

Titre de la Thèse :

Segmentation d'images SONAR par approche markovienne hiérarchique non supervisée et classification d'ombres portées par modèles statistiques

Auteur : Max Mignotte

Jury :

Rapporteurs :	W. PIECZYNSKI	Professeur à l'INT Evry
	J. ZERUBIA	Directeur de recherche à l'INRIA Sophia-Antipolis
Examineurs :	P. BOUTHEMY	Directeur de recherche à l'INRIA/IRISA Rennes
	L.C. CALVEZ	Professeur à Université de Bretagne Occidentale (UBO)
	C. COLLET	Maître de conférences à l'Ecole navale-UBO
	M. GRANGER	Ingénieur de Recherche DGA
	P. PÉREZ	Chargé de recherche à l'INRIA/IRISA Rennes

Travail effectué au sein du laboratoire
Groupe de Traitement du Signal de l'Ecole navale

Résumé de la thèse

Le SONAR haute résolution constitue un moyen efficace pour observer la très grande variété d'objets reposant sur les fonds marins. Ces dernières années, de nombreuses améliorations ont rendu ces SONAR de plus en plus performants (utilisation à des profondeurs plus importantes, zones explorées plus vastes, plus grande finesse d'analyse, visualisation des résultats sous forme d'images ...). En contre partie, la quantité d'informations présentées aux opérateurs a sensiblement augmenté et rend aujourd'hui nécessaire d'automatiser la détection et la classification de ces objets. Le but recherché dans le domaine de la classification en imagerie SONAR est, dans un premier temps, d'être à même de pouvoir différencier les objets naturels des objets manufacturés (épave de bateau, pipe-line, ...). Une autre application de la classification automatique de ces objets est la lutte contre les mines. En effet, chaque objet reposant sur le fond peut être une menace éventuelle pour les navires de guerre et les navires marchands. Il faut donc être en mesure de lever le doute quant à la nature de ces objets, pour éviter la mise en œuvre systématique de moyens lourds de destruction.

La classification de ces objets en tant que "*objets naturels*" (rochers, cailloux, ...) ou "*objets manufacturés*" (épave de bateau, pipe-line, mine ...) est réalisée grâce à une analyse de la forme de l'ombre qu'ils produisent sur les images SONAR. À cette fin, l'automatisation de la phase de classification requiert une première étape qui a pour but de sélectionner l'information pertinente issue

de l'image SONAR afin de la rendre plus facilement exploitable. Cette première analyse s'appelle la segmentation, et consiste à produire une partition de l'image initiale en régions possédant certaines caractéristiques d'homogénéité et correspondant aux différentes composantes de la scène. En chacun des pixels, cette phase de détection décidera de l'appartenance ou non du pixel traité à une classe prédéfinie. Pour une image SONAR, ces zones d'intérêt sont au nombre de trois :

- Une zone constituée par l'*écho* des différents objets reposant sur le fond marin et pour laquelle la réverbération a une intensité forte. Néanmoins, pour une image issue d'un SONAR classificateur, cet écho est faible, souvent inexistant, et donc peu discriminant.
- Une zone très caractéristique de la forme géométrique des objets et que l'on qualifie d'*ombre*. Cette zone résulte de l'absence de réverbération du signal SONAR (et correspond en fait à la zone qui est masquée acoustiquement par les différents objets reposant sur les fonds marins).
- Une zone appelée *réverbération de fond* qui correspond à la réverbération du signal SONAR sur le fond marin.

Toutefois, les résultats obtenus par les traitements "classiques" de segmentation (seuillages de l'image, suivis d'opérations simples de morphologie mathématique) ne sont généralement pas satisfaisants en raison de la présence d'un fort bruit de speckle inhérent aux images SONAR. Les formes d'ombres obtenues après cette segmentation sont parfois éloignées de leurs formes effectives. Ce résultat est lié aux principes de ce type d'approche. En effet, le traitement de chaque pixel y est souvent réalisé de façon indépendante. De plus les processus physiques de formation de l'image SONAR ne sont généralement pas pris en compte.

Pour l'étape de classification, une solution simple consiste à extraire des attributs pertinents permettant de caractériser la forme de l'ombre (attributs statistiques, géométriques, ...), et à exploiter ces informations comme entrées d'un classifieur quelconque de manière à identifier les différentes classes recherchées. Cette solution est classique en reconnaissance des formes. Néanmoins elle reste largement dépendante de l'étape d'extraction des caractéristiques pour laquelle il n'existe pas de règles absolues pour déterminer le nombre optimal d'attributs ainsi que le caractère discriminant de ceux-ci. Remarquons aussi que l'ombre portée que l'on cherche à classer peut être modifiée par l'ombre portée de cailloux, l'ombre portée d'une dune ou l'ombre portée créée par des rides de sable. Avec cette méthode, les attributs statistiques de cette ombre portée s'en trouvent particulièrement altérés et des erreurs de classification importantes peuvent en découler. Nous devons donc trouver une autre approche moins sensible à ce phénomène.

Dans notre application, certaines propriétés, locales ou globales, liées aux informations que l'on cherche à obtenir (carte de segmentation dans une première étape, puis la classe associée à chaque ombre portée), peuvent être prises en compte et intégrées dans un modèle statistique incluant aussi les processus physiques de formation de l'image SONAR. En particulier, les bruits multiples intervenant dans les différentes étapes du processus de formation de l'image doivent être appréhendés. A cette fin, la théorie bayésienne de la décision ou de l'estimation fournit un cadre méthodologique unifié et bien maîtrisé permettant d'intégrer et de faire coopérer, au sein d'un même modèle statistique ces connaissances *a priori* sur ces primitives (ou étiquettes) et cette description physique du lien unissant les observations aux primitives.

- Dans le cas d'une segmentation, ces connaissances *a priori* sur les propriétés des primitives recherchées sont locales. Elles permettent d'exprimer simplement le fait que les pixels voisins doivent

avoir un niveau de gris similaire et être situés dans la même région. Une telle régularité est facilement modélisée par les champs de Markov. Placée dans le contexte de l'estimation bayésienne, la recherche de l'image segmentée se réduit à un problème d'optimisation globale. Ce problème reste néanmoins difficile dans la mesure où les fonctions d'énergie à minimiser sont complexes, généralement non linéaires, et dépendent d'un nombre considérable de variables. De plus, afin de rendre cette procédure automatique ou non supervisée, il est nécessaire d'estimer un certain nombre de paramètres caractérisant le modèle. A cette fin, la première partie de ce travail de thèse a été consacrée à l'**estimation** des paramètres du modèle markovien définis pour la segmentation non supervisée des images SONAR en deux classes, *ombre/réverbération*. Nous avons comparé plusieurs types de modélisation du bruit en imagerie SONAR [6, 11], et proposé un modèle de bruit reposant sur un mélange de lois de Weibull [1, 6]. Ce modèle de bruit s'est avéré très proche de la physique du phénomène observé, et plus juste, au sens du critère du χ^2 et de la distance de Kolmogorov, qu'une modélisation reposant sur les lois de Gauss ou de Rayleigh [9]. Contrairement aux algorithmes classiques d'estimation EM ou SEM, l'algorithme ECI (Estimation Conditionnelle Itérative) permet une estimation efficace des paramètres associés à ce type de modélisation. Une solution originale au problème de l'initialisation de cet algorithme d'estimation itératif à été présentée [8]. Cette méthode basée sur l'algorithme des K -moyennes permet d'obtenir une bonne initialisation des paramètres du modèle de bruit et assure une convergence rapide et efficace de la procédure ECI [2]. Une méthode d'estimation permettant d'estimer conjointement les paramètres du modèle du bruit et les paramètres du modèle du champ d'étiquettes dans une même procédure d'estimation conditionnelle itérative a alors été proposée. Cette dernière permet d'estimer les paramètres au sens du MV (Maximum de Vraisemblance) pour le modèle du bruit et au sens des moindres carrés pour le modèle du champ d'étiquettes. Les tests sur images SONAR synthétiques et réelles sont venus confirmer l'intérêt de cet algorithme qui permet d'obtenir une estimation plus juste, au sens de la distance de Kolmogorov et du critère du χ^2 , de ces paramètres qu'une estimation non jointe. La précision des estimations obtenues ainsi que la convergence rapide de cette procédure, observée dans tous les cas testés, a permis ensuite d'envisager une segmentation non supervisée en deux classes [6].

La deuxième partie de ce travail a porté sur la **segmentation** des images SONAR. Nous avons testé les algorithmes classiques monoéchelles existants. Nous avons vu que ceux-ci étaient, soit très rapides et sous-optimaux, soit relativement efficaces mais aussi très coûteux en temps de calcul. Nous nous sommes donc intéressés aux techniques déterministes, plus récentes, qui associent une représentation statistique de l'image et une hiérarchisation de l'information. Nous avons montré que les méthodes hiérarchiques permettaient d'obtenir des améliorations, quant à la qualité de l'estimation et à la rapidité de l'algorithme, d'autant plus importantes que la fonction d'énergie que l'on cherche à minimiser est complexe. Nous avons défini un modèle hiérarchique spécifiquement adapté à notre application et associé à un système de voisinage spatial et causal en échelle. Il s'agit d'un modèle non isotrope, pour lequel a été développée une stratégie de minimisation multigrille. Le modèle global, baptisé MCE pour Multigrille Causal en Échelle [5, 7] s'est avéré particulièrement robuste, comparativement aux autres méthodes hiérarchiques existantes, pour la segmentation des images SONAR présentant un bruit de speckle important. Nous avons vu que l'estimation des paramètres de ce modèle peut être réalisée efficacement et sans augmenter de façon trop importante le temps de calcul par la généralisation de l'estimateur proposé par Derin *et al.*

Nous avons enfin proposé une démarche originale pour segmenter une image SONAR en trois classes (*ombre/ réverbération de fond/écho*). Cette méthode tient compte du nombre peu élevé de pixels associés à la classe *écho*. Elle exploite les résultats issus d'une première segmentation MCE en deux classes. Le modèle utilisé tient compte de la vraisemblance des observations et

intègre des informations *a priori* à différents niveaux de représentation (niveaux pixel et région). Les expérimentations sur des images SONAR synthétiques et réelles ont confirmé tout l'intérêt de ce modèle [6].

- En ce qui concerne le problème de **classification**, les connaissances *a priori* sur les propriétés des primitives recherchées sont globales. Elles permettent de traduire le fait que, contrairement à un objet naturel, un objet manufacturé est *a priori* constitué d'un assemblage d'éléments de formes géométriques simples. Ces objets se traduisent sur l'image SONAR par la présence d'ombres dont les contours présentent des segments de droite. Dans le cas d'un objet de formes géométriques simples (objet cylindrique par exemple), l'ombre portée est un parallélogramme théoriquement parfait. Dans le cas d'un objet sphérique, l'ombre portée reste très caractéristique et se traduit par une sorte d'ellipse. Contrairement aux objets manufacturés, l'ombre créée par des rochers ou des cailloux est chahutée et de forme aléatoire. Cette connaissance *a priori* globale peut être décrite efficacement par un modèle statistique représentatif de l'ombre portée de la classe d'objet que l'on cherche à détecter. A cette fin, l'approche originale adoptée dans la troisième partie de cette thèse utilise les modèles statistiques et repose à nouveau sur une formulation bayésienne du problème. Elle comprend la définition d'une forme prototype à laquelle sont appliquées des déformations géométriques linéaires. La vraisemblance des observations utilise des informations extraites d'une segmentation MCE non supervisée. Dans ce cadre, le problème de la classification d'un objet est équivalent à un problème d'estimation bayésienne des paramètres de déformation du modèle. Cette estimation conduit à la minimisation d'une fonction d'énergie globale non linéaire. Cette minimisation est réalisée dans notre application par une procédure d'optimisation génétique associée à une technique d'exploration locale par descente du gradient, et à un facteur de décroissance en température [3, 10]. Le minimum obtenu par cette procédure d'optimisation permet ensuite de classer l'objet détecté comme faisant partie ou non de la classe d'objet considérée *a priori*. Le cadre de modélisation retenu et les solutions algorithmiques introduites dans cette partie sont suffisamment générales pour s'appliquer à une large classe de déformations et d'objets, permettant d'envisager son extension à d'autres applications en reconnaissance des formes. Nous avons illustré cette partie avec de nombreux résultats expérimentaux, attestant la validité et l'intérêt de la méthode proposée. En particulier, les résultats montrent que cette technique reste efficace lorsque l'ombre portée, que l'on cherche à classer, est partiellement occultée par l'ombre portée d'autres objets comme des cailloux ou des rides de sable. Dans ces cas, l'énergie finale après minimisation est un peu plus élevée que celle obtenue sans occultation, mais reste assez significative, c'est-à-dire assez faible pour un objet appartenant à la classe d'objet considérée et assez élevée dans le cas contraire, pour rendre une classification adéquate. Néanmoins, dans la perspectives de consolider cette phase d'identification des ombres portées, l'information sur la texture du fond marin peut se révéler utile. Ceci à fait l'objet de la dernière partie de cette thèse.

Dans la quatrième partie, nous avons proposé en effet un modèle statistique global pour la segmentation et la classification des fonds marins en imagerie SONAR. L'approche originale adoptée s'appuie sur une analyse des formes d'ombres que produit chaque type de fond. Un modèle markovien permet de spécifier, d'une part, les propriétés d'homogénéité de la carte de segmentation recherchée, et d'autre part d'exprimer la vraisemblance des observations par un module de décision floue. Dans ce cadre, le problème de la segmentation d'une image SONAR et de la classification des fonds marins est équivalent à un problème d'estimation bayésienne et conduit à la minimisation d'une fonction d'énergie, résolue par un algorithme de relaxation déterministe. Les résultats obtenus sur des images SONAR réelles présentant des fonds marins de toute nature, mettent en avant la pertinence de l'approche proposée [4].

Placés dans le contexte de l'estimation bayésienne, et de la recherche du MAP (Maximum A Posteriori), chacun de ces problèmes de segmentation ou de classification conduit à la minimisation d'une fonction d'énergie non linéaire, non convexe, plus ou moins complexe, discrète ou continue, et associée à un nombre plus ou moins important de variables. Selon le type de fonction à minimiser, la stratégie d'optimisation optimale¹ que l'on doit utiliser est différente. Elle est quelquefois déterministe, monoéchelle dans le cas de l'ICM ou hiérarchique pour la technique multigrille, ou stochastique pour ce qui est de l'algorithme génétique. La contribution essentielle de ce travail est d'avoir défini, pour les différentes étapes de cette chaîne de traitement, un modèle statistique reposant sur une formulation bayésienne, et d'avoir proposé un algorithme de relaxation permettant de minimiser la fonction d'énergie associée à chacun de ces modèles.

Références

- [1] C. Collet, P. Thourel, M. Mignotte, P. Bouthemy, and P. Pérez. Une nouvelle approche en traitement d'images sonar haute résolution : la segmentation markovienne hiérarchique multimodèle. *Traitement du Signal, à paraître en juin 98*.
- [2] P. Galerne, M. Mignotte, K.C. Yao, C. Collet, and G. Burel. Unsupervised segmentation using a Kohonen SOM and a noise model estimation in sonar imagery. *Pattern Recognition, soumis*.
- [3] M. Mignotte, C. Collet, P. Pérez, and P. Bouthemy. Hybrid genetic optimization and statistical model-based approach for the classification of shadow shapes in sonar imagery. *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, soumis*.
- [4] M. Mignotte, C. Collet, P. Pérez, and P. Bouthemy. Seafloor classification using Markov random field and fuzzy logic. *IEEE Trans. on Journal of Oceanic Engineering, soumis*.
- [5] M. Mignotte, C. Collet, P. Pérez, and P. Bouthemy. Sonar image segmentation using an unsupervised hierarchical MRF model. *IEEE Trans. on Image Processing, soumis*.
- [6] M. Mignotte, C. Collet, P. Pérez, and P. Bouthemy. Three-class Markovian segmentation of high resolution sonar images. *Computer Vision and Image Understanding, soumis*.
- [7] M. Mignotte, C. Collet, P. Pérez, and P. Bouthemy. Unsupervised Hierarchical Markovian segmentation of sonar images. In *4th IEEE International Conference on Image Processing*, Santa Barbara, Californie, USA, Oct. 1997.
- [8] M. Mignotte, C. Collet, P. Pérez, and P. Bouthemy. Unsupervised Markovian segmentation of sonar images. In *22nd IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, volume 4, pages 2781–2785, Munich, May 1997.
- [9] M. Mignotte, C. Collet, P. Pérez, and P. Bouthemy. Unsupervised segmentation applied on sonar images. In *Proc. International Workshop EMMCVPR'97: Energy Minimisation Methods in Computer Vision and Pattern Recognition*, volume LNCS 1223, pages 491–506, Venise, May 1997. Springer-Verlag.
- [10] M. Mignotte, C. Collet, P. Pérez, and P. Bouthemy. Statistical model and genetic optimization: application to pattern detection in sonar images. In *23rd International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, volume 5, pages 2741–2745, Seattle, May 1998.

1. en terme de simplicité, de coût calculatoire et d'efficacité.

- [11] F. Schmitt, M. Mignotte, C. Collet, and P. Thourel. Estimation of noise parameters on sonar images. In *Conf. Signal and Image Processing*, volume SPIE 2823, pages 1–12, Denver, Colorado, USA, Aug. 1996.