

Intégration des modèles électromagnétiques et hydrodynamiques pour la caractérisation des cibles radar en environnement marin

Integrating electromagnetic and hydrodynamic models for the characterization of radar targets in marine environment

Felix Totir¹, Emanuel Radoi² et Anfré Quinquis²

¹ENSIETA, Laboratoire E312 (EA 3876), ENSIETA, Brest, France.
Agence de Recherche des Techniques et Technologies Militaires, Bucarest, Roumanie

²ENSIETA, Laboratoire E312 (EA 3876), ENSIETA, Brest, France

Manuscrit reçu le 23 juin 2006

Résumé et mots clés

L'article présente une méthodologie de simulation d'échos de cibles radar en environnement marin. La procédure est basée sur un nouveau modèle, appelé « Ensemble de Points Brillants en Représentation Unifiée » (EPB-RU), qui permet d'approcher le signal écho d'une cible radar pour l'ensemble de ses orientations. Ce modèle est rapide à calculer et a l'avantage de prendre en compte le masquage partiel ou total de la cible par les vagues de la mer. Il associe à chaque orientation de la cible un ensemble de points brillants (EPB). Pour chaque point brillant du modèle, une carte d'amplitude prend en compte son anisotropie et sa visibilité en fonction de l'angle de visée. Un modèle virtuel combiné mer-navire est utilisé pour décrire le mouvement de la cible et le masquage introduit par les vagues de la mer. L'influence du fouillis de mer est également prise en compte. Les signatures radar utilisées dans nos simulations correspondent à quatre maquettes de cibles navales mesurées dans la chambre anéchoïde de l'ENSIETA. L'article présente aussi quelques résultats d'imagerie radar et de classification, qui illustrent l'aspect inverse du problème de la caractérisation des cibles navales dans leur environnement.

Modélisation électromagnétique, cibles navales, interaction hydrodynamique.

Abstract and key words

The paper describes a simulation methodology for radar targets in marine environment. Our approach is based on a new model, called "Scattering Center Set Unified Representation", which is able to approximate the backscattered radar target echo for any aspect angle. This model is fast to calculate and has the advantage to take into account the partial or total target concealing due to the sea waves. It associates to any target aspect a scattering center set. An amplitude map accounts for each scattering center anisotropy and geometrical visibility. A virtual model is then used for describing the target motion and its concealing by the sea waves. The influence of the sea clutter is also taken into account. The radar signatures used in our simulations have been measured in the anechoic chamber of ENSIETA for four

scale-reduced naval targets. The paper also presents some imagery and classification results, which are aimed to illustrate the other side of the naval target characterization problem.

Electromagnetic models, naval targets, hydrodynamic interaction, sea clutter.

Remerciements

Nous remercions vivement Marc Parenthoen, du Centre Européen de Réalité Virtuelle de Brest (www.cerv.fr), pour nous avoir fourni les modèles virtuels de la surface de la mer et du Zodiac flottant, et à THALES NAVAL France en tant que bénéficiaire des résultats de ce travail (n° de contrat TNF/BRS/EPR/173/03).

1. Introduction

La modélisation des scénarii radar présente un double intérêt applicatif : estimer les performances des systèmes radar pour différentes configurations et valider, dès la phase de développement, les nouveaux algorithmes de traitement du signal radar. Le coût élevé des campagnes de mesure rend très avantageuse l'utilisation des procédures de simulation, à condition qu'elles soient suffisamment réalistes.

La description statistique des échos radar est largement utilisée pour l'évaluation des performances de détection. Cependant, cette description n'est pas suffisamment fine pour prendre en compte certains aspects particuliers de l'environnement marin, telle que la visibilité géométrique des cibles, et s'avère inadaptée à des fins d'imagerie radar (profils de distance, images ISAR, etc.). Il est donc nécessaire de mettre en oeuvre des modèles permettant la description déterministe de l'écho radar en fonction de la structure et de l'orientation de la cible.

Une première solution consiste à utiliser les méthodes numériques de calcul du champ électromagnétique. Néanmoins, leur coût en ressources de calcul les rend inadéquates pour la modélisation en temps réel des réflecteurs radar à géométrie variable, telles que les cibles navales partiellement masquées par les vagues de la mer.

Une autre solution est constituée par l'approximation, notamment en haute résolution, de la structure réfléchissante de la cible radar par un ensemble invariant de points brillants (EIPB) [Wehner, 1994]. Les algorithmes d'imagerie radar sont d'ailleurs généralement illustrés en utilisant ce modèle [Paulraj, 1986] [Odendaal, 1994] [Gupta, 1994]. Sa simplicité et rapidité de calcul sont à souligner, mais ce modèle s'avère très peu réaliste, puisque les points brillants sont considérés isotropes, parfaitement localisés et leur masquage géométrique en fonction de l'orientation est négligé. Par conséquent, sa capacité de modélisation réaliste du comportement électromagnétique des cibles radar est réduite. Nous proposons une méthodologie applicable à la simulation d'échos des cibles navales dans leur environnement. Leur comportement électromagnétique est décrit en utili-

sant la méthode proposée en [Bhalla, 1997]. Pour chaque orientation, la structure réfléchissante de la cible est approchée par un EPB, extrait en utilisant la méthode CLEAN [Tsao, 1988]. Une représentation unifiée (EPB-RU) est ensuite proposée pour intégrer toute l'information dans un modèle flexible, réaliste et rapide à calculer.

La mer agit sur la dynamique et la visibilité des cibles, déterminant leur mouvement libre et leur masquage par les vagues. Dans le cadre de l'approche retenue, ces informations sont retrouvées par la simulation sur ordinateur d'un modèle virtuel d'une petite cible (embarcation) en dérive sur la surface de la mer, au travers de plusieurs capteurs virtuels placés sur sa structure (voir fig. 14). Au signal radar réfléchi par la cible se rajoutent les échos parasites qui constituent le fouillis de mer. Celui-ci est représenté par un modèle stochastique phénoménologique, qui fait appel à la distribution K-compound.

La section 2 est consacré à l'analyse des interactions entre les éléments d'un scénario naval et de leur influence sur le signal écho radar. La présentation de la procédure d'extraction du modèle EPB-RU fait l'objet de la section 3, alors que la mise en oeuvre des modèles hydrodynamiques, comprenant les lois de mouvement et de visibilité des cibles, est présentée à la section 4. L'intégration de ces deux modèles est détaillée dans la section 5. La section 6 illustre la méthodologie proposée au travers d'un exemple d'application à la caractérisation d'un scénario radar naval.

2. Interactions dans le contexte d'un scénario radar simplifié

Considérons le scénario naval représenté sur la figure 1, où un navire est illuminé à faible angle rasant par un radar côtier cohérent, à haute résolution, en bande X (8-12 GHz). C'est un scénario simplifié dans la mesure où les seuls éléments qui interviennent sont le radar, la cible et la surface de la mer.

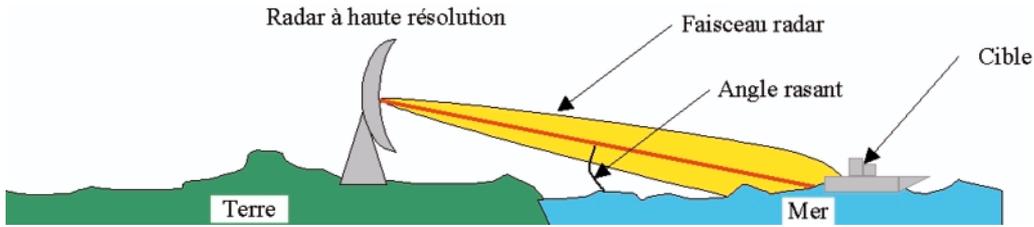


Figure 1. Système radar côtier observant un scénario naval.

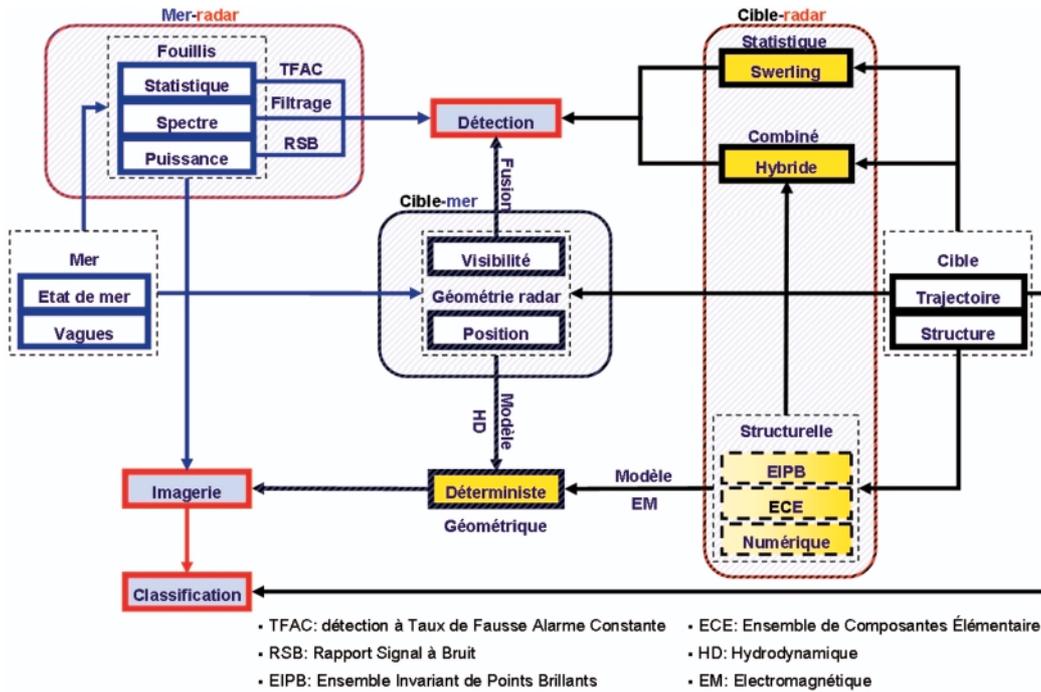


Figure 2. Principaux éléments et leurs interactions dans le cadre d'un scénario radar naval générique.

Le schéma général qui regroupe ces éléments et qui met en évidence leurs interactions est montré sur la figure 2. Les modèles et les procédures de simulation et de traitement radar que nous allons présenter sont intégrés dans ce contexte. La mer et la cible apparaissent de manière explicite sur cette figure, alors que le système radar est représenté par le biais des traitements qu'il peut assurer: détection, imagerie et profils de distance ou classification.

Le résultat principal de l'interaction entre la surface de la mer et le système radar est le fouillis de mer, tandis que le mouvement et le masquage géométrique de la cible engendrés par les vagues peuvent aussi modifier le signal écho.

Les composantes du signal réfléchi, engendrées par les deux types de vagues qui apparaissent à la surface de la mer (les vagues de capillarité et les vagues de gravité) ont des propriétés statistiques et spectrales différentes. Ainsi, la première est distribuée selon la loi de Rayleigh, alors que la deuxième suit la loi Gamma. La modélisation du fouillis de mer utilise alors un modèle statistique composé, basé sur la distribution K-compound, indiquée comme la plus adéquate pour décrire la statistique ponctuelle du fouillis de mer [Radoi, 2003b].

Sa nature combinée rend cette distribution particulièrement intéressante pour la prédiction des performances du système radar, car les techniques de traitement du signal peuvent avoir différents effets sur les deux composantes. Ainsi, par exemple, l'agilité en fréquence décorrèle le speckle, mais pas la composante modulante. Par ailleurs, le speckle ne présente pas de corrélation spatiale, alors que la composante modulante peut être corrélée sur des dizaines, voire des centaines de mètres.

La figure 3 représente l'algorithme que nous avons utilisé pour simuler le fouillis de mer avec toutes ses propriétés d'amplitude et de corrélation [Radoi, 2003a]. Il repose sur la définition de la distribution K-compound et ses propriétés d'amplitude et de corrélation sont introduites au cours de la génération des données. Comparé à d'autres approches du même type [Denny, 2000], l'algorithme développé présente une structure 3D, qui autorise la prise en compte explicite de trois types de corrélation: en temps, en azimut et en distance. L'idée de base est que le signal écho est échantillonné à la même vitesse, donnée par la fréquence de récurrence, tant en azimut qu'en temps.

La corrélation spatiale est introduite par un filtre 2D qui tient compte des valeurs des temps de décorrélation en portée et en

azimut. La corrélation temporelle est réalisée par un filtre dont la réponse impulsionnelle est définie en tenant compte de la valeur du temps de décorrélation de la composante à variation rapide. La carte de fouillis est finalement constituée par le plan diagonal de la structure 3D temps-distance-azimut. Cette lecture diagonale permet de synchroniser les variations temporelle et en azimut des échantillons du fouillis simulés, la fréquence d'échantillonnage étant la même dans les deux cas.

La variation de la puissance des échos en fonction de la distance est réalisée en multipliant la composante modulante par un coefficient lié à la SER du fouillis, dont la valeur peut être déterminée à partir des travaux réalisés par Nathanson, Katzin, Daricau ou Reilly/Dockery ([Katzin, 1957], [Darricau, 1991], [Reilly, 1990]).

L'état de mer n'intervient pas seulement au niveau des propriétés du fouillis mais a aussi une influence directe sur le mouvement et la visibilité géométrique de la cible. Pour un état de mer donné, le degré de visibilité géométrique de la cible est principalement déterminé par ses dimensions (ainsi, on peut parler de masquage partiel pour les cibles de grandes dimensions et de masquage total pour les cibles de dimensions réduites).

Le mouvement de la cible a une composante déterministe (la trajectoire du navire) et une composante aléatoire qui représente l'effet de l'action de la mer. En régime d'imagerie, la deuxième composante (aléatoire) du mouvement de la cible est particulièrement importante, car les gradients Doppler engendrés par la rotation, le roulis et le tangage permettent de séparer les différents points brillants de la cible en distance transversale. Une collaboration avec le Centre Européen de Réalité Virtuelle (CERV) de Brest nous a permis d'avoir accès à une procédure de simulation du mouvement d'un Zodiac sur la surface de la mer, définie par son état et la direction des vagues.

Notons enfin que l'interaction entre la cible et la surface de la mer est un phénomène réciproque. En effet, la cible engendre

une influence sur la surface de la mer qui conduit à des phénomènes pouvant être exploités pour la détection, tel le sillage par exemple.

L'interaction électromagnétique entre la cible et le radar constitue le point central de la modélisation des scénarii navals. La finalité du traitement radar (le type et la qualité de l'information à extraire) détermine le niveau de précision requis pour la caractérisation de la cible.

Ainsi, dans le cas où l'objectif du traitement radar est la détection, la cible sera modélisée en utilisant une *description statistique* de son écho, au moyen des modèles de Swerling, χ^2 [Nakagami, 1958] [Johnston, 1997], log-normaux [Heidbreder, 1967] [Farina 1986] [Swerling, 1997] ou Weibull [Farina, 1987]. Ces modèles ont été continuellement améliorés, afin de prendre en compte la variabilité des propriétés statistiques de l'écho de la cible en fonction de son orientation, notamment en haute résolution, en utilisant des techniques paramétriques (la distribution Gamma non-centrale est ses variantes [Shnidman, 2003], le modèle Rice-masqué [Abdi, 2003], etc.), non-paramétriques ([Xu, 1997]) ou des modèles Markov ([Maio, 2004]). Une solution alternative est proposée par les modèles hybrides [Maffet, 1989]. Ils maintiennent le principe de la description aléatoire de l'écho de la cible, mais intègrent les informations sur la structure et l'orientation de celle-ci. Dans le cas où l'objectif du traitement radar est l'imagerie, la cible est décrite par la combinaison d'un modèle électromagnétique, lié à sa structure, et d'un modèle hydrodynamique, qui combine sa loi de mouvement et l'information de visibilité associée.

La description structurelle utilisée pour simuler l'écho de la cible peut être effectuée sur plusieurs niveaux de détail. Les trois modèles ci-dessous, couramment utilisés, correspondent à des niveaux de complexité croissante pour la modélisation des cibles navales :

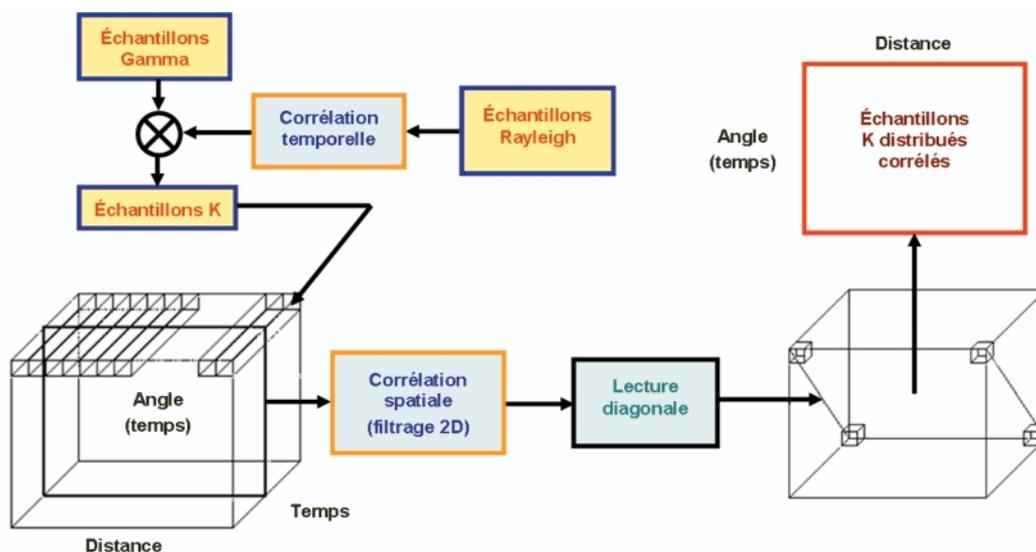


Figure 3. Schéma de l'algorithme de simulation du fouillis de mer basé sur le modèle K-compound.

- ensemble invariant de points brillants (EIPB);
- ensemble de composantes élémentaires (ECE) [Shirman, 2002];
- modèles numériques.

Le premier modèle considère la cible sous la forme d'un ensemble invariant (rigide, non-déformable) de centres de réflexion ponctuels et isotropes, appelés points brillants. Ce modèle présente quelques limitations importantes :

- les points brillants sont considérés isotropes, alors qu'en réalité leurs coefficients de réflexion sont variables en fonction de l'angle de visée;
- le masquage géométrique des points brillants n'est pas considéré;
- l'ensemble des points brillants est considéré figé (géométriquement) pendant le mouvement de la cible;
- les réflexions multiples et les phénomènes de résonance ne sont pas pris en compte.

Le modèle ECE correspond à un niveau supérieur de représentation, tout en restant acceptable en termes de complexité. Il repose sur l'utilisation des méthodes numériques approximatives. Son utilisation dans le cas des cibles aériennes [Gorshkov, 2002] a montré un potentiel remarquable concernant la modélisation réaliste des scénarii radar.

Dans le cas des modèles numériques, le signal écho est obtenu par l'application des méthodes exactes de calcul numérique du champ électromagnétique (moments, éléments finis, différences finies) à une cible, dont la structure est décrite de manière arbitrairement fine (maillage).

3. Modélisation électromagnétique des cibles radar

En haute résolution, pour une orientation donnée, la cible peut être assimilée à un ensemble de points brillants, représentant des structures fortement réfléchissantes et localisées. Les paramètres de ce modèle (amplitude et distribution des points brillants) varient avec l'orientation de la cible. En effet, certaines structures peuvent être masquées, d'autres sont anisotropes, etc. Nous présentons ci-dessous une procédure d'extraction du modèle EPB approchant l'écho radar de la cible et une méthode de prise en compte de sa variabilité en fonction de l'orientation de la cible.

3.1. Extraction du modèle EPB pour un angle de visée donné

Plusieurs méthodes ont été proposées pour l'extraction du modèle EPB de la cible, correspondant à un angle de visée donné, à partir de son écho radar : MEMP [Hua, 1992], MUSIC

[Odendaal, 1994], ESPRIT [Rouquette, 2001], la prédiction linéaire [Gupta, 1994] ou la méthode CLEAN [Tsao, 1988].

La dernière technique cherche à estimer de façon itérative les amplitudes et les positions de l'ensemble des points brillants à partir de l'image ISAR de la cible, reconstruite en utilisant la transformée de Fourier. Afin de contourner certains de ses inconvénients (sensibilité aux interférences, par exemple), la méthode CLEAN a été reformulée comme un problème d'optimisation en [Choi, 2001] (cas 1D), [Choi, 2003] (cas 2D) et [Totir, 2006] (cas 3D).

Le critère retenu consiste à minimiser l'énergie de la signature complexe résiduelle (réduite), obtenue après l'extraction de chaque point brillant.

L'extraction du point brillant minimisant l'énergie résiduelle revient à trouver les paramètres a_q et (x_q, y_q, z_q) , comme solutions du problème d'optimisation suivant :

$$\min_{a, x, y, z} \left\| S(f_m, \theta_n, \varepsilon_p) - a \exp\left(\frac{j4\pi}{c} f_m (x \cos \theta_n \cos \varepsilon_p + y \sin \theta_n \cos \varepsilon_p + z \sin \varepsilon_p)\right) \right\|^2$$

où $S(f_m, \theta_n, \varepsilon_p)$ désigne la signature complexe de la cible et θ_n et ε_p sont ses angles de gisement et de tangage [Quinquis, 2004]. La quantité :

$$d(\theta_n, \varepsilon_p) = x \cos \theta_n \cos \varepsilon_p + y \sin \theta_n \cos \varepsilon_p + z \sin \varepsilon_p$$

représente la distance du point (x, y, z) au centre de rotation de la cible.

Cette procédure est itérative et l'algorithme s'arrête quand un nombre fixé de points brillants est extrait ou quand l'énergie résiduelle devient inférieure à un seuil fixé.

En raison de la complexité de la forme de la fonction de coût ci-dessus, les algorithmes de type gradient risquent d'être piégés dans un minimum local ou de ne pas converger. Les méthodes d'optimisation stochastique, tels que les algorithmes génétiques (GA) [Holland, 1975] sont donc préférées. La mise en œuvre, ainsi que le choix des paramètres utilisés par cette procédure sont détaillés en [Totir, 2006].

3.2. Construction du modèle EPB-RU

Afin de caractériser le comportement électromagnétique de la cible pour toutes les orientations, il faut extraire les modèles EPB correspondant à un maillage des angles de gisement et de site (figure 4). Une représentation unifiée, qui fait correspondre à chaque point brillant une position unique, permet alors d'intégrer tous les modèles EPB ainsi extraits.

Une carte de visibilité peut être tout d'abord associée à chaque point brillant. Celle-ci est définie par tous les couples gisement-site pour lesquels le point brillant est visible. Cette approche permet la prise en compte du phénomène de masquage géométrique, tel qu'il sera démontré à la section 5.

Afin de prendre aussi en compte l'information de non-isotropie des éléments réfléchissants de la cible, une version améliorée de la carte de visibilité peut être utilisée. Celle-ci est fonction de la

direction de visée, sa valeur représentant l'amplitude de l'écho du point brillant pour une orientation de la cible donnée. Chaque point brillant est donc caractérisé par sa position (en coordonnées cartésiennes par rapport au centre de la cible) et par sa carte d'amplitude [Bhalla, 1997].

La procédure de caractérisation d'une cible radar en utilisant un modèle EPB-RU comprend donc les étapes suivantes :

1) extraction des modèles EPB correspondant au maillage des directions de visée (gisement et site), en utilisant la méthode CLEAN ;

2) mise en correspondance des points brillants en utilisant l'information de position ;

3) construction de la carte d'amplitude pour chaque point brillant. Le pas de discrétisation du maillage est issu du compromis entre la taille de la base de données et la précision de description de l'interaction électromagnétique cible-radar, représentée par la variation maximale du coefficient moyen de corrélation entre deux profils de distance successifs [Li, 1996]. Son choix doit prendre en compte les éléments suivants :

- l'intervalle angulaire et la plage de fréquences pour lesquels le modèle EPB fournit une description précise de la cible augmentent avec la bande relative $\Delta f/f_0$ du signal ;
- l'information de phase des profils de distance se dégrade beaucoup plus vite (un ordre de grandeur) que l'information d'amplitude ;

- les cibles de taille importante et dont la configuration géométrique est complexe nécessitent un maillage angulaire plus fin.

La mise en correspondance des points brillants est effectuée à partir de l'information de position, mais avec une précision égale à la résolution de Fourier. L'ensemble de points brillants identifiés de manière univoque et leurs cartes d'amplitude/visibilité forment la représentation unifiée de la cible. Une illustration de ce concept est présentée sur la figure 5 (Q est le nombre de points brillants dont les positions sont identifiées de manière univoque).

Notons que les points brillants représentant la même structure réfléchissante n'ont pas nécessairement les mêmes coordonnées dans le modèle EPB-RU. Une exception est représentée par les éléments fortement réfléchissants et de taille réduite (les réflecteurs trièdres par exemple), qui peuvent être assimilés à un point brillant dont les coordonnées restent fixes (sa position est identifiée de manière univoque).

3.3. Relation entre la géométrie de la cible et son modèle EPB-RU

Le modèle EPB-RU associe à chaque angle de visée d'une cible donnée, un ensemble de points brillants d'amplitudes et de géométrie (distribution spatiale) connues, qui permet d'approximer son écho radar. Néanmoins, il n'y a aucune relation explicite entre les distributions spatiales de ces ensembles de points brillants et la structure physique de la cible considérée.

Pourtant, notamment dans le cadre des scénarii navals, il est souvent nécessaire de prendre en compte la visibilité directe de la cible par rapport au système radar. Par exemple, le masquage de certaines parties du corps du navire par des vagues est susceptible d'introduire des modifications dans la structure réfléchissante. De la même manière, si la cible s'éloigne du radar, seules les parties supérieures de son corps resteront visibles, à cause de l'effet d'horizon.

Il serait bien évidemment possible d'extraire un modèle EPB-RU pour chaque configuration « masquée » de la cible, mais cette solution rendrait le modèle inutilisable, car trop compliqué et coûteux en ressources de calcul. La solution que nous avons retenue est d'utiliser un seul modèle EPB-RU associé à chaque cible et ensuite d'intégrer les effets de masquage géométrique. Ceci est possible en négligeant (totalement ou partiellement) la contribution des points brillants cachés par rapport à la ligne de visée.

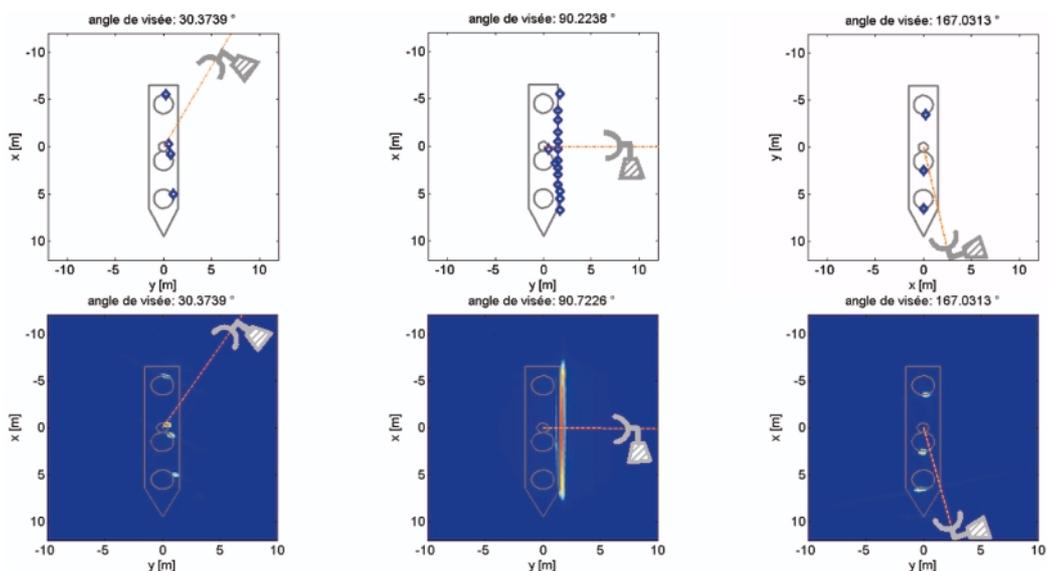


Figure 4. Modèle EPB d'une cible pour plusieurs orientations (haut) et les images ISAR correspondantes (bas).

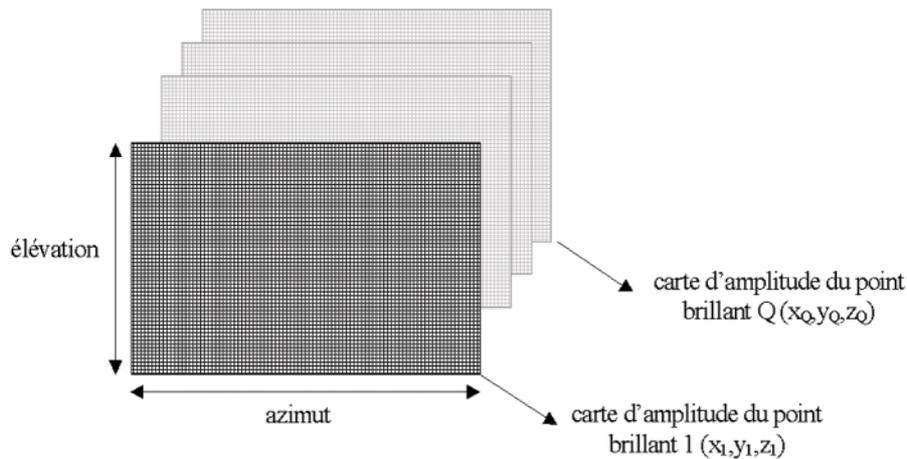


Figure 5. Principe du modèle EPB-RU d'une cible radar.

Il est donc nécessaire d'étudier le lien entre le modèle EPB-RU extrait à partir de l'image ISAR de la cible et la configuration géométrique de cette dernière ou, de manière équivalente, d'établir comment le masquage partiel de son corps se répercute au niveau du modèle EPB-RU associé.

Nous avons considéré le modèle CAD d'une cible navale générique (voir la figure 6). Sa structure géométrique simple permet de construire différentes configurations géométriques partiellement masquées et d'en extraire les modèles EPB-RU associés.

Les signatures complexes de cette cible ont été acquises pour une rotation complète en gisement, avec un pas de 0.1° . Les fenêtres d'ambiguïté mesurent environ 40 m en distance inclinée (le long de la ligne de visée) et 20 m en distance transversale (l'axe orthogonal à la ligne de visée).

Les modèles EPB ont été ensuite extraits tous les 0.5° en utilisant la technique CLEAN. Pour chaque position angulaire, les étapes de la procédure d'extraction de l'EPB modélisant la signature complexe de la cible sont les suivantes :

- 1) construction de la signature complexe de la cible en utilisant le modèle ECE et le balayage en fréquence et en ouverture angulaire ;
- 2) extraction itérative des points brillants au moyen de la technique CLEAN ;

- 3) arrêt de la procédure quand l'énergie résiduelle représente moins de 5 % de l'énergie de la signature complexe ou quand un nombre maximal (25) de points brillants a été atteint.

Afin de construire la carte d'amplitude de chaque point brillant, nous utilisons l'algorithme suivant :

- 1) pour chaque position de la cible son modèle EPB est considéré ;
 - 2) les points brillants appartenant aux différents modèles sont considérés comme l'expression de la même structure réfléchissante si la distance entre eux est en dessous de la résolution de Fourier ;
 - 3) dans ce cas, une carte de visibilité commune pour les points brillants uniquement identifiés est construite : elle comprend leurs amplitudes pour chaque position de la cible, alors que la position est enregistrée une seule fois ;
 - 4) les points brillants qui n'ont aucun correspondant sont associés à une carte d'amplitude avec une seule position non-nulle.
- La mise en correspondance des points brillants peut être rendue plus facile par l'utilisation d'une grille cartésienne équidistante, approximant les positions des points brillants. Ensuite, la correspondance de deux points brillants revient à leur coïncidence sur cette grille. Dans nos simulations, la représentation unifiée de la cible comprend un ensemble d'environ 300 points brillants

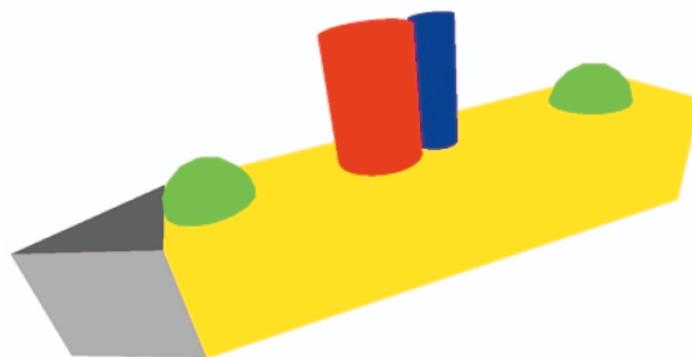


Figure 6. Modèle CAD d'une cible navale générique.

identifiés de manière univoque. Un nombre égal de cartes de visibilité est donc nécessaire. Dans le cas 2D, leur structure est monodimensionnelle (vecteur de données).

Quelques situations particulières mettant en évidence les interactions électromagnétiques qui déterminent la formation d'écho radar de la cible sont montrées sur la figure 4. Les images ISAR présentées ont été obtenues, pour différentes orientations de la cible, par la transformée de Fourier (bande du signal radar de 500 MHz et intégration des profils de distance sur un intervalle angulaire de 5°). Elles illustrent les situations suivantes: la réflexion électromagnétique sur les quatre éléments de superstructure de la cible, la réflexion spéculaire latérale (masquant pratiquement les autres échos de la structure de la cible) et le masquage de l'élément cylindrique arrière. Cette variabilité se retrouve dans la structure des modèles EPB correspondants, extraits en utilisant la technique CLEAN.

Quelques particularités de la méthode d'extraction reposant sur la technique CLEAN, sont déjà visibles à travers les modèles EPB extraits ci-dessus. Ainsi, chaque point brillant est généralement associé à un élément structurel de la cible. Lorsque celle-ci est cachée, les points brillants qui lui correspondent disparaissent. Les éléments à dimension spatiale importante, non assimilables aux structures ponctuelles, sont modélisés sous la forme d'une agglomération de points brillants. Un tel exemple est constitué par la plaque latérale dans le cas de la réflexion spéculaire.

Notamment en haute résolution, il y a un lien fort entre la géométrie de la cible et son modèle EPB. En effet, dans ce cas, la plupart des éléments structuraux ont un écho radar ponctuel, généralement situé sur leur surface. D'ailleurs, la structure géo-

métrique simple de la cible favorise la réflexion spéculaire au détriment des phénomènes de résonance, d'ondes de surface etc. En plus, grâce à la fréquence élevée, l'interaction entre les diverses structures est négligeable par rapport aux échos individuels. Ce lien s'amenuise au fur et à mesure que la résolution se dégrade. Il s'agit principalement d'un effet de superposition des échos partiels, qui rend moins visible la contribution individuelle de chaque point brillant.

Ces remarques sont illustrées sur les figures 7 et 8 au moyen de l'ensemble des points brillants uniquement identifiés dans le modèle EPB-RU. Ces deux figures représentent de manière cumulée tous les points brillants extraits par l'algorithme CLEAN, pour toutes les orientations de la cible et pour plusieurs résolutions en distance inclinée (figure 7) ou transversale (figure 8).

Le modèle EPB-RU devient en effet de plus en plus flou et son lien avec la structure physique de la cible s'affaiblit avec la réduction de la résolution en distance. En plus, le nombre de points brillants placés à l'extérieur de la cible augmente, comme conséquence de plusieurs facteurs :

- erreurs d'extraction lors de l'application de l'algorithme CLEAN 2D;
- résolution réduite en distance transversale ayant comme effet la délocalisation accentuée des éléments à structure plane et phénomène de diffraction (effet notamment visible pour la partie avant du navire);
- visibilité de la cible dans une seule cellule de résolution quand elle est illuminée de côté.

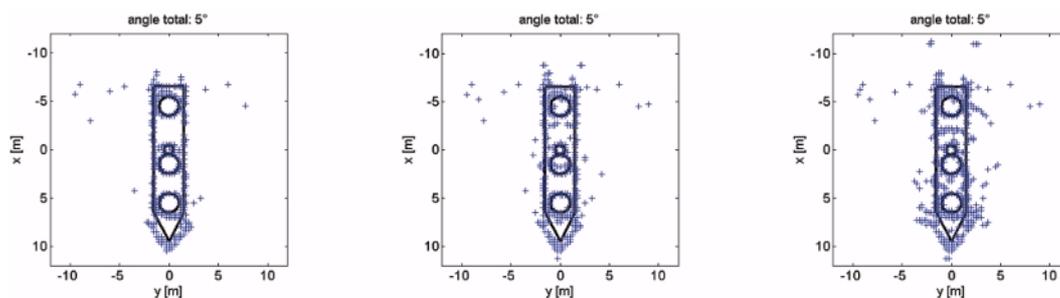


Figure 7. Les positions des PB uniquement identifiés qui forment le modèle EPB-RU extrait pour une résolution en distance inclinée de 0,6 m, 3 m, 6 m.

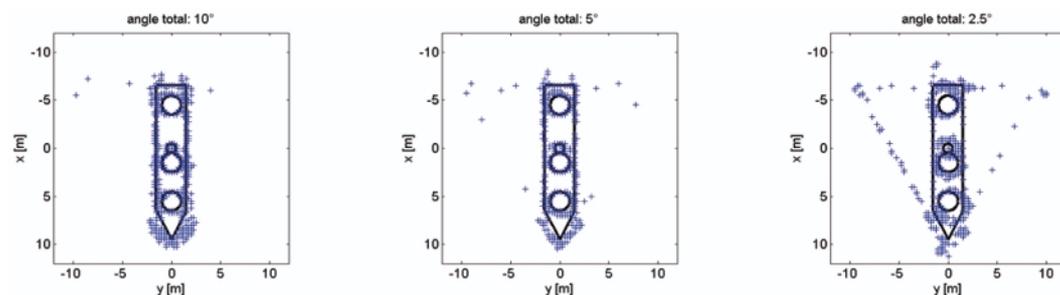


Figure 8. Modèles EPB-RU extrait en haute résolution (0,6 m) en distance inclinée et plusieurs intervalles d'intégration angulaire : 10°, 5°, 2,5°.

Il est à souligner que les points brillants qui apparaissent sur les figures 7 et 8 ne se retrouvent pas simultanément au niveau du modèle de la cible. Ils sont visibles seulement pour certaines orientations et ont un caractère anisotrope, codé en utilisant des cartes d'amplitude.

4. Modélisation hydrodynamique des cibles radar

Dans le cadre d'un scénario radar naval, la cible a une dynamique issue de son interaction avec l'environnement. L'orientation et le masquage introduit par les vagues sont extraits en utilisant un modèle de réalité virtuelle d'une cible en dérive sur la surface de la mer [Parenthoën, 2004]. Le corps de la cible est considéré rigide et est représenté par un ensemble de 5 points sur sa coque.

Les coordonnées de ces points et leur information de masquage définissent la configuration de la cible par rapport au radar. Même si des phénomènes plus complexes tels que l'inertie, l'influence du vent, l'immersion partielle, etc. ne sont pas pris en compte au niveau de la cible, son mouvement libre reproduit le mouvement de la surface de la mer dans son voisinage.

La cible étant rigide, sa position spatiale est déterminée de manière univoque par les positions d'au moins trois points. Les deux autres ont été rajoutés uniquement pour avoir une meilleure description de l'information de visibilité partielle de la cible.

Quatre modèles hydrodynamiques ont été extraits à partir de ce modèle virtuel. Ils décrivent l'orientation et le masquage introduit par les vagues de la mer pour des cibles génériques de faible taille (similaires au Zodiac) pendant 1 minute d'évolution (1500 observations).

Sous l'hypothèse que la cible soit poursuivie par le radar, sa position par rapport à celui-ci est déterminée par la distance inclinée et les angles d'orientation (gisement, tangage et roulis). Les angles d'orientation permettent de déterminer, à partir des modèles EPB-RU, la configuration et les amplitudes des points brillants utilisés pour approcher la signature complexe des cibles.

Pour les directions intermédiaires, qui n'apparaissent pas dans la définition du modèle EPB-RU, une procédure d'interpolation est utilisée. La prise en compte de l'effet de masquage introduit par les vagues est effectuée en utilisant des zones de visibilité.

Les variations des angles de gisement pendant le temps d'évolution de chaque cible sont représentées sur la figure 9. De manière similaire, la figure 10 présente la variation des coefficients qui pondèrent les amplitudes des points brillants appartenant à chaque région de visibilité, pour chacune des cibles considérées. Quand le point de mesure est visible, le poids associé vaut 1, sinon il est nul.

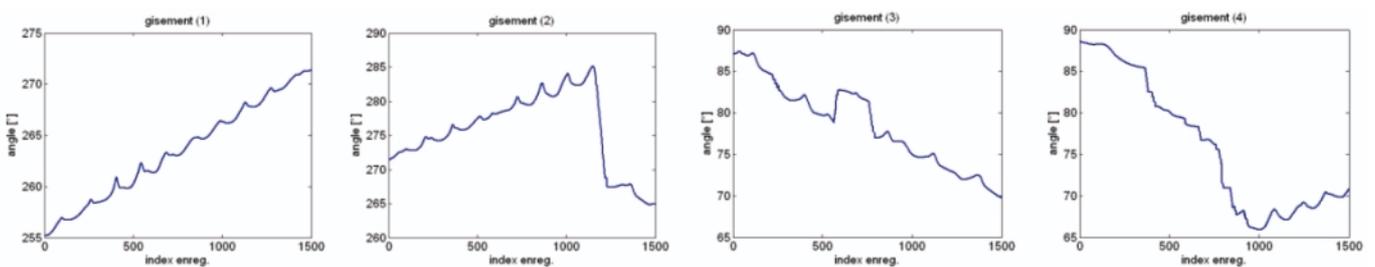


Figure 9. Modèles hydrodynamiques : variation de l'angle de gisement.

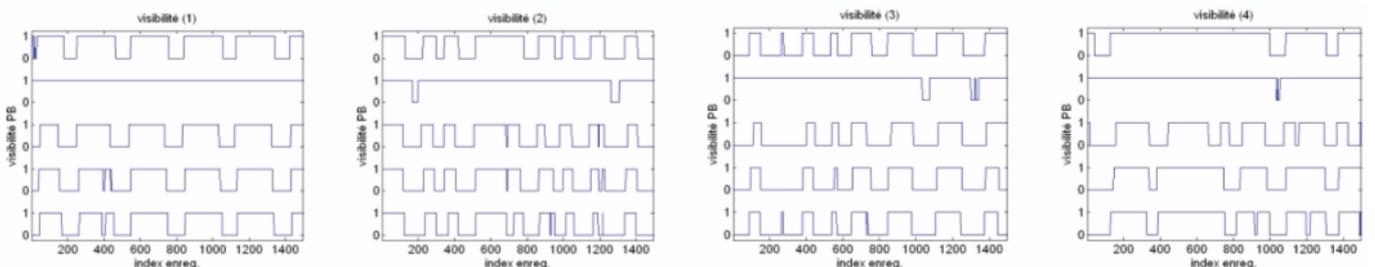


Figure 10. Coefficients associés aux régions de visibilité des quatre cibles navales.

5. Intégration des modèles électromagnétique et hydrodynamique

Les cibles utilisées dans le cadre des simulations ont été obtenues à l'aide d'une maquette reconfigurable, que nous avons mesurée dans la chambre anéchoïde de l'ENSIETA (figure 11). Quatre configurations géométriques ont été considérées. Elles se différencient par les éléments de supra-structure, qui constituent la partie reconfigurable de la maquette. Les signatures complexes de ces configurations ont été obtenues dans la chambre anéchoïde, en utilisant 21 points de mesure en bande X, entre 8 GHz et 10 GHz (incrément fréquentiel de 100 MHz) et un incrément angulaire de 0.1° (entre 0° et 359.9°).

En considérant un facteur d'échelle de 1/20, la taille des cibles à l'échelle naturelle serait d'environ 16×3 m. Les signatures complexes obtenues correspondent alors à des mesures effectuées sur ces cibles à l'échelle naturelle, entre 400 MHz et 500 MHz. Puisque le système de mesure ne permet qu'une rotation en gisement de la cible, nous n'avons pu travailler qu'avec des modèles 2D, mais les résultats obtenus sont facilement généralisables au cas tridimensionnel.

Dans le cas bidimensionnel, seul l'angle de gisement sera utilisé pour définir l'orientation de la cible et les cartes d'amplitude des points brillants des modèles EPB-RU deviennent des vecteurs. Quelques exemples de points brillants et de cartes d'amplitude associées sont présentés sur la figure 12. Les modèles EPB-RU des quatre cibles sont représentés sur la figure 13.

Le modèle EPB-RU de chaque cible contient les positions et les cartes d'amplitude des points brillants pour un maillage en ouverture d'incrément angulaire 0.5° . Ce choix est motivé par les conclusions de l'étude présentée en [Li, 1996], afin d'assurer un niveau de corrélation de deux profils de distance successifs supérieur à 0.75.

Le masquage des points de mesure par les vagues de la mer est pris en compte au travers des régions de visibilité, similaires à celles représentées sur la figure 14. Si l'un des capteurs virtuels est masqué par les vagues de la mer, les points brillants appartenant à la région de visibilité correspondante seront ignorés dans le calcul du signal écho.



Figure 11. Vue générale de la maquette reconfigurable (gauche), la maquette pendant la campagne de mesure (centre) et les dimensions (en mm) d'une des configurations utilisées (droite).

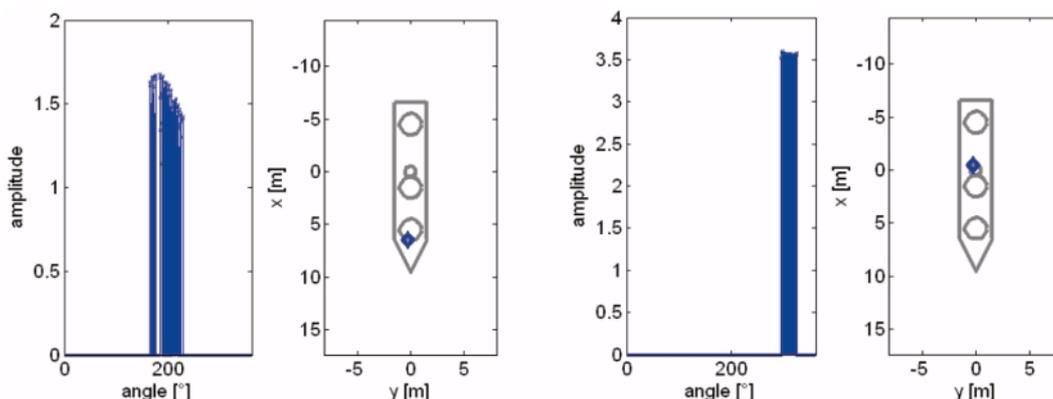


Figure 12. Exemples de cartes d'amplitude et positions des PB correspondants.

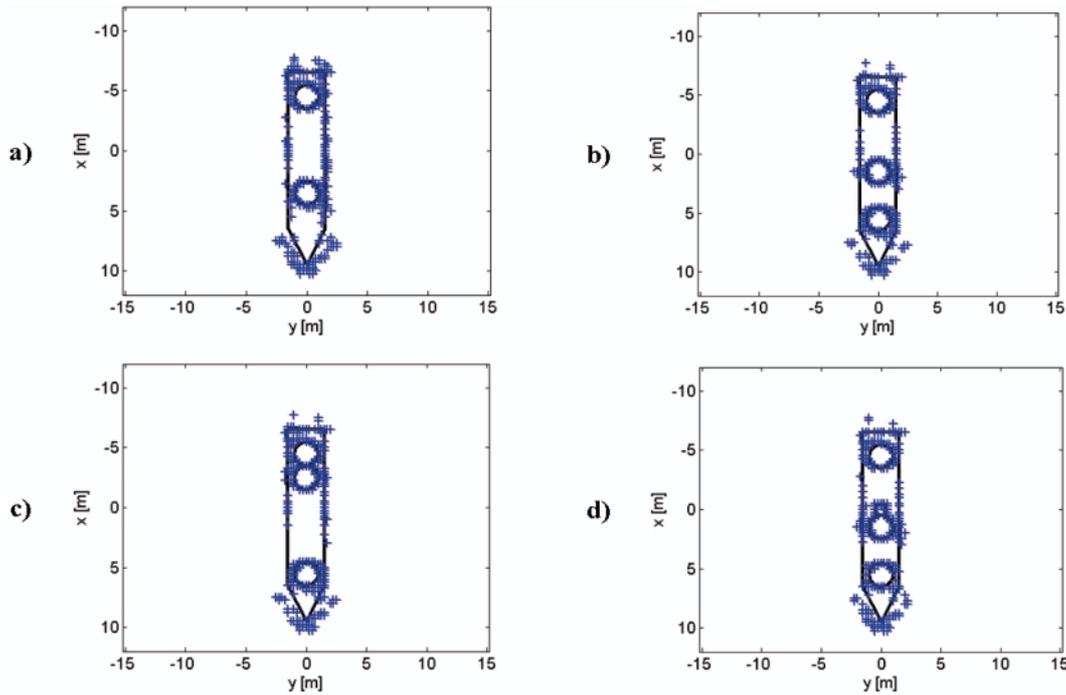


Figure 13. Les modèles EPB-RU correspondants aux quatre cibles.

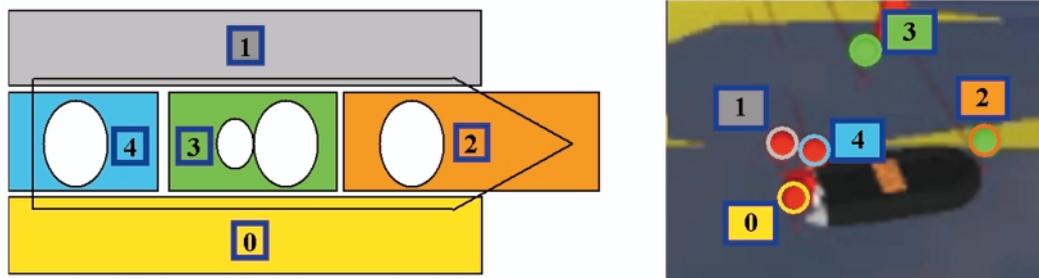


Figure 14. Régions de visibilité (gauche) associées à chacun des points de mesure (droite).

6. Application à la caractérisation d'un scénario radar naval

Dans un premier temps, afin d'étudier les effets de la forte dépendance des profils de distance de l'orientation de la cible, nous avons effectué la classification des quatre cibles pour des angles de visée entre 0° et 360° . Les profils de distance sont reconstruits en utilisant la méthode MUSIC 1D, à partir des échos engendrés par leurs modèles EPB-RU. Les paramètres liés à l'acquisition et à la reconstruction des profils de distance sont indiqués ci-dessous :

- signal émis à sauts de fréquence, en bande X: 51 points de mesure en fréquence, entre 9.8125 GHz et 10.1875 GHz (donc, une bande de 375 MHz et une fréquence moyenne de 10 GHz, correspondant à une longueur d'onde moyenne de 3 cm, une

fenêtre d'ambiguïté en distance inclinée d'environ 20 m et une résolution en distance inclinée de 40 cm) ;

- longueur de la fenêtre de lissage spatial et taille de la matrice d'autocorrélation des données : 30 ;
- nombre de points brillants estimés, pour chaque profil de distance, par le critère proposé en [Radoi, 2004] ;
- nombre de points de calcul de l'estimée MUSIC : 256.

L'angle d'orientation de la cible varie de 0.5° entre deux profils de distance successifs. Par conséquent, 720 profils de distance ont été reconstruits pour chaque cible (classe) et distribués ensuite en 360 vecteurs d'apprentissage et 360 vecteurs de test. Les profils de distance ainsi obtenus ont été projetés par ACP dans un espace de dimension réduite (27), qui conserve 99 % de leur inertie. Les taux de bonne classification ont été moyennés sur une fenêtre de 30° , centrée sur la valeur courante de l'angle d'orientation. Les taux moyens de bonne classification (sans bruit) sur l'ensemble de quatre classes au moyen de 4 classifieurs (KNN, SART, PMC et SVM), sont présentés sur la figure 15. Les paramètres des classifieurs utilisés sont indiqués ci-dessous :

- classifieur KNN: nombre des plus proches voisins: 3;
 - classifieur SART: taux maximal moyen d'erreur admissible: 0.01, nombre maximal d'époques: 100 et nombre maximal de prototypes: 200;
 - classifieur PMC: une couche cachée, nombre de neurones sur la couche cachée: 50, algorithme d'entraînement de type gradient descendant avec taux d'apprentissage variable et terme de moment (égal à 0.9), nombre maximal d'époques: 2500, taux d'apprentissage initial: 0.01, fonction de seuillage: sigmoïde logarithmique;
 - classifieur SVM: noyau de type radial $K(x_i, x_j) = \exp(-\gamma \|x_i - x_j\|^2)$ où $\gamma = 0.01$, paramètre de coût $C = 1$.
- Alors que les performances des 4 classifieurs sont similaires, les courbes représentées sur la figure 15 mettent en évidence des faibles valeurs des taux de bonne classification autour de 0°, 90°, 180° et 270°. Ceci est la conséquence des masquages géométrique et énergétique des éléments de la supra-structure pour ces domaines angulaires particuliers. De plus, les arêtes et le sommet de la proue introduisent un effet de diffraction autour de 180°.

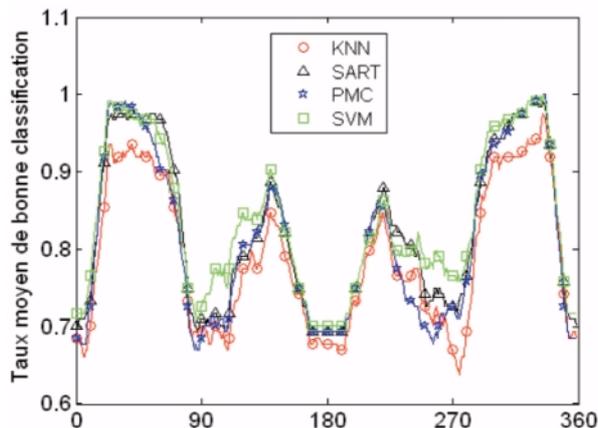


Figure 15. Taux moyens de bonne classification pour les classifieurs KNN, SART, PMC et SVM, obtenus par l'utilisation directe des profils de distance.

Pour les configurations considérées, l'effet de masquage géométrique est prédominant notamment autour de 0° (vue de derrière) et de 180° (vue de l'avant). Notons que si le modèle utilisé était de type EIPB le masquage géométrique ne serait pas pris en compte et ces deux orientations de la cible seraient parmi les plus discriminantes. En effet, tous les points brillants seraient visibles et leur séparation serait maximale (projection sur l'axe longitudinal de l'objet). Le contenu informationnel serait donc particulièrement riche dans ce cas, ce qui ne correspond pas à la réalité. Par contre, le modèle EPB-RU permet dans ce cas de modéliser correctement l'effet de masquage et la réduction du contenu informationnel, phénomène qui se retrouve dans l'allure des courbes illustrant les performances des classifieurs.

Le masquage énergétique pénalise également les résultats de la classification. Il est plus marqué pour les orientations correspondant à une illumination latérale (90° et 270°) ou de derrière (180°), quand les plaques planes latérales ont des réflexions spéculaires très fortes. Par conséquent, les profils de distance ainsi reconstruits sont très similaires pour les 4 cibles.

Cet effet est également pris en compte par le modèle EPB-RU. Dans un deuxième temps, les quatre modèles hydrodynamiques définis sont associés aux modèles électromagnétiques des cibles. Les signaux écho des cibles sont ensuite reconstruits à partir de ces modèles et des échantillons de fouillis sont rajoutés.

Pour chaque orientation des cibles, le rapport signal à bruit est déterminé en utilisant leurs SER moyennes. L'influence du masquage partiel introduit par les vagues de la mer se retrouve au niveau des variations des SER des cibles (figure 16), dans leurs profils de distance et images ISAR (figure 17) ou, de manière globale, sur leurs sinogrammes (figure 18). Notons la corrélation existante entre les zones d'absence d'écho de certains points brillants, leur appartenance aux régions de visibilité et le masquage de ces dernières.

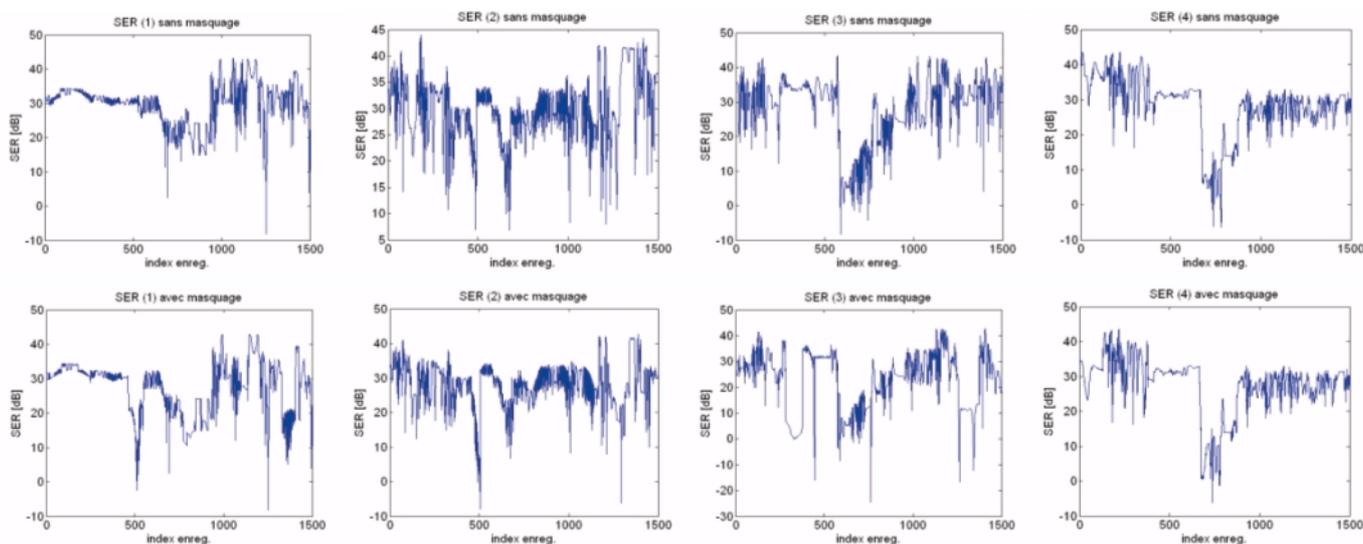


Figure 16. Variations des SER des cibles, sans (haut) et avec (bas) la prise en compte du masquage introduit par les vagues.

La classification des cibles est effectuée à partir de leurs profils de distance. Les taux moyens de bonne classification pour chacune des quatre cibles sont représentés sur la figure 19. Les paramètres utilisés dans l'étape de classification sont les suivants :

- valeur du rapport signal à bruit : 10 dB ;
- valeur du facteur de forme de la distribution K-compound : 1 ;
- type de signature utilisée pour la classification des cibles : attributs géométriques similaires aux ceux présentés en [Botha, 1995], extraits à partir des points brillants identifiés par la méthode ESPRIT 1D ;
- type de classifieur utilisé : SVM (noyau de type radial, $\gamma = 10$).

Notons que le masquage introduit par les vagues engendre une dégradation des performances des classifieurs. Celle-ci n'est pas toutefois très importante, en raison du nombre relativement réduit d'occurrences du masquage et de l'effet de la sélection des caractéristiques effectuée lors de l'extraction d'attributs.

7. Conclusions et perspectives

Une méthodologie de simulation réaliste de cibles radar en environnement marin a été proposée. L'influence de la surface de la mer est prise en compte aussi bien au niveau du mouvement des cibles qu'au niveau du masquage introduit par les vagues. Afin d'intégrer cette information nous avons fait appel au modèle de réalité virtuelle d'une embarcation de faibles dimensions en dérive sur la surface de la mer. La simulation de l'écho radar de la cible est basée sur le modèle EPB-RU, qui permet de prendre en compte le caractère anisotrope et la visibilité angulaire limitée des points brillants de la cible.

Hormis la procédure de modélisation des cibles, le caractère réaliste des résultats présentés est lié à :

- l'acquisition des données nécessaires aux procédures de modélisation dans une chambre anéchoïde ;

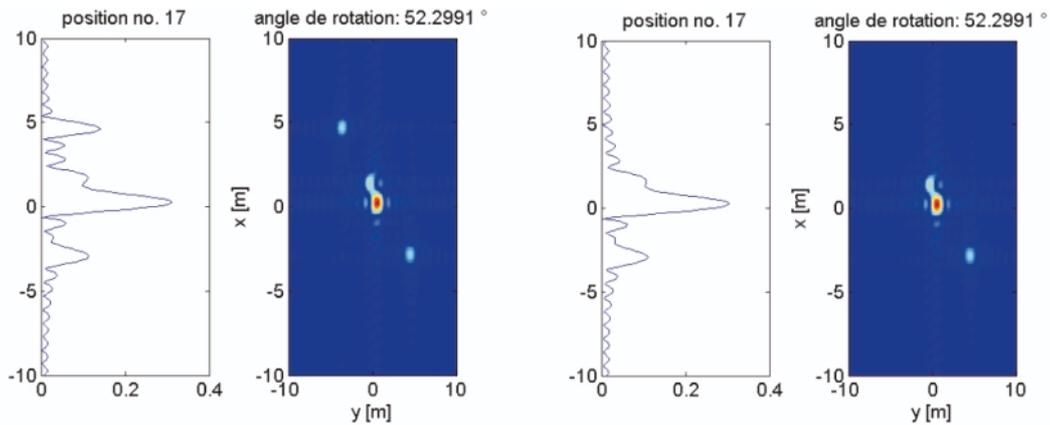


Figure 17. Exemples de profils de distance et des images ISAR d'une cible navale, reconstruites sans avoir utilisé (gauche) et en utilisant (droite) l'information de masquage géométrique introduit par les vagues.

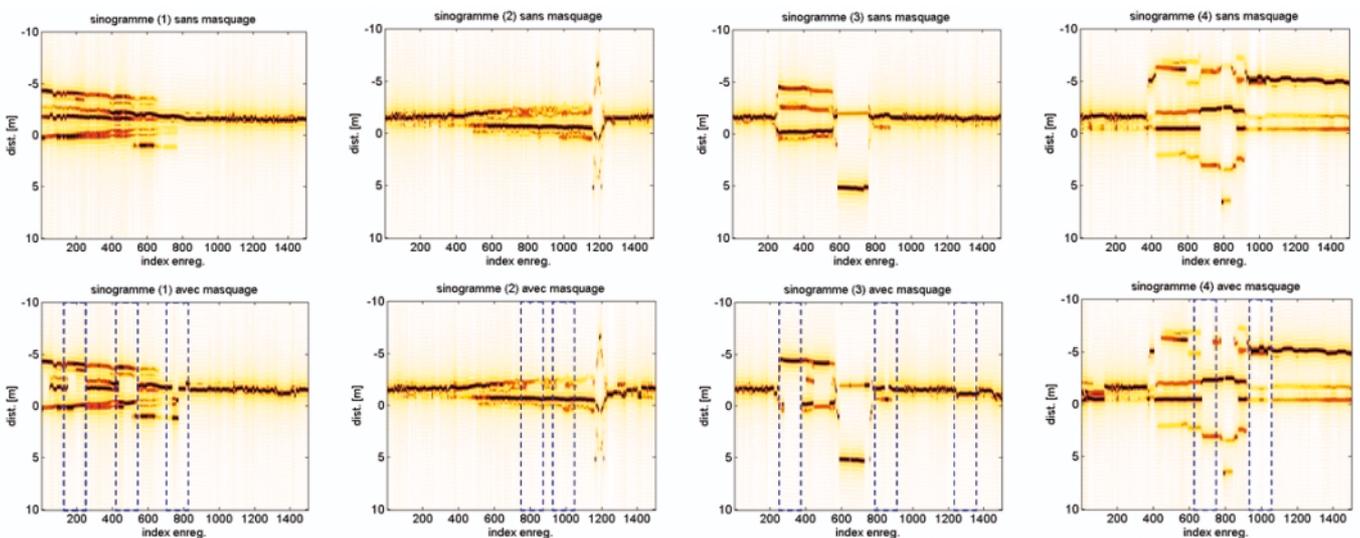


Figure 18. Sinogrammes des cibles, sans (haut) et avec (bas) la prise en compte du masquage introduit par les vagues.

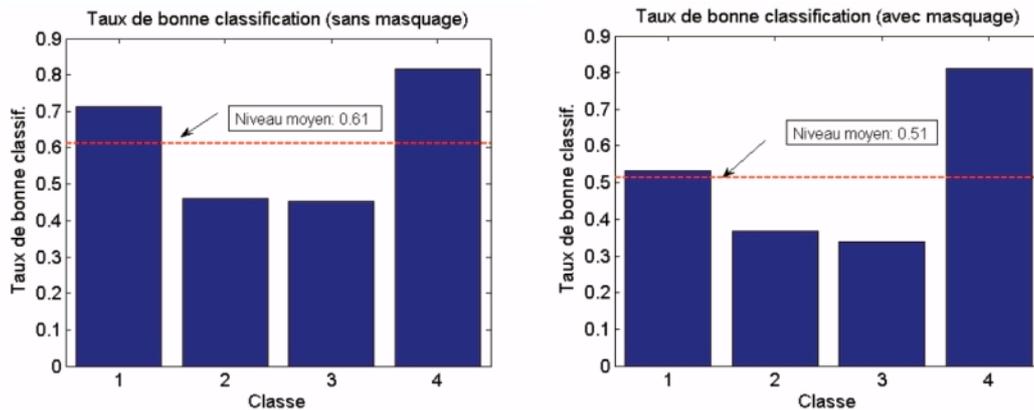


Figure 19. Taux de bonne classification des cibles radar à loi de mouvement réaliste, sans (gauche) et avec (droite) la prise en compte du masquage introduit par les vagues.

- la prise en compte du fouillis de mer dans la structure du signal écho ;
- l'utilisation des modèles hydrodynamiques réalistes, simulés par des techniques de réalité virtuelle.

Les perspectives de ce travail découlent des possibilités d'amélioration des méthodes présentées, ayant pour objectif de rendre encore plus réaliste la modélisation et encore plus efficaces les différents types de traitements associés.

Ainsi, le modèle EPB-RU pourrait être amélioré en considérant non seulement des points brillants, mais aussi d'autres formes élémentaires, notamment des éléments distribués (plaques planes, par exemple). Le but serait d'éviter leur modélisation, peu réaliste, sous la forme d'une agglomération de points brillants et de réduire la taille du modèle. Par ailleurs, cette approche devrait permettre une meilleure prise en compte du masquage partiel de la structure de la cible.

Les modèles hydrodynamiques que nous avons utilisés ne sont valables que pour des petites cibles. D'autres modèles plus élaborés, basés sur les interactions solide-fluide, seraient par conséquent nécessaires pour la simulation du mouvement de bâtiments navals de tailles plus importantes. Dans un premier temps, des descriptions statistiques des angles d'orientation pourraient être utilisées pour ajuster les coefficients des modèles hydrodynamiques proposés.

Enfin, une relation explicite entre l'état de mer et les valeurs des paramètres de la loi K-compound, utilisée pour simuler le fouillis de mer, permettrait une modélisation plus précise des échos des cibles navales dans leur environnement.

Le travail présenté peut constituer la base de développement d'un système intégré de simulation des scénarii radar navals et d'évaluation des performances des algorithmes d'exploitation de l'information en vue de la classification automatique des cibles.

Références

[Abdi, 2003] A. ABDI, W. C. LAU, M. C. ALOUINI, M. KAVEH, "A new simple model for land mobile satellite channels: first and second order statistic", IEEE Trans. Wireless Communications, vol. 2, no. 3, pp. 519-528, 2003.

[Bhalla, 1997] R. BHALLA, J. MOORE, "A global scattering center representation of complex targets using the shooting and bouncing ray technique", IEEE Trans. Antennas and Propagation, vol. 45, no. 12, pp. 1850-1856, December 1997.

[Botha, 1995] E. C. BOTHA, E. BARNARD, C. J. BARNARD, "Feature-based classification of aerospace radar targets using neural networks", Neural Networks, vol. 9, no. 1, pp. 129-142, 1996.

[Choi, 2001] I. S. CHOI, H. T. KIM, "One-dimensional evolutionary programming-based CLEAN", IEE Electronic Letters, vol. 37, no. 3, pp. 400-401, Mars 2001.

[Choi, 2003] I. S. CHOI, H. T. KIM, "Two-dimensional evolutionary programming-based CLEAN", IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, vol. 39, no. 1, pp. 373 - 382, January 2003.

[Darricau, 1991] J. DARRICAU, "Physique et théorie du radar", Tomes I et II, Ed. SODIPE, 1991.

[Denny, 2000] M. DENNY, D. GREIG, "Modeling sea clutter for airborne pulse-Doppler radar", Proc. NATO Symposium on Low Grazing Angle Clutter: Its Characterization, Measurement and Application, Laurel, Avril 2000 (Research and Technology Organization Meeting Proceedings, vol. 60, publié Octobre, 2000).

[Farina, 1986] A. FARINA, A. RUSSO, F. A. STUDER, "Coherent radar detection in log-normal clutter", IEE Proc. F. Commun. Radar Signal Processing, vol. 133, no.1, pp. 39-54, 1986.

[Farina, 1987] A. FARINA, A. RUSSO, F. SCANNAPIECO, S. Barbarossa, "Theory of radar detection in coherent Weibull clutter", IEE. Proc. F. Commun. Radar Signal Processing, vol. 134, no. 2, pp. 174-190, 1987.

[Gorshkov, 2002] S. GORSHKOV, S. LESCHENKO, V. ORLENKO, S. SEDYSHEV, Y. SHIRMAN, "Radar target backscattering simulation", Artech House, 2002.

[Gupta, 1994] I. J. GUPTA, "High-resolution radar imaging using 2-D linear prediction", IEEE Trans. Antennas Propag., vol. 42 , pp. 31-37, Jan. 1994.

[Heidbreder, 1967] G. R. HEIDBREDER, R. L. MITCHELL, "Detection probabilities for lognormally distributed signals", IEEE Trans. Aerospace and Electronic Systems, vol. 31, no. 1, pp. 5-13, 1967.

[Holland, 1975] J. H. HOLLAND, "Adaptation in natural and artificial systems", University of Michigan Press, Ann Arbor, 1975.

- [Hua, 1992] Y. HUA, "Estimating two-dimensional frequencies by matrix enhancement and matrix pencil", *IEEE Trans. Signal Proc.*, vol. 40, pp. 2267-2280, Sept. 1992.
- [Johnston, 1997] S. L. JOHNSTON, "Target models pitfalls (illness, diagnosis, and prescription)", *IEEE Trans. Aerospace and Electronic Systems*, vol. 33, no. 2, pp. 715-720, 1997.
- [Katzin, 1957] M. KATZIN, "On the mechanism of radar sea clutter "Proc. IRE, vol. 45, pp. 44-54, 1957.
- [Li, 1996] H.-J. LI, Y.-D. WANG, L.-H. WANG, "Matching score between range profiles of high-resolution radar targets", *IEEE Trans. Antennas and Propagation*, vol. 44, no. 4, pp. 444-452, Avril 1996.
- [Maffet, 1989] A. L. MAFFET, "Topics for a statistical description of radar cross section", John Wiley and Sons, 1989.
- [Maio, 2004] A. D. MAIO, A. FARINA, G. FOGLIA, "Target fluctuation models and their application to radar performance prediction", *IEE Proc. Radar Sonar Navigation*, vol. 151, no. 5, October 2004.
- [Michalewicz, 1994] Z. MICHALEWICZ, "A perspective on evolutionary computation", *Proc. of Evo Workshops*, pp. 73-89, 1994.
- [Nakagami, 1958] M. NAKAGAMI, "The m-distribution: A general formula of intensity distribution of rapid fading", in *Proc. Statistical Methods in Radio Wave Propagation*, June 18-20, 1958.
- [Noga, 1999] L. NOGA, "Bayesian state-space modelling of spatio-temporal non-Gaussian radar returns", Thèse de doctorat, Cambridge, Mars 1999.
- [Odendaal, 1994] J. W. ODENDAAL, E. BARNARD, C. W. I. PISTORIUS, "Two-dimensional superresolution radar imaging using the MUSIC algorithm", *IEEE Trans. Antennas and Propagation*, vol. 42, no. 10, 1386-1391, October 1994.
- [Paulraj, 1986] A. PAULRAJ, R. ROY, T. KAILATH, "A subspace rotation approach to signal parameter estimation", *Proc. of the IEEE*, vol. 74, no. 7, pp. 1044-1045, 1986.
- [Parentoën, 2004] M. PRENTHOËN, T. JOURDAN, J. TISSEAU, "IPAS: Interactive Phenomenological Animation of the Sea", *International Society of Offshore and Polar Engineering (ISOPE'04)*, 2004-JSC-386, Toulon, France, 23-28 Mai, 2004.
- [Quinquis, 2004] A. QUINQUIS, E. RADOI, F. TOTIR, "Some radar imagery results using superresolution techniques", *IEEE Trans. Antennas and Propagation*, vol. 52, no. 5, pp. 1230-1244, May 2004.
- [Radoi, 2003a] E. RADOI, A. QUINQUIS, P. SAULAIS, "Two methods for simulating non-gaussian highly correlated sea clutter maps", *Proc. OCEANS 2003*, pp. 446-448, San Diego, California, USA, Septembre 2003.
- [Radoi, 2003b] E. RADOI, A. QUINQUIS, P. SAULAIS, "Analysis and simulation of sea clutter at high range resolution and low grazing angles", *Proc. IGARSS 2003*, vol. VII, pp. 4192-4194, Toulouse, France, Juillet 2003.
- [Radoi, 2004] E. RADOI, A. QUINQUIS, "A new method for estimating the number of harmonic components in noise with application in high-resolution radar", *EURASIP Journal on Applied Signal Processing*, no. 8, pp. 1177-1188, Hyndawi Publishing Corporation, 2004.
- [Reilly, 1990] J. P. REILLY, G. D. DOCKERY, "Influence of evaporation ducts on radar sea return", *IEE Proceedings, Part F: Radar and Signal Processing*, vol. 137, pt. F, no. 2, p. 81-88, April 1990.
- [Rouquette, 2001] S. ROUQUETTE, M. NAJIM, "Estimation of frequencies and damping factors by two-dimensional ESPRIT type methods", *IEEE Trans. Signal Proc.*, vol. 49, pp. 237-245, Jan. 2001.
- [Shnidman, 2003] D. A. SHNIDMAN, "Expanded Swerling target models", *IEEE Trans. Aerospace and Electronic Systems*, vol. 39, no. 3, pp. 1059-1067, July 2003.
- [Shirman, 2002] Y. D. SHIRMAN, "Computer simulation of aerial target radar scattering, recognition, detection and tracking", Norwood, MA : Artech House, 2002.
- [Swerling, 1997] P. SWERLING, "Radar probability of detection for some additional fluctuating target cases", *IEEE Trans. Aerospace and Electronic Systems*, vol. 33, no. 2, pp. 698-709, 1997.
- [Tsao, 1988] J. TSAO, R. D. STEINBERG, "Reduction of sidelobe and speckle artifacts in microwave imaging: The CLEAN technique", *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, vol. 36, pp. 543-556, Apr. 1988.
- [Totir, 2006] F. TOTIR, E. RADOI, A. QUINQUIS, "An evolutionary approach for 3D superresolution imagery", *EUSIPCO 2006*, Florence, Italie, 4-8 Septembre 2006.
- [Wehner, 1994] R. WEHNER, "High Resolution Radar", Second Edition, Artech House, Boston, 1994.
- [Xu, 1997] X. XU, "A new RCS statistical model of radar targets", *IEEE Trans. Aerospace and Electronic Systems*, vol. 33, no. 2, pp. 710-714, April 1997.





Felix-Costinel **Totir**

Felix-Costinel Totir est diplômé de l'Académie Technique Militaire de Bucarest (2002) dans la spécialité radar. Il a obtenu ses diplômes de DEA, en 2003, et de doctorat, en 2006, à l'Université de Bretagne Occidentale de Brest, dans le domaine de l'électronique. Actuellement, il est chercheur scientifique à l'Agence de Recherche pour Technologies et Equipements Militaires de Bucarest. Sa recherche concerne essentiellement le traitement du signal, l'analyse temps-fréquence et les techniques superrésolution appliquées aux systèmes radar.



Emanuel **Radoi**

Emanuel Radoi est diplômé de l'Académie Technique Militaire (ATM) de Bucarest (1992) dans la spécialité radar. Il a obtenu ses diplômes de DEA, en 1997, et de doctorat, en 1999, à l'Université de Bretagne Occidentale de Brest, dans le domaine de l'électronique. Entre 1992 et 2002 il a été enseignant-chercheur à l'ATM de Bucarest. En 2002 il a rejoint l'ENSIETA de Brest, où il travaille actuellement en tant que Maître de Conférences. Sa recherche se concentre autour de l'imagerie radar, la reconnaissance automatique des cibles radar et le traitement de l'information.



André **Quinquis**

André Quinquis a obtenu ses diplômes de DEA, en 1986, et de doctorat, en 1989, à l'Université de Bretagne Occidentale de Brest, dans le domaine du traitement du signal. Entre 1989 et 2002 il a enseigné et a développé des activités de recherche à l'Académie Navale de Brest. En 1992 il a rejoint l'ENSIETA de Brest, en tant que enseignant-chercheur. Il a occupé les fonctions de responsable du département Electronique, Informatique, Automatique et de directeur scientifique de cette école d'ingénieurs. Sa recherche est structurée autour du traitement du signal, les méthodes temps-fréquence, l'estimation statistique et la théorie de la décision. Il est auteur de 8 ouvrages et de plus de 100 articles dans le domaine du traitement du signal.

