Sujet de stage de fin d'étude (M2) :

Polarisation des Echos Radar du Fouillis d'Océan - Méthode d'Analyse physiCo-Statistique (PERFO-MACS)

Encadrants : Arnaud Coatanhay (ENSTA), Thomas Bonnafont (DGA), Adrien Gilliot (Thales DMS) et Yoan Veyrac (Thales DMS)

Localisation : **ENSTA, Campus de Brest, France**

Contacts : arnaud.coatanhay@ensta.fr, thomas.bonnafont.enac@gmail.fr

Période approximative du stage : entre février et septembre 2027

1 Contexte et domaines scientifiques étudiés

En parallèle d'une thèse menée à **Thales DMS France** depuis 2024, le **micro-projet PERFO-MACS** consiste à orienter la modélisation et les traitements de détection radar polarimétrique pour de la surveillance maritime, en proposant une approche physico-probabiliste ad hoc. L'objectif général de ce projet est d'**améliorer la modélisation physique des échos de mer observés par un radar polarimétrique**. Ainsi, l'objectif de ces travaux préliminaires est double :

1. *Contribuer aux études préliminaires de traitements de détection polarimétrique, en l'absence de données réelles suffisantes*
2. *Apporter de l'interprétabilité physique lors de l'exploitation des futures données réelles*

Les technologies de radar polarimétrique existent depuis plusieurs décennies, mais leurs applications se limitent pour l'instant en majorité à l'imagerie SAR (Synthetic Aperture Radar) [1] d'une part (cf. Figure 1), et à la météorologie d'autre part. Ces deux domaines ont mené à des formalismes spécifiques adaptés aux applications susnommées, avec la mise en place de métriques dédiées à l'analyse de l'occupation des sols ou celle des hydrométéores [1].
La nouvelle génération de radar de Thales DMS va intégrer une capacité polarimétrique qui permettrait une meilleure détection. Cependant, même si l'état de l'art sur la segmentation d'image par polarimétrie, cf. Figure 1, est très fourni, celui pour la détection de cible par radar polarimétrique est beaucoup plus restreint.
En effet, des modèles physiques simples permettent d'anticiper l'**apport de la polarimétrie en détection radar Air/Mer**. En effet, les échos de mer suivent une distribution statistique à "queue lourde", traduisant le fait qu'il est vraisemblable d'observer des **échos de mer anormalement puissant**. Ces échos puissants sont appelés "**spikes**" dans la littérature, et proviennent le plus souvent d'échos multi-trajet constructifs, tel que schématisé en Figure 2 [2]. Au vu de leur niveau de rétrodiffusion élevé, ces "spikes" peuvent être facilement **interprétables comme étant des cibles réelles**.

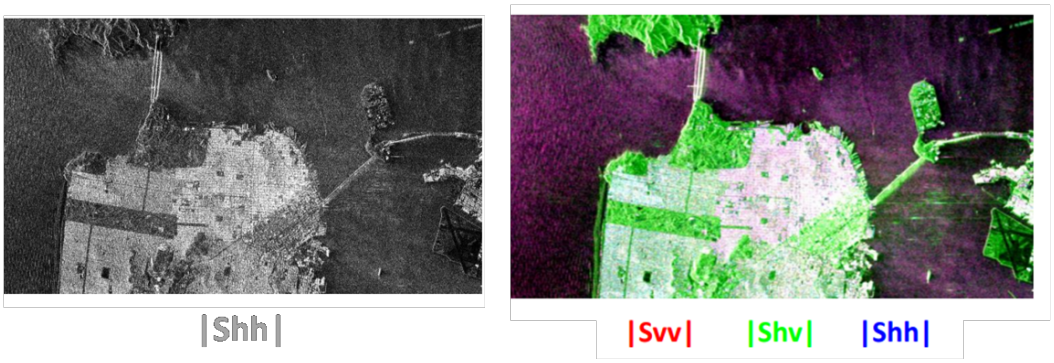


Figure 1: Image SAR de la baie de San Francisco en mono-polarisation (gauche) et multi-polarisation (droite) (base de données AIRSAR NASA). Usuellement, "H" (respectivement "V") signifie que le champ électrique de l'onde est polarisé dans le plan Horizontal (resp. Vertical). "HH" signifie donc émission en H et réception en H.

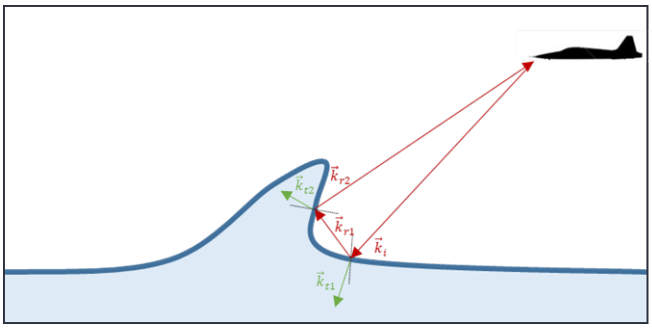


Figure 2: Géométrie engendrant des échos multi-trajet constructifs

Cependant, en manipulant *les coefficients de Fresnel* pour l'interface Air/Eau, l'état de l'art met en évidence l'existence de l'*angle de "Brewster"*. Dans ce cas l'onde électromagnétique sera totalement transmise au milieu marin, n'engendrant donc aucune réflexion en surface. Cet angle de transmission total n'existe que lorsque le champ électrique oscille dans le plan orthogonal à l'interface (Polarisation TM ou V). Ainsi, on remarque qu'en fonction des polarisations en émission et réception, le comportement des "spikes" est différents, soit une rétrodiffusion anormalement forte en HH, soit au contraire très peu puissante en VV. On voit donc que **la polarisation est une diversité importante** dans ces scénarios.
Pour des géométries éloignées de celle de "Brewster", il est plus difficile d'anticiper le **coefficient de corrélation polarimétrique** des "spikes", et il est donc raisonnable de considérer qu'il pourra prendre n'importe quelle valeur. Les **cibles suffisamment complexes sont-elles non polarisantes** (i.e. engendrera des échos ayant la même puissance moyenne en HH qu'en VV). On considère dans ce cas que **la corrélation polarimétrique est nulle**. **L'analyse de la corrélation polarimétrique peut donc être un outils de discrimination entre un "spike" et une cible** en particulier dans des géométries proche de l'angle de Brewster [3].
Cependant, à ce jour, les modèles probabilistes de fouillis de mer ne renseignent pas sur les relations de dépendance statistiques existant entre canaux HH et VV, i.e. *quelle copule [4] (lien de corrélation statistique) choisir pour modéliser cette dépendance ?* [3]. La rareté des données réelles polarimétriques disponibles ne permet pas non plus de modéliser ces dépendances statistiques par des modèles empiriques.

Le but de ce micro-projet est donc de tenter de lever le voile sur une possible corrélation polarimétrique du fouillis de mer et sa nature. En somme de savoir si l'on est plutôt à gauche ou à droite de la Figure 3. Cela permettra à Thales DMS de mettre ensuite en place les stratégies de détection optimale.

Pour prédire numériquement la réponse d'une surface de mer au champ électromagnétique, les méthodes rigoureuses reposent sur

1. Modélisation 3D de surface de mer (ex. : via spectre d'Elfouhaily [5])

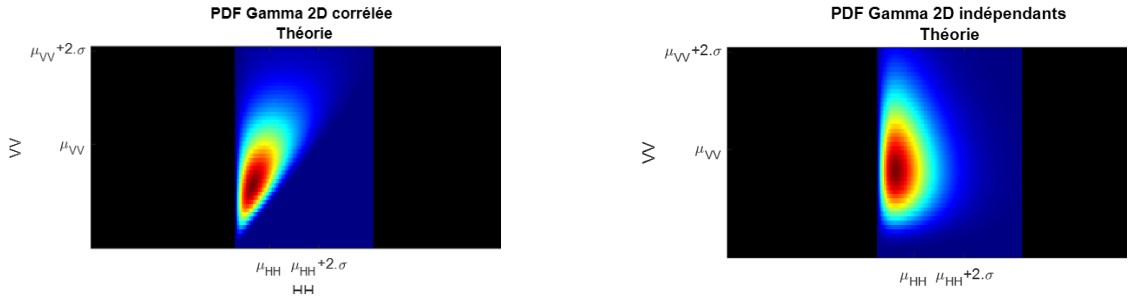


Figure 3: Exemple de distribution d'observations polarimétriques de texture du fouillis de mer sous hypothèses d'indépendance (gauche) et de corrélation positive forte (droite).

2. Propagation électromagnétique d'échos radar par approches numériques (ex. : équation intégrale résolue par la méthode des moments [6])

Nous appliquerons ensuite une méthode de Monte-Carlo afin de calculer les statistiques des échos de mer, et donc de mettre au point des premiers modèles de corrélation polarimétriques. En fonction des résultats et de l'avancée de ce micro-projet d'autres stratégies physico-statistiques pourront être explorées afin de réduire le temps de calcul par exemple [7, 8].

Plus en détails, les différents objectifs s'articuleront comme suit :

- État de l'art général sur la propagation et réflexion des ondes EM, en particulier à l'interface air/mer (polarisation, angle de Brewster, etc) ainsi que sur les méthodes numériques en diffusion électromagnétique (équation intégrale et méthode des moments).
- État de l'art sur la modélisation de diffusion EM sur une surface de mer (spectre de mer, etc.)
- Développement d'une méthode numérique pour obtenir les coefficients de rétrodiffusion d'une surface de mer en fonction de l'angle d'incidence, état de mer et polarisation du champ. En fonction de la taille des scènes et des temps de calculs mise en jeux des méthode d'accélération seront mise en place type FAFFA [9] ou compression [10, 11, 12].
- Implémentation de la méthode de Monte-Carlo afin de quantifier l'effet statistique de l'état de mer et de la polarisation sur le champ rétro-diffusé.

Si ces différents objectifs sont remplis avant la fin du stage, des pistes d'amélioration sont envisageables, comme :

- L'adaptation de la méthode [8] à la rétro-diffusion par la mer; permettant des calculs directs des statistiques,
- L'accélération de la partie statistique par des méthodes avancées comme le Kriging [13] ou l'expansion en chaos polynomial [14],
- Accélaration de la représentation des états de mer par level-set [15],
- Appliquer les travaux de [7] dans ce contexte,
- Participer au traitement statistique et la chaine d'émission du radar polarimétrique, i.e. *dans quelle ordre émettre les différentes polarisations ?*

2 Compétences développées et profil recherché

Au cours de ce stage, l'étudiant·e développera des compétences en mathématiques appliquées, notamment méthodes numériques pour la physique, ainsi qu'en programmation, statistique et en modélisation électromagnétique.

Le ou la candidat·e doit être issu·e d'une formation M2 (université ou école d'ingénieur) en électromagnétique, acoustique, mécanique, et/ou mathématiques appliquées.
Dans le cadre de ce stage, des connaissances en électromagnétique, acoustique, et/ou méthodes numériques pour la résolution des EDPs sont attendues. Il n'est pas demandé une parfaite maîtrise de l'intégralité de ces sujets, mais il est indispensable que le·la candidat·e soit familier·ère avec certaines de ces notions. Un bon niveau d'anglais et/ou français et de bonnes compétences de rédaction sont de plus souhaités.

Les questions et candidatures (CV et lettre de motivation) sont à adresser à Thomas Bonnafont (thomas.bonnafont.enac@gmail.co et Arnaud Coatanhay (arnaud.coatanhay@ensta.fr).

References

[1] Y. Yamaguchi, *Polarimetric SAR imaging: theory and applications*. CRC Press, 2020.

[2] S. Watts and L. Rosenberg, "Challenges in radar sea clutter modelling," *IET Radar, Sonar & Navigation*, vol. 16, no. 9, pp. 1403–1414, 2022.

[3] R. Leduc, A. Giremus, E. Grivel, A. Gilliot, Y. Veyrac, and V. Corretja, "Apport des copules pour améliorer la détection de cibles à l'aide d'un radar polarimétrique,"

[4] Wikipedia, "Copule (wikipedia)," 2026. `https://fr.wikipedia.org/wiki/Copule_(math%C3%A9matiques)` [Consulté le : 23/10/2026].

[5] T. Elfouhaily, B. Chapron, K. Katsaros, and D. Vandemark, "A unified directional spectrum for long and short wind-driven waves," *Journal of Geophysical Research: Oceans*, vol. 102, no. C7, pp. 15781–15796, 1997.

[6] A. Coatanhay and Y.-M. Scolan, "Adaptive multiscale moment method applied to the electromagnetic scattering by coastal breaking sea waves," *Mathematical Methods in the Applied Sciences*, vol. 38, no. 10, pp. 2041–2052, 2015.

[7] C. J. Roussel, A. Coatanhay, and A. Baussard, "Forward and backward probabilistic inference of the sea clutter," *Waves in Random and Complex Media*, vol. 29, no. 3, pp. 540–568, 2019.

[8] V. Blakaj, S. C. Creagh, G. Gradoni, and G. Tanner, "Reflection from random surfaces–a wigner function approach," *Wave Motion*, p. 103737, 2026.

[9] C. Brennan, D. Trinh, V. Pham, M. Condon, and R. Mittra, "Full-wave analysis of electromagnetic wave propagation over terrain using the improved tabulated interaction method," *Radio Science*, vol. 50, no. 5, pp. 355–364, 2015.

[10] S. Kurz, O. Rain, and S. Rjasanow, "Fast boundary element methods in computational electromagnetism," in *Boundary Element Analysis: Mathematical Aspects and Applications*, pp. 249–279, Springer, 2007.

[11] K. Maeda, H. Shibata, H. Kawaguchi, and S. Itasaka, "Mpi parallel scheme of 3-d time domain boundary element method with crs matrix compression," *IEEE transactions on magnetics*, vol. 50, no. 2, pp. 533–536, 2014.

[12] R. Li, Y. Liu, and W. Ye, "A fast direct boundary element method for 3d acoustic problems based on hierarchical matrices," *Engineering Analysis with Boundary Elements*, vol. 147, pp. 171–180, 2023.

[13] S. Kasdorf, J. J. Harmon, and B. M. Notaroš, "Kriging methodology for uncertainty quantification in computational electromagnetics," *IEEE Open Journal of Antennas and Propagation*, vol. 5, no. 2, pp. 474–486, 2024.

[14] S. Marelli and B. Sudret, "Uqlab user manual–polynomial chaos expansions," *Chair of risk, safety & uncertainty quantification, ETH Zürich, 0.9-104 edition*, pp. 97–110, 2015.

[15] K. Nakamoto, H. Isakari, T. Takahashi, and T. Matsumoto, "Acceleration of a multi-objective topology optimisation in 2d electro-magnetic field based on the level-set method and the boundary element method by the-h matrix method," *International Journal of Computational Methods and Experimental Measurements*, vol. 5, no. 5, pp. 686–695, 2017.