

ASSIMILATION DE DONNÉES ACOUSTIQUES : SUIVI DU FRONT D'OUessant

par Olivier Carrière ⁽¹⁾, Jean-Pierre Hermand ⁽¹⁾ et Yann Stéphan ⁽²⁾

RÉSUMÉ

La prédiction et la modélisation des océans nécessitent d'importantes mesures satellites et hydrographiques pour fournir des résultats précis et valides, via des méthodes d'assimilation. En environnement côtier, cette tâche est rendue plus complexe à cause du couplage fort entre les variables d'état et le forçage, le manque de données et les fréquentes ruptures de modèle. En outre, dans la région d'Ouessant, la couverture nuageuse rend fréquemment impossible l'utilisation des mesures satellites. La tomographie acoustique peut fournir des mesures complémentaires, dans des échelles temporelles et spatiales utiles pour la modélisation régionale. Dans ce contexte, le présent travail développe une approche d'assimilation de données acoustiques, basée sur les filtres de Kalman utilisant un modèle de structure pour paramétrer le front thermique d'Ouessant. Les résultats de simulation montrent qu'une telle approche pourrait permettre de suivre acoustiquement la position du front, lorsqu'il est présent.

ABSTRACT

Ocean modeling and forecasting require significant hydrographic and satellite measurements to provide accurate and valid results through assimilation methods. In coastal environment, this task is made more complex because of the strong coupling between state variables and forcing, the lack of data and the frequent model break. In addition, in the region of Ushant, cloud cover often makes it impossible to use satellite measurements. Acoustic tomography can provide complementary measures in time and space scales relevant to regional modeling. In this context, this paper develops an approach to acoustic data assimilation based on Kalman filters using a feature model to parameterize the thermal front of Ushant. The simulation results show that this approach could acoustically track the front position, when present.

⁽¹⁾ Environmental Hydroacoustics Lab., OPERA-Acoustics Dept. Université libre de Bruxelles (U.L.B.), avenue Franklin D. Roosevelt, 50 - CP 194/05 - 1050 Brussels, Belgium. (Email : ocarrier.jhermand@ulb.ac.be)

⁽²⁾ SHOM, 13 rue du Chatellier, CS92803, 29228 Brest Cedex 2, France. (Email : yann.stephan@shom.fr)

1. INTRODUCTION

L'étude et la surveillance des zones côtières sont essentielles dans la compréhension et la gestion des environnements marins, du point de vue environnemental comme du point de vue économique. Le rail d'Ouessant constitue l'un des couloirs de navigation les plus empruntés au monde, avec une moyenne de cent cinquante bateaux par jour. Dans cette zone se développe chaque année, entre avril et octobre, un front thermique qui affecte l'activité biologique et la pêche. Etant donnée la couverture nuageuse régulière dans cette région, la surveillance de ce front nécessite des moyens de mesure alternatifs à l'observation satellitale. Ce travail propose une méthode de suivi basée sur des techniques de tomographie acoustique, permettant de surveiller l'évolution de la position du front au cours du temps.

Le front d'Ouessant se développe à cause du fort mélange de marée qui opère à proximité de la côte. Il oppose ainsi les eaux homogènes côtières aux eaux stratifiées au large. Sa dynamique est élevée, le front pouvant se déplacer de plusieurs dizaines de kilomètres et générant de nombreux méandres. La différence de température de surface est typiquement de l'ordre de 3 - 4° C. La présence d'un front, de même que le relief côtier, affecte fortement la propagation acoustique [1] - [3]. Le front étant défini par les deux profils de température qui s'opposent, ainsi que par l'étendue de la zone de transition entre les deux régions, il semble opportun d'étudier la possibilité d'inverser des mesures de propagation acoustique au travers du front pour en estimer les paramètres structuraux.

L'assimilation de mesures acoustiques dans des modèles océaniques fut suggérée dans les années 90 (voir, par exemple, [4] ou [5]). Depuis, de nombreux travaux étudient cette problématique [6] - [9], mais principalement avec des méthodes de tomographie basées sur les temps de parcours. Malheureusement, de telles grandeurs ne sont pas toujours observables dans les environnements de faible profondeur, pour des raisons de résolution et d'identification des arrivées. Pour palier cet inconvénient, il est possible de développer des méthodes d'assimilation de mesures plein champ, utilisant des filtres de Kalman non linéaires [10]. Utilisant la même approche, ce travail s'oriente vers le suivi de structures océaniques spécifiques (ici, un front thermique). Pour ce faire, un modèle de structure [3] constitue le schéma du paramétrage de l'environnement, en construisant le front à partir d'équations mathématiques simples.

Le papier s'organise de la façon suivante. La section 2 présente l'approche utilisée dans ce travail, avec une brève description du modèle de structure, suivie par la définition du modèle espace - état pour l'estimation séquentielle de l'état du front thermique par tomographie acoustique. La section 3 présente ensuite un résultat de suivi séquentiel, avec deux algorithmes de filtrage de Kalman non linéaires. La section 4 conclut le papier.

2. APPROCHE

La tomographie acoustique, ou plus généralement, le problème inverse en acoustique sous-marine peut-être reformulé comme un problème d'assimilation de données [11]. Dans

le cas présent, cette reformulation permet d'introduire naturellement la notion de suivi dans le temps de l'évolution des paramètres environnementaux. Différentes catégories de méthodes d'assimilation de données existent, et le choix de l'une d'elles dépend généralement de l'application. Après avoir défini un modèle espace - état (voir ci-dessous), l'implémentation d'un filtre de Kalman s'avère relativement simple, et les récents développements dans le filtrage de modèle non linéaire permettent d'envisager son application pour la tomographie acoustique basée sur des mesures plein champs.

2.1 Modèle de structure

La première étape dans un problème inverse est la définition du modèle décrivant le système que l'on veut inverser. Des modèles numériques du front d'Ouessant existent (avec ROMS [12], MARS [13] ou HYCOM [14]). Cependant, l'assimilation de données acoustiques au sein de modèles océanographiques peut s'avérer complexe, notamment à cause des différences de grille de discrétisation. Dans ce travail, le modèle de front est formulé à partir de fonctions mathématiques simples, permettant d'isoler les processus liés au front qui ont un impact fort sur la propagation acoustique. Ce modèle de structure (*feature model*, en anglais) s'inspire directement de [3], et décrit le champ de température $F(r,z)$ dans une tranche verticale de l'environnement, au travers du front :

$$\text{eq 1} \quad F(r, z) = F_c(z) + \frac{F_h(z) - F_c(z)}{1 + e^{-2(r-r_0)/L}},$$

où $F_c(z)$ et $F_h(z)$ sont respectivement les profils de température dans la partie froide (homogène, côtière) et la partie chaude (stratifiée, au large), L est le quart de longueur du front, et r_0 la position centrale du front, définie par le maximum du gradient de température. La figure 1 illustre un champ de température typique obtenu avec ce modèle, avec un fond plat à 130 m de profondeur. Dans ce travail, les profils de température sont paramétrés par trois EOF (*Empirical Orthogonal Function*, voir [15]), pour le profil chaud, et la valeur de l'isotherme, pour le profil froid. Le front est donc décrit par six paramètres structuraux.

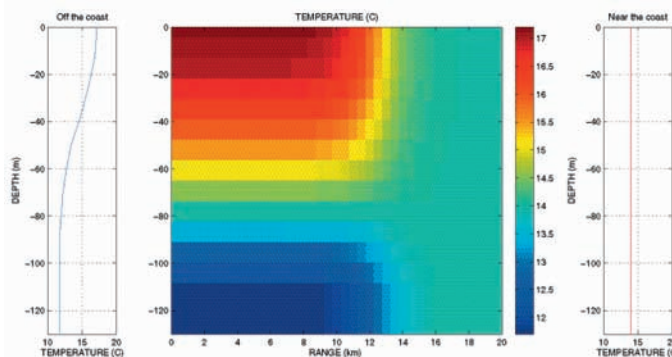


Figure 1 : Exemple de champ de température (°C) construit à l'aide du modèle de structure. La position centrale est de 10 km et le quart de longueur L de 2 km.

2.2 Modèle espace-temps et filtrage de Kalman

Les paramètres du front constituent le vecteur d'état x , auquel on associe un modèle dynamique A décrivant l'évolution de ce vecteur au cours du temps. Considérant des mesures peu espacées dans le temps, on suppose ici un modèle de marche aléatoire pour les paramètres de l'environnement, caractérisée par un terme de bruit gaussien w de moyenne nulle et de covariance R_{ww} :

$$\text{eq 1 } x(t_k) = A[x(t_{k-1})] + w(t_k) \quad \text{[transition].}$$

A chaque état de l'environnement est associé un vecteur de mesure y , lié au vecteur d'état par le modèle de mesure C , auquel on ajoute un terme de bruit gaussien v , englobant bruit additif sur les mesures et incertitudes de modèle (qui peuvent être introduites à la fois par le modèle de structure et par le modèle de propagation acoustique), de moyenne nulle et de covariance R_{vv} :

$$\text{eq 2 } y(t_k) = C[x(t_k)] + v(t_k) \quad \text{[mesure].}$$

Ce modèle espace - état défini, on peut facilement appliquer un filtre de Kalman pour exprimer la meilleure estimation (au sens de la variance minimale) du vecteur d'état X pour des mesures données y , au temps t_k , que l'on peut écrire formellement comme¹ :

$$\text{eq 3 } \hat{x}(t_k) = A\hat{x}(t_{k-1}) + K(t_k)[y(t_k) - CA\hat{x}(t_{k-1})],$$

où le gain de Kalman $K(t_k)$ dépend des matrices de covariance des vecteurs x et y et de l'estimation de l'incertitude associée à x . La figure 2 illustre la forme séquentielle du filtrage, et ses différents modules. Plus de détails sur les filtres de Kalman peuvent être trouvés, par exemple, dans [16].

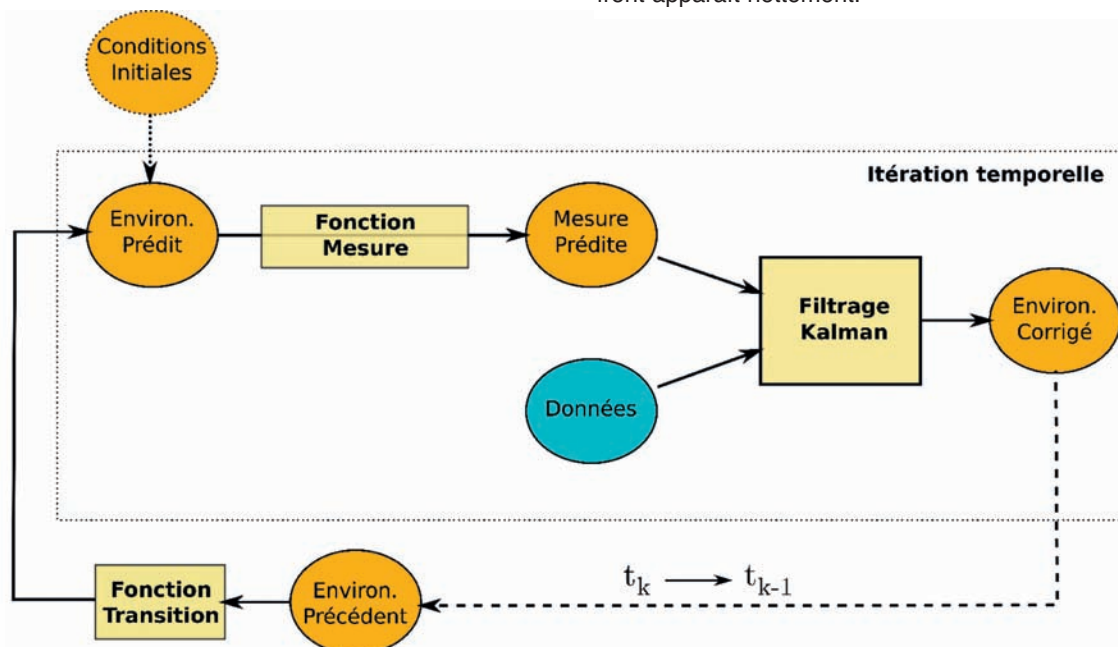


Figure 2 : Schéma d'une séquence de filtrage de Kalman. L'algorithme opère en deux étapes, la première de prédiction, la seconde de correction, où intervient le gain qui pondère la différence entre les données et la prédiction de celles-ci.

¹Cette forme matricielle n'a de sens que dans le cas d'un modèle linéaire ou linéarisé (*Extended Kalman filter*, ou EKF). Les filtres de Kalman non linéaires plus avancés, tels que l'*Unscented Kalman filter* (UKF) ou l'*Ensemble Kalman filter* (EnKF), utilisent toutefois un schéma similaire, mais faisant intervenir les fonctions de mesure et de transition non linéaires sur des ensembles statistiques de vecteurs.

3. RÉSULTATS

Afin de tester le potentiel du suivi séquentiel de la position du front par tomographie acoustique, un scénario environnemental réaliste est obtenu à partir d'une simulation HYCOM de la mer d'Iroise. Pour le modèle acoustique, une source est placée au large, à 5 m de profondeur pour représenter la profondeur typique du centre acoustique du bruit d'un bateau et une antenne de 16 hydrophones est considérée à proximité de la côte, entre 30 et 60 mètres de profondeur. Les trois fréquences utilisées, à savoir 200 Hz, 400 Hz et 600 Hz, sont représentatives des lignes spectrales que l'on peut trouver dans le spectre de bruit de bateaux. Seule l'amplitude du champ de pression acoustique est assimilée au sein du filtre. La distance entre source et récepteurs est d'approximativement 26 km. La figure 3 illustre le positionnement de la radiale acoustique dans la zone d'Ouessant.

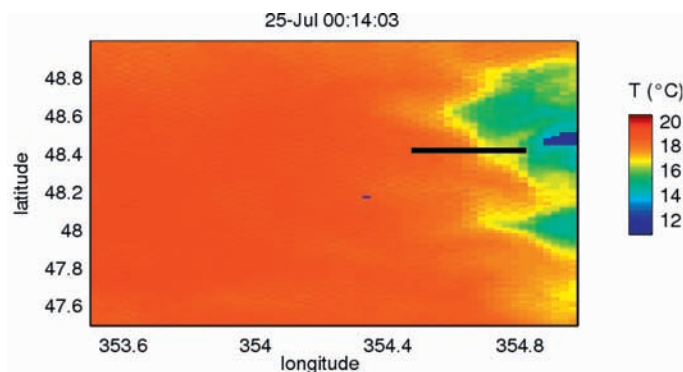


Figure 3 : Positionnement de la radiale tomographique dans la zone d'Ouessant. La figure montre un exemple de température de surface prédite par le modèle HYCOM, où le front apparaît nettement.

Les paramètres estimés sont ceux du modèle de structure, soit la position du front, le quart de longueur du front et trois coefficients EOF pour le profil chaud (au large) et une valeur de température pour le profil homogène (à la côte). La base d'EOF utilisée pour le paramétrage du profil stratifié est calculée à partir des sorties d'HYCOM, pour la période du scénario. La bathymétrie et les propriétés du fond sont ici connues.

La figure 4 montre l'évolution de l'estimation des paramètres du front durant 24 heures, avec l'assimilation de mesures acoustiques toutes les 15 minutes, avec deux extensions non linéaires différentes de l'algorithme de Kalman, l'EKF et l'EnKF. Bien que le scénario original ne soit pas parfaitement caractérisé par une marche aléatoire gaussienne de moyenne nulle, les deux filtres testés suivent les paramètres avec une précision satisfaisante. Pour les paramètres de température, le filtre d'en-

semble (EnKF) donne des résultats les plus précis, notamment pour le profil froid.

Les performances des filtres peuvent être traduites en terme d'erreur RMS² sur le champ de vitesse reconstruit à partir de l'estimation des paramètres (la salinité est considérée comme connue). La figure 5 illustre l'évolution de cette erreur au cours du temps, et confirme la supériorité du filtre EnKF sur l'EKF. En outre, la prédiction des incertitudes associées aux estimations, par l'EKF, n'est pas compatible statistiquement avec les erreurs réelles d'estimation, alors que l'EnKF prédit des incertitudes qui respectent les statistiques d'erreur (non montré). Il est important de noter que la supériorité du filtre d'ensemble est obtenue pour des grands ensembles stochastiques de réalisations au sein de l'algorithme, ce qui engendre un coup de calcul nettement plus élevé que pour l'EKF.

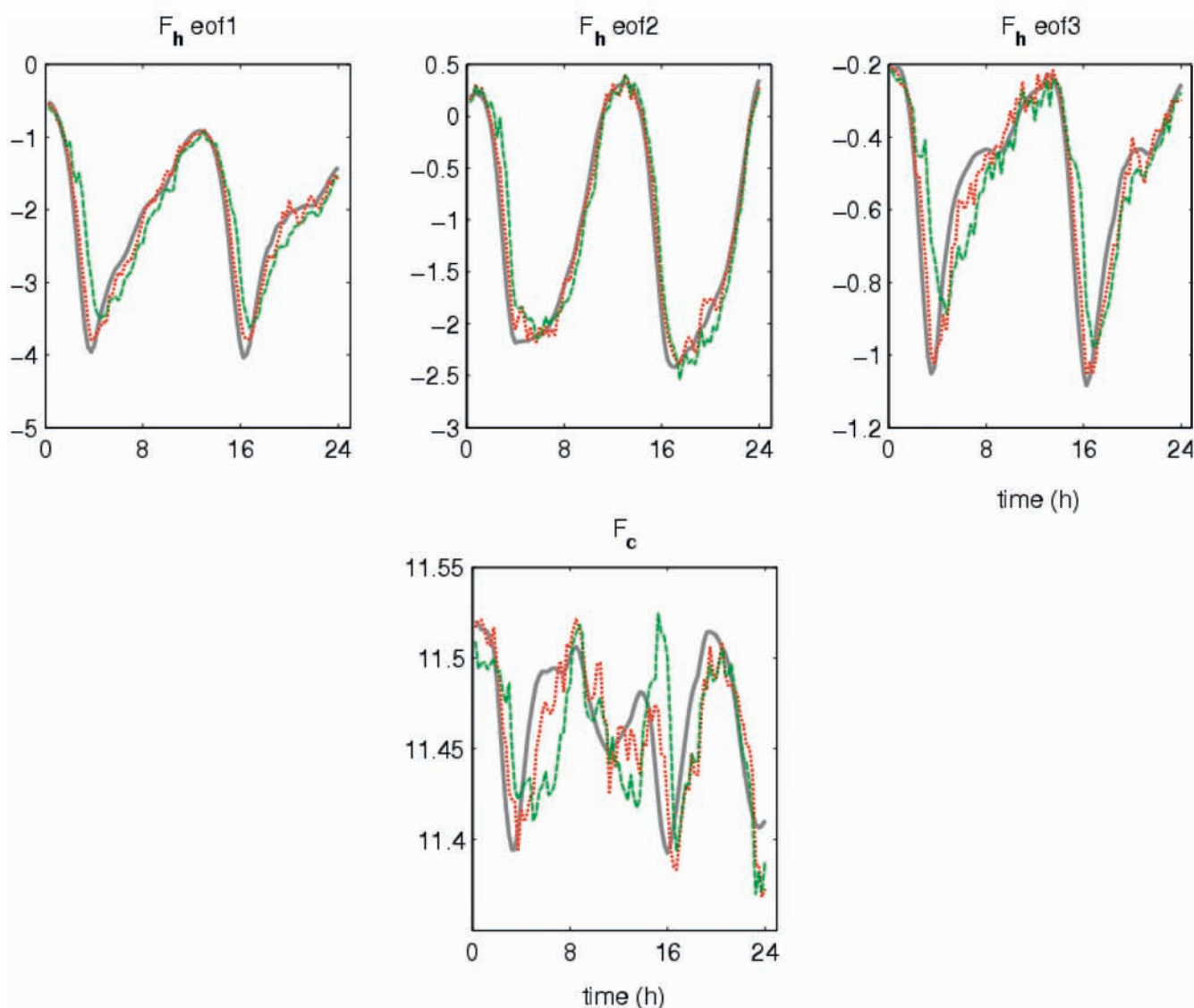


Figure 4 : Filtrage séquentiel des paramètres structuraux du front, durant 24 heures, avec une assimilation du champ acoustique toutes les 15 minutes, avec un EnKF (trait pointillé rouge) et un EKF (trait discontinu vert). La valeur exacte des paramètres est tracée en gris continu.

² Root Mean Square (erreur quadratique moyenne)

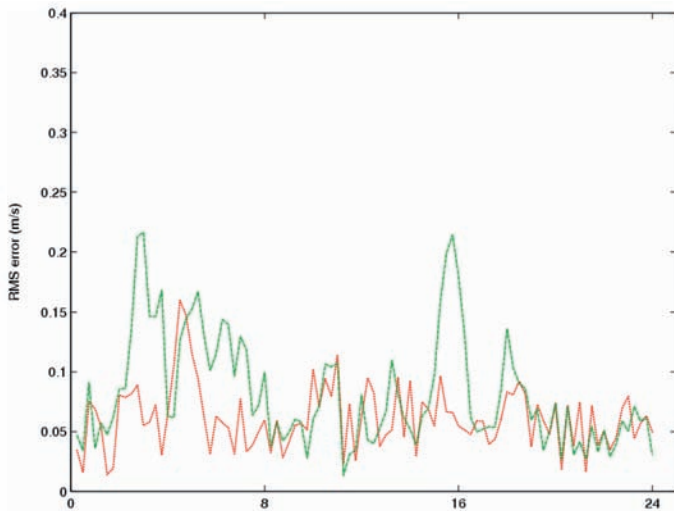


Figure 5 : Evolution de l'erreur RMS sur le champ de vitesse, durant 24 heures. Dans le cas présent d'une expérience jumelle, l'erreur minimale théorique est nulle. L'EnKF (trait pointillé rouge) montre des valeurs inférieures à l'EKF (trait discontinu vert) sur 66 % des itérations.

4. CONCLUSION

Dans ce papier, l'utilisation d'un modèle de structure pour le suivi du front d'Ouessant par tomographie acoustique est investiguée. Un filtre de Kalman est appliqué aux mesures multifréquences sur une antenne d'hydrophones, pour estimer séquentiellement l'évolution des paramètres structuraux du front. La position de la source est représentative de la profondeur de source de bruit de bateaux. Les simulations montrent que la tomographie acoustique peut fournir un outil de mesure complémentaire aux outils existants (mesures satellites, mesures *in situ*), en fournissant une estimation du champ de température à deux dimensions entre la source et l'antenne d'hydrophones.

La zone d'Ouessant est un lieu de trafic maritime intense, avec une moyenne de 150 bateaux par jour, sur des rails délimités et contrôlés. La tomographie acoustique et l'inversion géoacoustique passives ont déjà fait l'objet de nombreux travaux (voir, par exemple, [17] – [19]). On peut dès lors concevoir le déploiement d'un réseau de tomographie passive dans cette zone, afin d'estimer l'état du front à chaque fois qu'un bateau fournit des signaux utilisables pour l'inversion (Figure 6), en combinant des informations sur le trafic, que l'on peut obtenir par exemple par AIS (*Automatic Identification System*) et une base de données sur les caractéristiques acoustiques des types de bateaux qui empruntent le rail. Ce principe est actuellement examiné en détail, avec des enregistrements réalisés à proximité du rail d'Ouessant qui permettront d'étudier quels bruits de bateaux peuvent être utilisés pour l'inversion.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] A. D. HEATHERSHAW, C. E. STRETCH and S. J. MACKELL: "Coupled oceanacoustic model studies of sound propagation through a front". *J. Acoust. Soc. Amer.* (vol. 89, no. 1, pp. 145–155, 1991). [Online] Available: <http://link.aip.org/link/?JAS/89/145/1>.
- [2] G. JIN, J. F. LYNCH, C. S. CHIU and J. H. MILLER: "A theoretical and simulation study of acoustic normal mode coupling effects due to the Barents sea polar front, with applications to acoustic tomography and matched-field processing". *J. Acoust. Soc. Amer.* (vol. 100, no. 1, pp. 193–205, 1996).
- [3] J. SMALL, L. SHACKLEFORD and G. PAVEY: "Ocean feature models - their use and effectiveness in ocean-acoustic forecasting". *Annales Geophysicae* (vol. 15, pp. 101–112, 1997).
- [4] W. MUNK, P. WORCESTER and C. WUNSCH. *Ocean acoustic tomography* (C. U. Press, Ed. Cambridge, 1995).

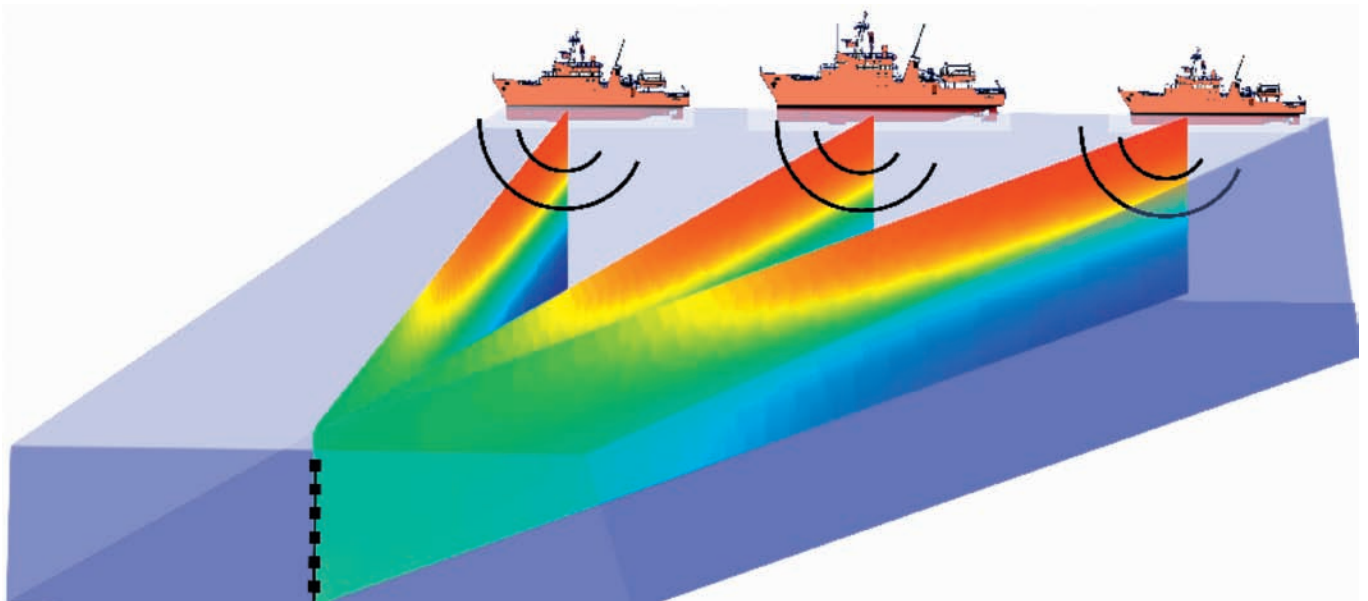


Figure 6 : Utilisation du trafic maritime dans la zone d'Ouessant pour l'estimation de la température dans des tranches verticales de l'environnement, définies par la position du bateau, au large, et l'antenne d'hydrophones, placée à proximité de la côte.

- [5] I. FUKUMORI and P. MELANOTTE-RIZZOLI: "An approximate Kalman filter for ocean data assimilation; an example with an idealized Gulf Stream model". *J. Geophys. Res.* (vol. 100, no. C4, pp. 6777–6793, 1995).
- [6] J. H. PARK and A. KANEKO: "Assimilation of coastal acoustic tomography data into a barotropic ocean model". *Geophys. Res. Lett.* (vol. 27, no. 20, pp. 3373–3376, 2000).
- [7] E. RÉMY, F. GAILLARD and J. VERRON: "Variational assimilation of ocean tomographic data: Twin experiments in a quasi-geostrophic model". *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.* (vol. 128, no. 583, pp. 1739–1758, 2002).
- [8] P. LERMUSIAUX and C. S. CHIU: "Four-dimensional data assimilation for coupled physical-acoustical fields" in *Acoustic Variability 2002*, N. Pace and F. Jensen, Eds. Kluwer Academic Press (2002, pp. 417–424).
- [9] J. K. LEWIS, J. RUDZINSKY, S. RAJAN, P. J. STEIN and A. VANDIVER: "Model-oriented ocean tomography using higher frequency bottom-mounted hydrophones". *J. Acoust. Soc. Amer.* (vol. 117, no. 6, pp. 3539–3554, 2005).
- [10] O. CARRIÈRE, J-P. HERMAND, J-C. LE GAC and M. RIXEN: "Fullfield tomography and Kalman tracking of the range-dependent sound speed field in a coastal water environment". *Journal of Marine Systems. Special issue on MREA and Coastal Processes: Challenges for Monitoring and Prediction* (vol. 78, pp. S382–S392, 2009, doi:10.1016/j.jmarsys.2009.01.036).
- [11] P. ELISSEEFF, H. SCHMIDT and W. XU: "Ocean acoustic tomography as a data assimilation problem". *IEEE J. Ocean. Eng.* (vol. 27, no. 2, pp. 275–282, 2002).
- [12] G. CAMBON, S. SPEICH, P. MARCHESIELLO and L. MEMERY: "Modelling of the Iroise Sea: sensitivity of the Ushant tidal mixing front and lagrangian cross-frontal exchange". *Geophysical Research Abstracts* (vol. 9, no. 04113, 2007).
- [13] P. LAZURE and F. DUMAS: "An external-internal mode coupling for a 3D hydrodynamical model at regional scale (MARS)". *Adv. Wat. Res.* (vol. 31, pp. 233–250, 2008).
- [14] Y. MOREL: "Modeling coastal areas with HYCOM: results from the MOUTON project" HYCOM GODAE Meeting (April 24-26, 2007).
- [15] L. R. LE BLANC and F. H. MIDDLETON: "An underwater acoustic sound velocity data model". *J. Acoust. Soc. Amer.* (vol. 67, no. 6, pp. 2055–2062, 1980).
- [16] J. V. CANDY. *Model-Based Signal Processing*. New Jersey (John Wiley/IEEE Press, 2006).
- [17] S. M. JESUS, C. SOARES, E. F. COELHO and P. PICCO: "An experimental demonstration of blind ocean acoustic tomography". *J. Acoust. Soc. Amer.* (vol. 119, no. 3, pp. 1420–1431).
- [18] C. GERVAISE, S. VALLEZ, Y. STÉPHAN and Y. SIMARD: "Passive acoustic tomography: an efficient way to reduce acoustic emission in tomographic process – review, new concept & applications using marine mammals vocalises". *J. of the Marine Biol. Assoc. of United Kingdom* (vol. 87, pp. 5–10).
- [19] A. V. Van LEIJEN, J-P. HERMAND and M. MEYER: "Geoacoustic inversion in the north-eastern Caribbean using a hydrographic survey vessel as a sound source of opportunity". *Journal of Marine Systems* (vol. 78, pp. S333–S338, 2009, doi:10.1016/j.jmarsys.2009.01.036).

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient le support du Fonds pour la formation à la Recherche dans l'Industrie et dans l'Agriculture (FRIA), Belgique. Le réseau d'excellence European Seas Observatory NETwork (ESONET), le 6^e programme cadre européen, priorité de recherche 1.1.6.3 Changement global et écosystèmes, Commission européenne, et le projet de recherche SINOBAD³ (contrat 08CR0002) financé par la Direction générale pour l'armement (DGA).

³ Système d'Inversion acoustique et Océanographique Basé sur l'Assimilation des Données.