énergétiques qui varient avec les caractéristiques physiques de ces cibles (forme, matières, épaisseur...). Globalement, la THT a permis d'identifier et de séparer ces motifs énergétiques. Ces résultats montrent l'apport de la THT comme RTF pour la compréhension des mécanismes de formation des échos de cibles Sonar. Plus exactement, l'analyse par THT a permis de mettre en évidence les phénomènes physiques tels que les ondes de Lamb ou la réflexion spéculaire. Les résultats obtenus confirment ceux obtenus par d'autres RTF et notamment la PDWVL mais sans aucun pré-traitement des RI ou post-traitement de la représentation de la THT. Une suite naturelle de ce travail serait de tester la THT sur une plus grande classe de RI synthétiques et réelles pour confirmer les résultats obtenus. D'autre part, la meilleure compréhension TF des phénomènes physiques de la diffusion acoustique d'un objet Sonar permet d'envisager la mise en oeuvre d'approches de reconnaissance de formes pour la classification des échos Sonar à l'aide de la THT. Une principale perspective concerne la robustesse de la THT vis à vis des perturbations telles la réverbération ou l'effet Doppler. Plus exactement il faudrait étudier la robustesse du TKEO, qui est un opérateur différentiel, en environnement très bruité.

1. Ce modèle correspond à la solution exacte du problème de la diffusion par une cible élastique. Le champ de pression rétrodiffusé de la cible est décomposé sous la forme d'une série modale dont les coefficients sont calculés en résolvant un système linéaire d'équations issues de l'application des conditions aux limites. L'expression obtenue est analysée par la transformation de Sommerfeld Watson. Il est ainsi possible d'identifier les contributions de chaque onde de surface au champ rétrodiffusé et d'analyser individuellement leurs caractéristiques (comme la dispersion de célérité). L'application de la transformation de Sommerfeld Watson permet de ramener l'expression du champ de pression rétrodiffusion par une coque élastique, insonifiée par une onde plane, à une somme de contributions « ondes géométriques » et « différentes ondes de surface ».

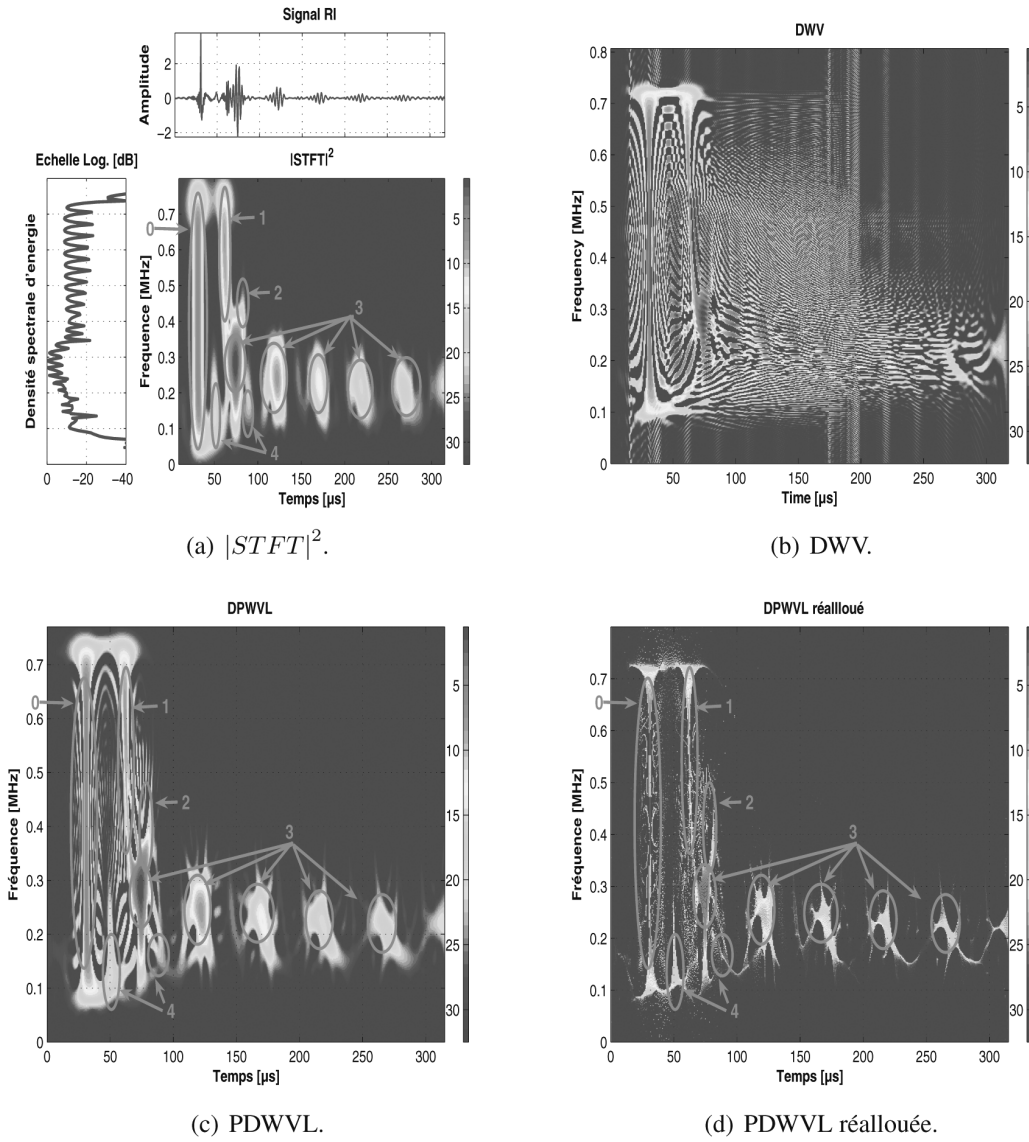


Figure 2. $|STFT|^2$ (fenêtre de Hamming de taille $N/4$ avec N taille du signal), DWV, PDWVL, PDWVL réallouée de la RI d'une cible sphérique creuse en NiMol ($b/a = 0.94$).

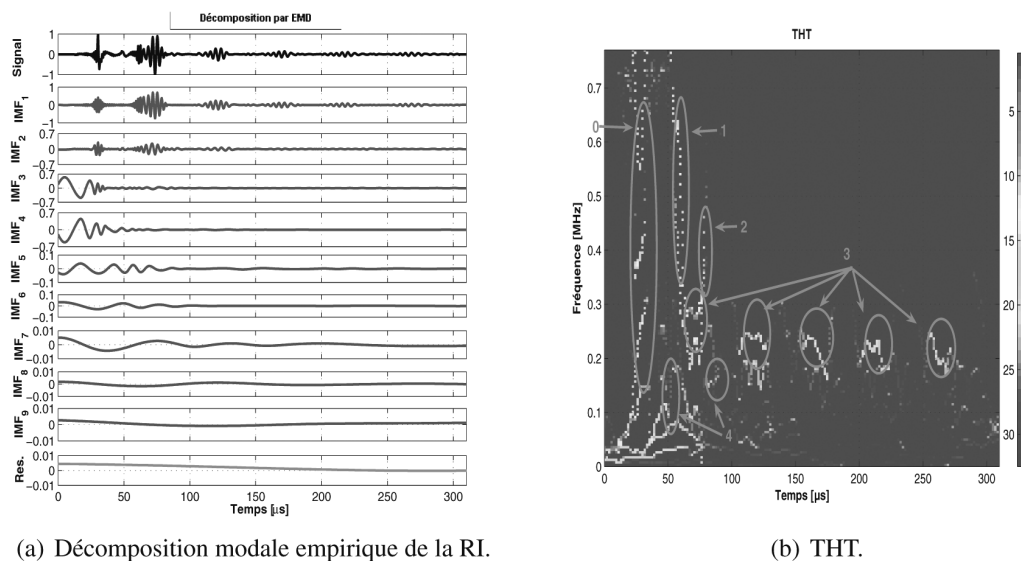


Figure 3. EMD et THT de la RI d'une cible sphérique creuse en NiMol ($b/a = 0.94$).

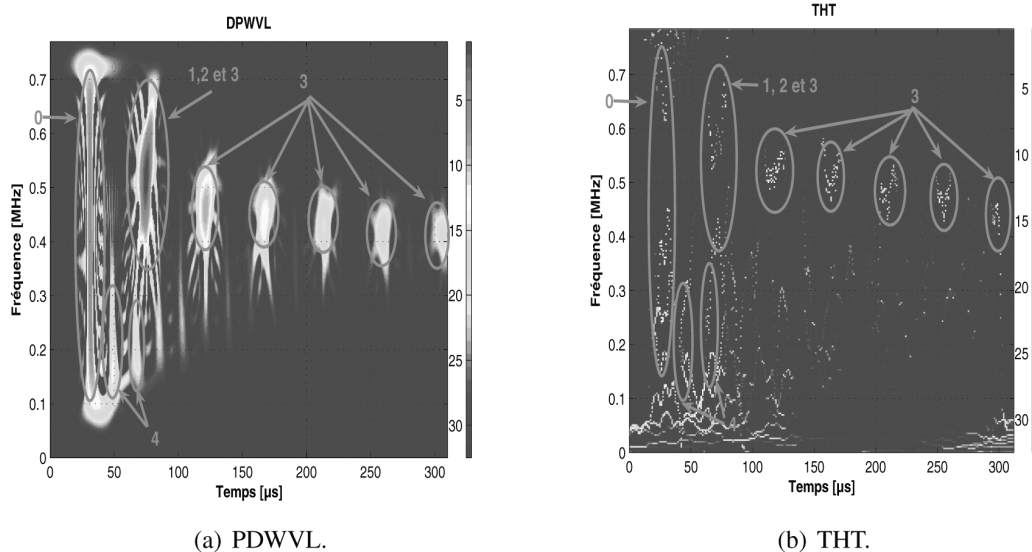


Figure 4. PDWVL et THT de la RI d'une sphère creuse en NiMol ($b/a = 0.96$).

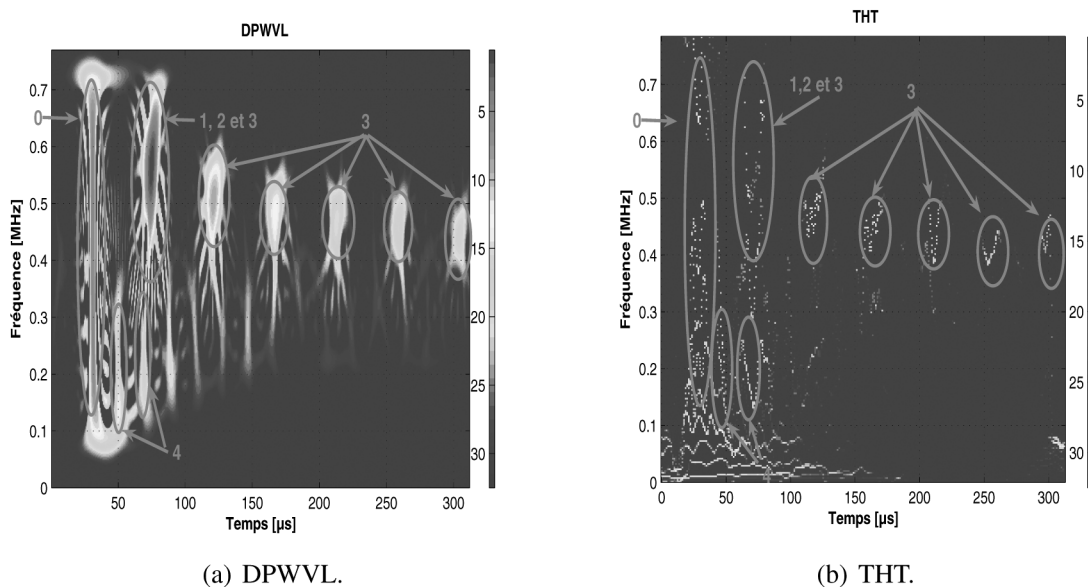


Figure 5. PDWVL et THT de la RI d'une sphère creuse en Ni ($b/a = 0.96$).

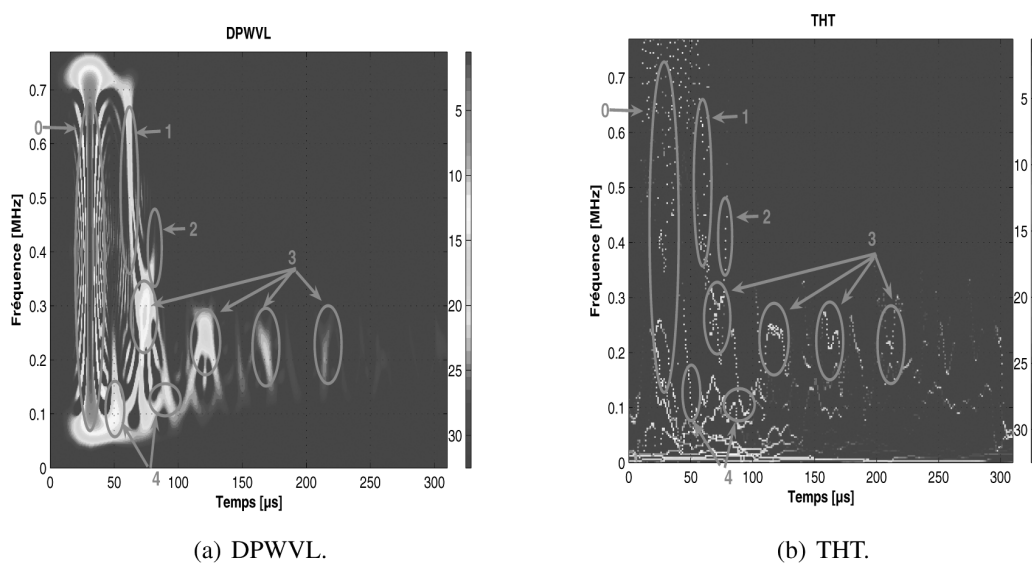


Figure 6. PDWVL et THT de la RI d'un cylindre creux en NiMol ($b/a = 0.94$).

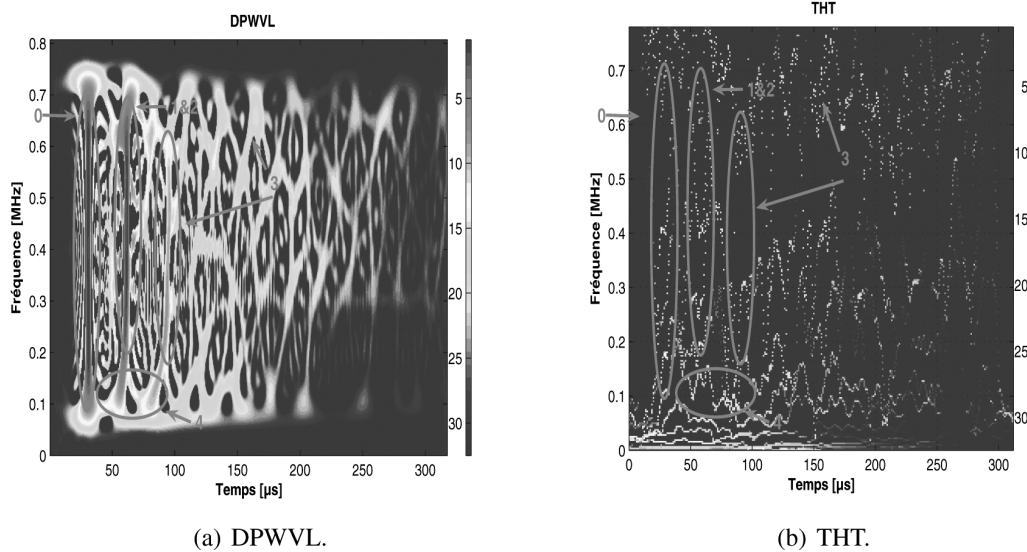


Figure 7. DPWVL et THT de la RI d'une sphère pleine en NiMol.

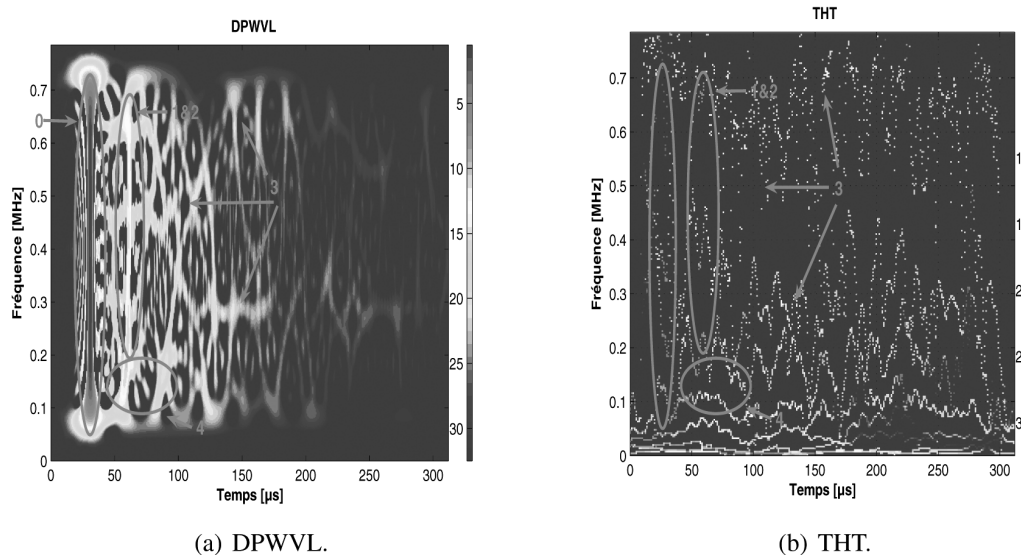


Figure 8. DPWVL et THT de la RI d'un cylindre plein en NiMol.

Références

- [1] R. R. GOODMAN and R. STERN. Reflection and transmission of sound by elastic spherical shells. *J. Acoust. Soc. Am.*, 34(3) :338-344, 1962.
- [2] A. FREEDMAN. A mechanism of acoustic echo formation. *Acustica*, 12 :11-21, 1962.
- [3] R. A. ALTES. Sonar for generalized target description and its similarity to animal echolocation systems. *J. Acoust. Soc. Am.*, 59(1) :97-105, 1976.
- [4] F. MAGAND. Reconnaissance de cible par sonar actif large bande. Application à des coques de forme simple et à la classification des espèces de poissons en mer. Thèse de Doctorat, Université de Lyon, 1996.
- [5] J. F. HOOFFMAN. Classification of spherical targets using likelihood and quadrature components. *J. Acoust. Soc. Am.*, 49 :23-30, 1971.
- [6] P. FLANDRIN, J. SAGELOLI, J. P. SESSAREGO, and M. E. ZAKHARIA. Application de l'analyse temps-fréquence à la caractérisation de cibles. In *Proc. GRETSI*, pages 329-332, 1987.
- [7] P. CHEVRET, N. GACHE, and V. ZIMPFER. Time-frequency filters for target classification. *J. Acoust. Soc. Am.*, 106(4) :1829-1837, 1999.
- [8] A. TRUCCO. Detection of objects buried in the seafloor by a pattern recognition approach. *IEEE Oceanic Engineering*, 26(4) :769-782, 2001.
- [9] E. GRALL-MAES and P. BEAUSEROY. Mutual information-based feature extraction on the time-frequency plane. *IEEE Trans. Sig. Process.*, 50(4) :779-790, 2002.
- [10] J. C. CEXUS and A. O. BOUDRAA. Teager-Huang analysis applied to sonar target recognition. *International Journal of signal Processing*, 1(1) :23-27, 2004.
- [11] P. FLANDRIN, J. SAGELOLI, J. P. SESSAREGO, and M. E. ZAKHARIA. Application of time-frequency analysis to the characterization of surface waves on elastic targets. *Acoust. Lett.*, 10(2) :13-28, 1986.
- [12] G. C. GAUNAURD and H. C. STRIFORS. Signal analysis by means of timefrequency (Wigner-type) distributions. applications to sonar and radar echoes. *Proc. IEEE*, 84(9) :1231-1248, 1996.
- [13] G. MAZE and J. RIPOCHE. Méthode d'isolement et d'identification des résonances (MIIR) de cylindres et de tubes soumis à une onde acoustique plane dans l'eau. *Rev. Phys. Appl.*, 18 :319, 1983.

- [14] B. BOASHASH. *Time-Frequency Signal Analysis and Processing : A Comprehensive Reference*. Elsevier Ltd., Oxford, UK, 2003.
- [15] B. BOASHASH. Estimating and interpreting the instantaneous frequency of signal. *Proc. IEEE*, 80(4) :520-568, 1992.
- [16] P. FLANDRIN. *Temps-fréquence*. Editions Hermès, 1993.
- [17] F. HLAWATSCH and F. AUGER. *Temps-Fréquence : Concepts et Outils*. Hermes, Lavoisier, 2005.
- [18] E. CHASSANDE-MOTTIN. Méthodes de réallocation dans le plan temps-fréquence pour l'analyse et le traitement de signaux non-stationnaires. Thèse de Doctorat, Université de Cergy-Pontoise, 1998.
- [19] N. E. HUANG, Z. SHEN, S. R. LONG, M. C. WU, H. H. SHIN, Q. ZHENG, N. C. YEN, C. C. TUNG, and H. H. LIU. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis. *Proc. Royal Soc. London A*, 454 :903-995, 1998.
- [20] I. MAGRIN-CHAGNOLLAU and R. G. BARANIUK. Empirical mode decomposition based frequency attributes. In *Proc. of the 69th SEG Meeting*, 1999.
- [21] L. DAUDET. Sparse and structured decompositions of signals with the molecular matching pursuit. *IEEE Trans. Audio, Speech, and Language Process.*, 14(5) :1808-1826, 2006.
- [22] S. MALLAT and Z. ZHANG. Matching pursuits with time-frequency dictionaries. *IEEE Trans. Signal Process.*, 41(12) :3397-3415, 1993.
- [23] J. C. CEXUS. Analyse des signaux non-stationnaires par Transformation de Huang, Opérateur de Teager-Kaiser, et Transformation de Huang-Teager (THT). Thèse de Doctorat, Université de Rennes 1, 2005.
- [24] P. MARAGOS, J. F. KAISER, and T. F. QUATIERI. On separating amplitude from frequency modulations using energy operators. In *Proc. ICASSP*, volume 2, pages 1-4, 1992.
- [25] P. MARAGOS, J. F. KAISER, and T. F. QUATIERI. On amplitude and frequency demodulation using energy operators. *IEEE Trans. Sig. Process.*, 41 :1532-1550, 1993.
- [26] A. POTAMIANOS and P. MARAGOS. A comparison of the energy operator and Hilbert transform approach to signal and speech demodulation. *Signal Process.*, 37 :95-120, 1994.
- [27] J. C. CEXUS and A. O. BOUDRAA. Nonstationary signals analysis by Teager-Huang Transform (THT). In *Proc. EUSIPCO*, 2006.
- [28] J. J. FARAN. Sound scattering by solid cylinders and spheres. *J. Acoust. Soc. Am.*, 23(4) :405-418, 1951.
- [29] R. H. HACKMAN and G. S. SAMMELMANN. Multiple-scattering analysis for a target in an oceanic waveguide. *J. Acoust. Soc. Am.*, 84(5) :1813-1825, 1988.
- [30] D. BRILL and G. C. GAUNAURD. Resonance theory of elastic waves ultrasonically scattered from an elastic sphere. *J. Acoust. Soc. Am.*, 81(1) :1-21, 1987.
- [31] A. O. BOUDRAA, J. C. CEXUS, F. SALZENSTEIN, and L. GUILLON. IF estimation using empirical mode decomposition and nonlinear Teager energy operator. In *Proc. ISCCSP*, pages 45-48, 2004.
- [32] J. C. CEXUS and A. O. BOUDRAA. Link between cross-Wigner distribution and cross-Teager energy operator. *IEE Electronics Letters*, 40(12) :778-780, 2004.
- [33] P. FLANDRIN, G. RILLING, and P. GONCALVES. Empirical mode decomposition as a filter bank. *IEEE Sig. Process. Letters*, 11(2) :112-114, 2004.
- [34] J. F. KAISER. On simple algorithm to calculate the 'energy' of signal. In *Proc. ICASSP*, pages 381-384, 1990.
- [35] P. MARAGOS, J. F. KAISER, and T. F. QUATIERI. Energy separation in signal modulations with application to speech analysis. *IEEE Trans. Sig. Process.*, 41(10) :3024-3051, 1993.
- [36] D. VAKMAN. On the analytic signal, the Teager-Kaiser energy algorithm, and other methods for defining amplitude and frequency. *IEEE Trans. Sig. Process.*, 44(4) :791-797, 1996.
- [37] P. CHEVRET, F. MAGAND, and L. BESACIER. Time-frequency analysis of circumferential wave energy distribution for spherical shells. Application to sonar target recognition. *Appl. Sig. Process.*, 3 :136-142, 1996.
- [38] L. R. DRAGONETTE, D. M. DRUMHELLER, C. F. GAUMOND, D. H. HUGHES, B. T. O'CONNOR, N. C. YEN, and T. J. YODER. The application of twodimensional signal transformation to the analysis and synthesis of structural excitations observed in acoustical scattering. *Proc. IEEE*, 84(9) :1249-1263, 1996.





Jean-Christophe **Cexus**

Jean-Christophe Cexus, est ingénieur (2001), titulaire d'un DEA en Automatique et Informatique Industrielle (2001) et d'un Doctorat en Traitement du Signal de l'Université de Rennes I (2005). Depuis juin 2007, il est ingénieur DGA chargé de recherche au laboratoire E3I2 (EA 3876) de l'École Nationale Supérieure des Ingénieurs des Etudes des Techniques d'Armement (ENSIETA) à Brest. Ses principaux centres d'intérêts sont le traitement et l'analyse des signaux non-stationnaires avec des applications à la détection, la localisation et l'identification des objets présents dans une scène. Il s'intéresse particulièrement aux applications liées à l'acoustique sous-marine et au Radar.



Abdel-Ouahab **Boudraa**

Abdel-Ouahab Boudraa est Docteur en traitement d'images (Imagerie Médicale) de l'Université Claude Bernard (Lyon). Il est titulaire de deux certificats d'études supérieures en Statistique et Modélisation, et en Tomographie par Émission de Positons et d'un Diplôme Universitaire d'Imagerie par Résonance Magnétique de l'Université Claude Bernard (Lyon). Il a été pendant deux ans Attaché Temporaire d'Enseignement et de Recherche (ATER) à l'Université Paris XIII (Institut Galilée) où il a enseigné en formation d'ingénieurs Télécom. Il est actuellement Maître de Conférences des Universités (Section 61) à l'ENSAM (mis en délégation à l'École Navale, Brest). Ses thèmes de recherche concernent l'analyse temps-fréquence, les opérateurs d'énergie d'ordres supérieurs, les modèles AM-FM, l'analyse de clusters, la logique floue et la fusion de données. Il est « Senior member » de la société IEEE et lauréat du Prix Varian en 2003.



Abdelkalek **Bouchikhi**

Abdelkalek Bouchikhi est né à Frenda, Algérie en 1979. Il est ingénieur Télécom de l'Institut de Télécommunications d'Oran (Algérie) et titulaire d'un DEA en acoustique de l'Université de Marseille 2 et d'un Master en traitement du signal et image de l'Université de Rennes 1. Il prépare actuellement sa thèse de Doctorat sur la détection et classification d'échos de cibles Sonar par THT, à l'École Navale (Brest) sous la direction de Ali Khenchaf et Abdel-Ouahab Boudraa. En parallèle de ses travaux de recherche, il est assistant d'enseignement en électronique, automatique, traitement du signal et MatLab en formation d'Ingénieurs Officiers de l'École Navale.



Ali **Khenchaf**

Ali Khenchaf est titulaire d'un DEA en traitement de l'information de l'Université Rennes 1 et d'une thèse de Doctorat en 1992 de l'Université de Nantes. Dr. Khenchaf a été Maître de Conférences à l'École Polytechnique de l'Université de Nantes et chercheur d'abord au laboratoire SEI et ensuite au laboratoire IRCCyN (UMR CNRS 6597). En 2000, il a soutenu une Habilitation à Diriger les Recherches intitulée « Modélisation Electromagnétique, Radar Bistatique et Traitement de l'Information ». Il est actuellement Professeur des Universités à l'École Nationale Supérieure des Ingénieurs des Etudes des Techniques d'Armement (ENSIETA) et Directeur du laboratoire E3I2 (EA3876). Ses domaines de recherche concernent la propagation et la diffusion des ondes électromagnétiques en environnements naturels, la télédétection et les liaisons radar bistatique et l'estimation des paramètres de cibles Radar.



