

## CLASSIFICATION EN SONAR ACTIF: TECHNIQUES ET APPLICATIONS

Paul DEGOUL, Alain LEMER, Dominique LEGITIMUS, Laurent SCHWAB

THOMSON SINTRA ASM  
1, avenue Aristide Briand, 94117 ARCUEIL Cedex, FRANCE

**Résumé :** En sonar passif, les progrès importants obtenus ou prévus dans le domaine de la discrétion acoustique des bâtiments de guerre modernes, rendent la détection, la localisation et la classification de ces bâtiments de plus en plus délicates, et conduisent de ce fait à un regain d'intérêt des techniques de sonar actif. En sonar actif, alors que les fonctions de détection et de localisation de cibles sont dans l'ensemble bien maîtrisées, la fonction classification reste un sujet actif de recherche. On présente de manière unifiée les différentes approches pouvant être utilisées en classification active, ainsi que les techniques spécifiques qui leurs sont associées. On expose également les applications, réalisées ou à l'étude, de ces techniques de classification à la lutte anti sous-marine, et en particulier le filtrage de fausses alarmes en détection.

**Abstract :** In the field of passive sonar, recent improvements obtained or expected in reduction of modern ship radiated noise, make more and more difficult the detection, localisation, and classification functions, and induce a new interest in active sonar technics. In active sonar, detection and localisation functions are now globally well-known, however classification function is still a research subject. In this paper, we present the various approaches which can be used to define an active sonar classification system, and the specific tools such as advanced signal processing methods and neural networks. We present also applications of classification technics to antisubmarine warfare, particularly the false alarm filtering in detection.

### INTRODUCTION:

En acoustique sous-marine, les bruits rayonnés par un bâtiment composent sa signature acoustique, signature qui est usuellement exploitée en sonar passif à des fins de détection, localisation, et classification. Cependant, les progrès importants obtenus ou prévus dans le domaine de la discrétion acoustique des bâtiments de guerre modernes, rendent cette approche de plus en plus délicate, et conduisent de ce fait à un regain d'intérêt des techniques de sonar actif.

En sonar actif, alors que les fonctions de détection et de localisation de cibles sont dans l'ensemble bien maîtrisées, la fonction classification reste un sujet actif de recherche.

L'objet de cette communication est tout d'abord de présenter de manière unifiée les différentes approches pouvant être utilisées en classification active, ainsi que les techniques qui leurs sont associées. On expose également les applications, réalisées ou à l'étude, de ces techniques de classification à la lutte anti sous-marine.

### DEMARCHE GENERALE:

L'objet de la classification en sonar actif consiste à retrouver, dans l'écho rétrodiffusé, la signature acous-

tique de la cible, puis à exploiter cette signature dans un but d'identification de la cible (on ne traitera pas dans cette communication des techniques d'imagerie acoustique utilisées en haute fréquence, et on se limitera à la classification réalisée sur un écho simple).

De manière générale, la démarche adoptée pour assurer la classification active peut être décomposée en deux phases successives (cf. figure 1). La première consiste à réaliser une transformation de l'écho numérisé, en un nombre restreint de paramètres ou descripteurs présumés classifiants. Cette phase est appelée phase d'extraction d'information, et est réalisée au moyen de méthodes avancées de traitement du signal. Au cours de la deuxième phase, appelée phase de classification, les paramètres précédents sont traités par une méthode de classification, statistique ou neuronale, qui détermine la classe d'appartenance de l'écho.

### EXTRACTION D'INFORMATION:

Le signal émis est rétrodiffusé par la cible, donnant naissance à l'écho reçu. Cet écho porte la signature acoustique de la cible. La phase d'extraction d'information a alors un double objectif. D'une part, cette phase doit permettre d'extraire de l'écho brut des informations ou paramètres caractéristiques de la nature de la cible, et autorisant une classification ultérieure. D'autre part, elle doit permettre



de réduire le nombre de données, l'écho brut étant remplacé par un jeu de paramètres en nombre réduit (compression d'information). Ainsi, fournir un nombre restreint de paramètres classifiants est la condition duale à réaliser dans la phase d'extraction d'information, afin d'espérer obtenir, dans une deuxième phase, des résultats de classification pertinents.

La phase d'extraction d'information peut être guidée par différentes motivations. L'approche par modélisation physique consiste à choisir un modèle reproduisant les mécanismes de diffusion du signal d'émission par la cible, et à définir des traitements associés à ces modèles et permettant d'obtenir des caractéristiques (géométriques ou élastiques) de la cible.

Le modèle des points brillants est un modèle basique, décomposant la cible en une série de réflecteurs élémentaires appelés points brillants. La réponse impulsionnelle associée à ce modèle s'exprime alors sous la forme suivante:

$$(1) \quad h(t) = \sum_{k=1}^N \alpha_k \delta(t - \tau_k),$$

avec:  $N$ , nombre de points brillants de la cible;  
 $\tau_k$ , retard introduit par le point brillant  $k$ ;  
 $\alpha_k$  coefficient de rétrodiffusion du point brillant  $k$ .  
 Si  $e(t)$  est le signal émis, l'écho rétrodiffusé  $s(t)$  peut alors s'écrire sous la forme:

$$(2) \quad s(t) = h(t) * e(t) = \sum_{k=1}^N \alpha_k e(t - \tau_k).$$

Afin de retrouver les paramètres du modèle ( $\alpha_k$  et  $\tau_k$ ), on utilise principalement le filtrage adapté. Le filtrage adapté, consistant en une corrélation entre l'écho reçu et une copie de l'émission, produit un signal qui possède des pics d'amplitude proportionnelle à  $\alpha_k$  aux instants  $\tau_k$ . Le filtrage adapté est utilisé systématiquement en détection, et peut être réalisé quelque soit la forme du signal d'émission. Cependant, les performances du filtrage adapté, en termes de différenciation de points brillants, sont liées à la nature du signal émis. En effet, après filtrage adapté, la résolution temporelle est déterminée par la durée de corrélation du signal émis (largeur du pic d'autocorrélation), cette durée étant inversement proportionnelle à la largeur de bande. Il est donc nécessaire de travailler avec des signaux à large bande [1]. Pour dépasser cette limite, on peut utiliser les méthodes appelées haute résolution (HR), issues de l'analyse spectrale (modélisation AR, modélisation de Prony ...), ou du traitement d'antenne (goniomètre, TAM ...), et qui reposent sur une décomposition du gain complexe de la cible  $H(f)$  en  $N$  sinusoïdes ( $h(t) \rightleftharpoons H(f)$ ).

Pour décrire plus fidèlement la réponse impulsionnelle d'une cible, on peut citer une extension intéressante du modèle des points brillants, connue sous le nom de filtre transversal généralisé (modèle de points brillants colorés)[2,

3]. Ce modèle prend en compte certains phénomènes physiques mis en jeu lors de la formation d'un écho, tels les ondes de surface. Sa réponse impulsionnelle s'écrit sous la forme suivante:

$$(3) \quad h(t) = \sum_{m=1}^{+\infty} \sum_{n=-\infty}^{+\infty} h_{nm} \delta^{(n)}(t - \tau_m)$$

avec:

$\delta^{(n)}$  la  $n$ -ième dérivée ou intégrale de la distribution de Dirac,  
 $\tau_m$  et  $h_{nm}$  sont des paramètres caractéristiques de la cible.  
 Si  $e(t)$  est le signal émis, l'écho rétrodiffusé  $s(t)$  peut se mettre sous la forme:

$$(4) \quad s(t) = h(t) * e(t) = \sum_{m=1}^{+\infty} \sum_{n=-\infty}^{+\infty} h_{nm} e^{(n)}(t - \tau_m).$$

Le récepteur associé à un tel modèle est un banc de filtres adaptés aux versions intégrées ou dérivées  $e^{(n)}(t)$  du signal émis  $e(t)$ . Ces termes de dérivation et d'intégration rendent cependant délicate la mise en œuvre du récepteur. Afin de réduire la complexité du récepteur, on est alors amené à définir la nature du signal d'émission  $e(t)$ . On peut ainsi utiliser le signal introduit par Altes [2]. Le récepteur prend alors la forme d'un banc de filtres à surtension constante. Enfin, il est intéressant de noter les liens qui existent entre un tel système et l'analyse en ondelettes [4].

De part la complexité des mécanismes de diffusion par une cible du signal émis, la mise en évidence dans l'écho reçu de phénomènes liés à la nature élastique de la cible, est un problème délicat. Jusqu'à présent il a été principalement abordé sous des configurations simplifiées:

- réponses modélisées ou expérimentales de cibles de forme géométrique simple: sphères ou cylindres,
- codes d'émission basiques: impulsions, ou trains d'onde à fréquence pure.

En régime impulsionnel, on recherche les temps d'arrivée des différents types d'ondes (écho spéculaire, échos dus aux points brillants, échos provenant de réflexions à l'intérieur de la cible, ondes circonférencielles ...). La complexité de ces ondes rend cependant délicate leur discrimination (problème de superposition des ondes). L'utilisation de méthodes temps-fréquence, telle la transformation de Wigner-Ville, permet de visualiser l'écho de manière plus fine, en particulier en faisant apparaître les résonances (fréquences entretenues après excitation), et la dispersion de certaines ondes de surface (célérité variant avec la fréquence)[5, 6, 7]. L'excitation de la cible par un régime harmonique continu, puis l'observation de la rétrodiffusion en régime harmonique établi permet d'obtenir l'allure de la fonction de forme à une fréquence donnée. De plus, l'observation du régime transitoire en fin de régime harmonique établi permet de décrire le "fond résonant" de cette fonction de forme (méthode MIR [8]). Ces différents phénomènes élastiques apparaissent sur les configurations simplifiées précédentes (cibles de forme élémentaire, codes

simples), mais leur mise en évidence et leur caractérisation efficace sur des échos réalistes (formes de cible et codes d'émission complexes, insonifications obliques, faible rapport signal sur bruit, distorsion due à la propagation ...) sont encore du domaine de la recherche.

Une autre orientation pouvant guider l'extraction d'information, est d'utiliser l'information de nature audiophonique de l'écho. En effet, des signaux diffusés par des cibles de nature différente peuvent être audiophoniquement dissemblables. Sur certains sonars travaillant avec des codes large bande, ce phénomène est utilisé par les opérateurs audio afin de discriminer des échos de submersibles et des échos dus à la réverbération de fond. On peut alors s'appuyer sur l'expertise audiophonique humaine afin d'extraire cette signature audiophonique par des méthodes de traitement du signal correctement choisies (telles l'analyse autorégressive adaptative, l'analyse à  $Q$  constant, l'analyse en ondelettes ...).

Enfin, la dernière démarche, que nous qualifierons "d'aveugle", consiste à utiliser des méthodes qui ne sont sous-tendues par aucune modélisation de la cible ou modélisation de type audiophonique. On cherche alors à réaliser la phase d'extraction, et de compression de l'information au travers de méthodes de traitement du signal a priori efficaces et robustes, et souvent utilisées en reconnaissance de la parole. Les plus utilisées sont des méthodes travaillant sur le spectre du signal, ainsi que la modélisation autorégressive.

Il est à noter que cette décomposition en différentes approches a un aspect arbitraire dans le sens où il n'y a pas de frontières claires entre elles. Cette décomposition a pour objet de présenter les différentes motivations pouvant guider la phase d'extraction d'information, et ne saurait ignorer les fortes interactions qui existent entre elles, interactions que l'on est pas toujours à même de mettre en évidence.

## CLASSIFICATION:

Après avoir extrait un jeu de paramètres pertinents de l'écho brut, il s'agit de réaliser la classification. Cette classification peut être effectuée de manière humaine par un opérateur, ou de manière automatique par des méthodes supervisées de discrimination statistiques, ou connexionnistes encore appelées réseaux de neurones.

L'apprentissage par l'exemple est la principale caractéristique des méthodes supervisées. En effet, ces méthodes sont capables d'apprendre à réaliser une fonction, telle la classification, grâce aux exemples qui leurs sont présentés. L'utilisation de telles méthodes supposent qu'un grand nombre d'échos de chaque classe soit disponible. La démarche usuelle en classification supervisée est de partitionner la base complète d'échos en deux sous-bases: la base d'apprentissage et la base de généralisation (ou de test), et de réaliser successivement les deux phases associées à ces bases: la phase d'apprentissage et la phase de

généralisation. Au cours de la phase d'apprentissage, des échos des différentes classes sont présentés à la méthode de classification. On ajuste alors la fonction de classification de la méthode au moyen d'un algorithme, de façon à lui apprendre à reconnaître chacune des classes d'échos définies. Une fois l'apprentissage réalisé, les capacités de classification de la méthode sont alors testées sur les échos de la base de généralisation. Les performances sont présentées sous forme de matrices de confusion, dont l'élément  $M_{ij}$  représente le pourcentage d'échos de la classe  $i$  attribués à la classe  $j$ . De manière à minimiser les effets de partitionnement arbitraire entre sous-ensembles d'apprentissage et de généralisation, plusieurs expériences sont menées au moyen de partitionnements aléatoires, et une représentation des performances globales (et de leur robustesse) est alors fournie par la moyenne et la variance des matrices de confusion.

Il existe de nombreuses méthodes de classification supervisées tant des méthodes statistiques classiques (analyse en composantes principales, analyse discriminante, nuées dynamiques,  $k$  plus proches voisins ...), que des réseaux de neurones (perceptron multicouches, réseau HOPI, réseaux de second ordre, réseau de Cooper ...). Sur une application donnée de classification, il est nécessaire de pouvoir comparer ces différentes méthodes de manière à sélectionner celle qui s'avère la plus adaptée en termes de performances ou encore de coût de calcul.

## APPLICATIONS:

Bien que les méthodes de classification active restent encore principalement du domaine de la recherche, leurs perspectives d'application en acoustique sous-marine apparaissent d'une importance cruciale pour les prochaines années.

En effet, outre l'identification précise de cibles qui reste un objectif à long terme, ces méthodes se révèlent dès aujourd'hui applicables pour certains problèmes, tel le filtrage des fausses alarmes en détection. La réverbération de fond ou de surface provoque en sonar actif de faux échos entraînant des fausses alarmes en détection. Dans les systèmes sonars actifs classiques l'ambiguïté peut être levée par le suivi et l'analyse du comportement de l'objet détecté. Mais cette solution n'est pas toujours envisageable. En particulier, pour des sonars travaillant en basse fréquence, le faible taux de récurrence des émissions sonar rend cette approche délicate. De plus, si la cible est immobile, un tel levé d'ambiguïté n'est plus possible. Une solution, baptisée détection non-ambiguë, consiste à réaliser, après détection classique, une discrimination de l'écho détecté en deux classes: écho de submersible ou faux écho (i.e. écho dû à la réverbération), de manière à valider ou invalider la détection première. Ce concept doit permettre de réduire efficacement le taux de fausse alarme d'une détection réalisée avec un seuil bas conditionnant une bonne probabilité de détection.

Ce concept est actuellement à l'étude sur plusieurs types



de sonars embarqués. En particulier, des recherches ont été entreprises depuis plusieurs années sur la détection non-ambiguë par sonar actif trempé d'hélicoptère travaillant en moyenne et haute fréquence. Le problème opérationnel est de détecter un sous-marin posé par petits fonds au milieu de rochers. Les opérateurs audio de tels sonars savent, par expérience, discriminer un écho rétrodiffusé par un sous-marin, d'un écho dû au fond (signal émis de type FML). S'appuyant sur cette expérience, des études ont été menées permettant de spécifier un système de classification dont l'extraction d'information est réalisée par des techniques d'analyse de signaux non-stationnaires, et la classification assurée par un réseau de neurones de type perceptron multicouches. Sur une base totale de 160 échos de sous-marin et 219 échos de fond, les résultats obtenus en reconnaissance (sur des signaux n'ayant pas participé à l'apprentissage) sont de  $91.1 \pm 0.6\%$  (écart type significatif des variations de résultats pour 100 tirages aléatoires des bases d'apprentissage et de généralisation). Suite à ces résultats prometteurs, un prototype embarquable permettant d'effectuer la discrimination entre échos de fond et écho de sous-marin à doppler nul, a été réalisé. Ce système, implanté sur un micro-ordinateur de type IBM PC muni d'une carte de traitement du signal à base de TMS320C30, est directement connecté au sonar et travaille en temps réel. Cette maquette a été testée avec succès au cours d'essais en mer réalisés en mars 1992 et mai 1993.

La détection non-ambiguë est également à l'étude sur d'autres types de sonar actif, en particulier sur des sonars remorqués travaillant à très basse fréquence. A de telles fréquences, la portée du sonar est importante, et par conséquent le taux de fausse alarme, provoqué par la complexité des phénomènes de propagation, est lui-même élevé, justifiant l'intérêt d'un filtrage des fausses alarmes par détection non-ambiguë.

## CONCLUSION:

La classification en sonar actif a pour objet d'identifier de manière automatique l'objet détecté. La démarche générale adoptée se décompose en deux étapes successives: la phase d'extraction d'information qui doit donner accès à un jeu de paramètres supposés classifiants, et la phase de classification de l'objet détecté à partir du jeu de paramètres précédents. L'extraction d'information est le point central du système de classification, et conditionne les performances en classification. Suivant la fréquence de travail du sonar et le code d'émission, plusieurs motivations peuvent guider cette phase: l'approche par modélisation physique, l'approche audiophonique, et l'approche "aveugle". De premières applications ont été réalisées portant en particulier sur le filtrage des fausses alarmes en détection par une classification post-détection écho de submersible / écho parasite.

L'identification précise de cibles nécessite encore des efforts de recherche, devant être en particulier axés sur les

techniques d'extraction de paramètres de classification pertinents et robustes. Cette recherche passera par une analyse détaillée du phénomène de diffusion de la cible, ainsi que par celle des déformations de l'écho dues à la propagation, mais aussi par la recherche de codes d'émission adaptés à la classification.

**Remerciements:** Ces travaux ont été réalisés en partie dans le cadre des études DRET 9134356 (Direction des Recherches, Etudes et Techniques, DGA), et CERDSM 9150038 (Centre d'Etudes et de Recherches en Détection Sous-Marine, DGA DCN).

## Références

- [1] F. de Coulon. *Théorie et traitement des signaux*. Dunod, 1984.
- [2] R.A. Altes. Sonar for generalized target description and its similarity to animal echolocation systems. *J. Acoust. Soc. Am.*, 59(1):97-105, 1976.
- [3] M. Zakharia et J.P. Sessarego. Target classification using a coherent echo processing. Dans *IEEE IC-ASSP Paris*, pages 331-334, 1982.
- [4] F. Magand, P. Flandrin, et M. Zakharia. Modélisation de cibles sonar, filtrage à Q-constant et transformation en ondelettes. Dans *GRETSI*, pages 387-390, 1989.
- [5] P. Flandrin, J. Sageloli, J.P. Sessarego, et M. Zakharia. Application de l'analyse temps-fréquence à la caractérisation de cibles. Dans *GRETSI*, pages 329-332, 1987.
- [6] M. Zakharia, P. Flandrin, J. Sageloli, et J.P. Sessarego. Analyse temps-fréquence appliquée à la caractérisation de cibles. *Journal d'Acoustique*, 185-188, 1988.
- [7] N.C. Yen, L.R. Dragonnette, et S.K. Numrich. Time-frequency analysis of acoustic scattering from elastic objects. *J. Acoust. Soc. Am.*, 87(6):2359-2370, 1990.
- [8] G. Maze, J.L. Izbicki, et J. Ripoché. Méthode d'isolement des résonances (M.I.R.): spectroscopie des résonances. Dans *GESPA*, pages 311-319, 1987.

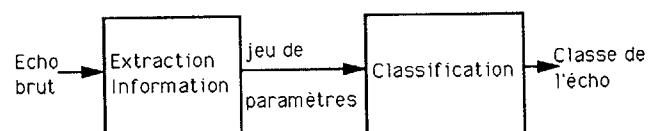


Figure 1: Démarche générale de la classification.