

Analyse de signaux réels marins : identification de fréquences caractéristiques via la méthode DEMON

V. Labat et D. Daré-Emzivat

Irenav, BCRM Brest, Lanvéoc Poulmic, 29240 Brest Cedex 9, France
valerie.labat@ecole-navale.fr

Dans un contexte de protection portuaire, l'un des enjeux consiste à détecter des cibles potentielles au-dessus ou sous la surface (plongeurs, AUV...). Parmi les dispositifs de détection existants, l'approche acoustique passive présente l'avantage d'être discrète pour un faible coût de mise en œuvre. Le signal recherché se trouve souvent noyé dans un environnement bruyé et il convient alors d'avoir des connaissances a priori de la signature acoustique de la cible pour être capable de la détecter. L'objet de cette étude est d'adapter la méthode DEMON sur des signaux obtenus en mer en conditions réelles. Cette technique est basée sur la détection d'enveloppe après filtrage du signal dans une bande de fréquences caractéristiques de l'objet d'intérêt. Le rapport signal sur bruit s'en trouve alors amélioré, ce qui facilite l'extraction de paramètres caractéristiques de la cible. La méthode a été appliquée sur deux types de signaux : des enregistrements issus de plongeurs d'une part et de bruits de navire d'autre part. Dans le cas des plongeurs, les enregistrements ont permis de déterminer la fréquence de respiration des plongeurs. Pour les navires, les fréquences caractéristiques de la signature du navire (telle la fréquence de rotation d'une pale d'hélice) sont observées avec un meilleur rapport signal sur bruit.

1 Introduction

Risques terroristes, actes de malveillance, espionnages militaire et industriel sont autant de menaces potentielles qui ont conduit au développement de technologies de détection aussi bien acoustique, optique, électromagnétique. Si les systèmes basés sur la technologie radar ou infrarouge présentent de bonnes performances pour des détections de surface [1], les systèmes acoustiques restent à ce jour privilégiés pour les détections sous la surface. Parmi les systèmes acoustiques, les sonars actifs proposent une portée de détection intéressante mais présentent des inconvénients [2] comme un taux de fausse alarme élevé, une perte de discrétion, un coût, un niveau d'émission important... Les sonars passifs eux gardent l'avantage de la discrétion mais la portée reste faible. Cette méthode non intrusive consiste à enregistrer les sons présents dans le milieu marin puis à rechercher des signaux sonores spécifiques émis par différentes sources pour de la détection et de la classification. Dans le cadre de cette étude, nous nous sommes intéressées à l'approche acoustique passive. Nous avons souhaité appliquer la méthodologie DEMON à des mesures réalisées en bassin et en mer en conditions réelles. La première partie de ce document résume l'approche DEMON. Puis nous présentons deux situations de mesures où ce traitement est appliqué.

2 Approche DEMON

Le signal rayonné par un navire est noyé dans une multitude de sons issus du bruit environnant. Ainsi de nombreux bruits, couvrant une large gamme de fréquences, existent dans le milieu sous-marin et rendent difficile la détection d'une source donnée. Parmi les nombreuses méthodes développées en détection passive, l'approche DEMON [3] (pour Detection of Envelope MODulation on Noise) a, de manière empirique, largement fait ses preuves. Cette méthode s'appuie sur l'estimation de l'enveloppe d'un signal large bande modulé en amplitude d'où l'appellation employée. Elle se résume à une succession de traitements élémentaires. Un filtrage constitue la première étape. Celui-ci permet non seulement de sélectionner la zone où les raies sont susceptibles d'être présentes mais également d'amoindrir les effets des autres bruits dans cette bande. Il est donc utile de disposer d'un minimum de connaissances sur la nature des sources de bruit recherchées. L'opération suivante consiste à déterminer l'enveloppe du signal modulé. Différentes méthodes sont possibles. Dans notre cas, une fenêtre temporelle glissante sans chevauchement est utilisée et appliquée sur le signal filtré. Pour chaque fenêtre, une transformation de Hilbert

est effectuée et un lissage y est associé. Une interpolation est opérée entre tous ces signaux élémentaires. L'obtention du spectre correspondant est alors possible après calcul de la Transformée de Fourier sur le signal issu de cette chaîne de calcul. Cette approche est employée sur des signaux acoustiques réels marins que sont les signaux de respiration de plongeurs et les signaux rayonnés par les navires.

3 Signature acoustique de plongeurs

La respiration constitue la source principale d'émission acoustique des plongeurs. En effet, lors des phases d'inhalation, des signaux large bande sont émis périodiquement avec pour origine les détendeurs équipant les systèmes de plongée qui permettent d'abaisser la pression de l'ordre de 200 bars dans les bouteilles à celle requise pour le système respiratoire humain. Le cycle respiratoire des plongeurs s'étend, selon les conditions, d'environ 10 à 30 respirations par minute [4], soit une fréquence de respiration entre 0.15 et 0.5 Hz.

Des mesures ont été réalisées en bassin et en mer pour analyser les signaux respiratoires de plongeurs et retrouver leur fréquence de respiration. Les signaux ont été enregistrés à l'aide d'un hydrophone (Reson TC4034) et échantillonnés à la fréquence de 44.1 kHz. Dans le cas des mesures en bassin, le plongeur était immobile au fond. Pour les essais en mer, le plongeur réalisait un palmage faible.

3.1 Exploitation des mesures en bassin

La figure 1 représente un exemple du signal temporel de respiration obtenu pour un plongeur immobile. Des signaux impulsionnels correspondant aux inhalations se distinguent nettement avec une période de 7 secondes environ et sont entrecoupés des phases d'expiration, assez difficiles à observer.

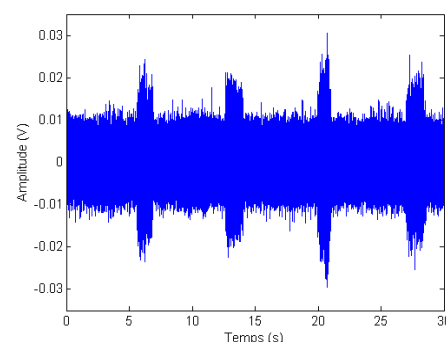


Figure 1 : Signal temporel de respiration d'un plongeur enregistré en bassin.

Sur le spectrogramme de ce signal (figure 2), on remarque que les signaux correspondant aux phases d'inhalation sont des signaux large bande. Ils présentent toutefois deux bandes de fréquences amplifiées autour de 6 kHz et 11 kHz. Ces zones fréquentielles d'intérêt sont donc privilégiées pour appliquer la méthode DEMON. Le filtrage passe-bande est effectué dans deux gammes : de 4 à 8 kHz et de 9 à 13 kHz.

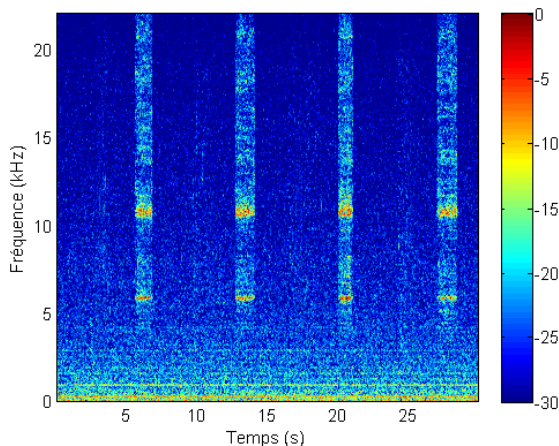


Figure 2 : Spectrogramme du signal du plongeur obtenu en bassin.

Les signaux obtenus après filtrage (figures 3 et 4) laissent entrevoir plus distinctement les phases d'expiration.

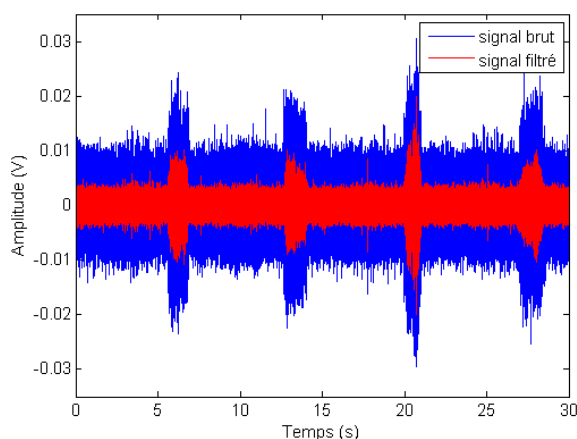


Figure 3 : Signal temporel avant (bleu) et après (rouge) filtrage passe-bande entre 4 et 8 kHz.

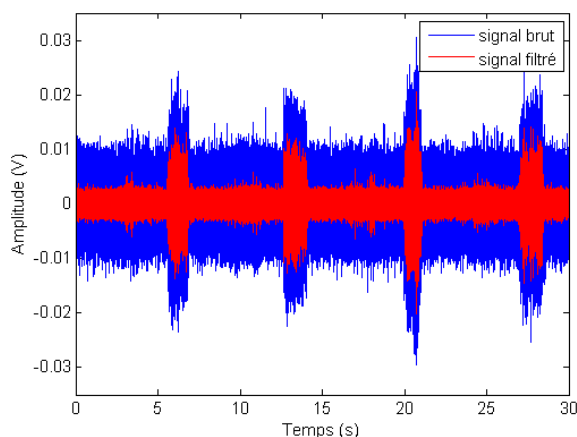


Figure 4 : Signal temporel avant (bleu) et après (rouge) filtrage passe-bande entre 9 et 13 kHz.

La transformée de Fourier de l'enveloppe du signal, enveloppe obtenue après filtrage et après application de Hilbert sur des fenêtres temporelles de 20 ms (figure 5), permet d'observer un pic à la fréquence de 0.14 Hz et ses harmoniques. Cette fréquence correspond à la fréquence de respiration des plongeurs, en accord avec les observations réalisées sur le signal temporel et le spectrogramme où une période de 7 secondes intervient entre deux inhalations. Le filtrage passe-bande réalisé sur les deux bandes de fréquences d'intérêt fournit les mêmes résultats, avec toutefois une amplitude plus élevée pour la bande de fréquences 9-13 kHz.

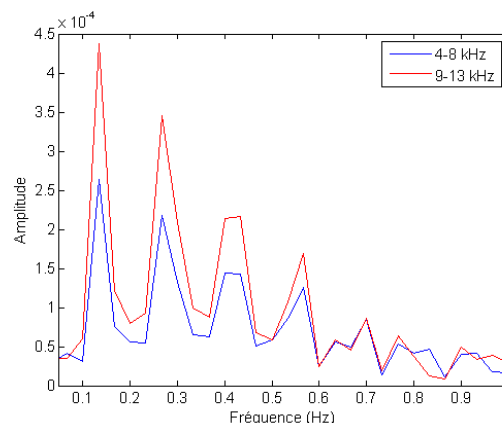


Figure 5 : Module du spectre de l'enveloppe du signal de respiration entre 0 et 1 Hz après filtrage passe-bande entre : 4 et 8 kHz (bleu) et entre 9 et 16 kHz (rouge).

Pour les mesures de bruit effectuées dans le bassin en absence de plongeurs, aucun pic correspondant à la fréquence de respiration des plongeurs n'apparaît sur le module du spectre DEMON.

Ces essais en bassin ont servi à sélectionner les bandes de fréquences utiles pour le filtrage des données. La méthode DEMON a donc permis de retrouver la fréquence de respiration du plongeur et de valider le protocole.

3.2 Exploitation des mesures en mer

Lors des acquisitions en mer, les conditions expérimentales et environnementales engendrent des niveaux de bruit plus élevés (bruit de mer, navires présents sur zone...). Les signaux de respiration du plongeur se distinguent à peine sur le spectrogramme (figure 6).

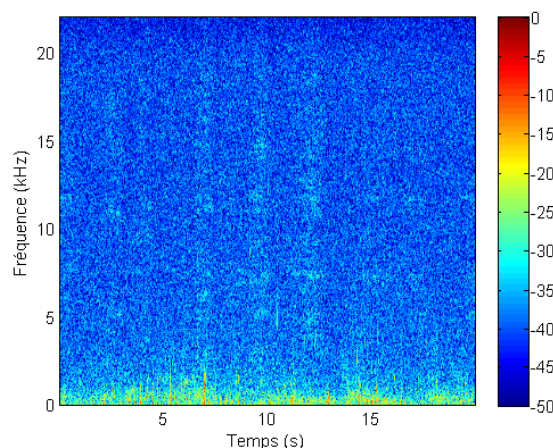


Figure 6: Spectrogramme du signal du plongeur obtenu en mer.

Après application de la méthode DEMON avec filtrage passe-bande dans les bandes de fréquences préalablement sélectionnées, on obtient une fréquence de respiration du plongeur autour de 0.4 Hz (figure 7) et son harmonique. Le résultat est identique quelle que soit la bande de fréquence utilisée. La fréquence de respiration obtenue en mer est supérieure à celle observée en bassin car le plongeur réalise une légère activité de palmage.

En revanche, il n'est plus possible d'observer cette fréquence caractéristique de la respiration du plongeur dans le cas de l'enregistrement du bruit de mer seul (figure 8).

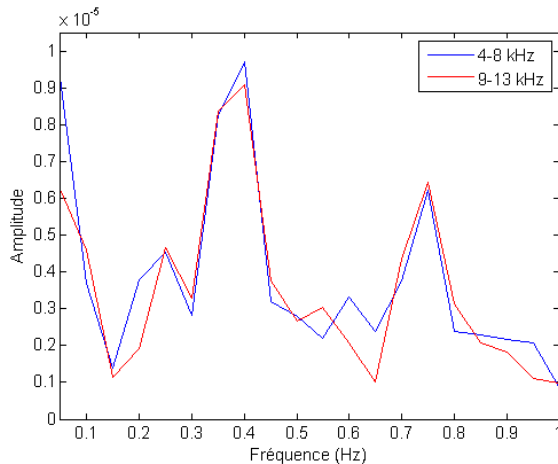


Figure 7: Module du spectre de l'enveloppe du signal de respiration d'un plongeur en mer entre 0 et 1 Hz après filtrage passe-bande entre : 4 et 8 kHz (bleu) et entre 9 et 16 kHz (rouge).

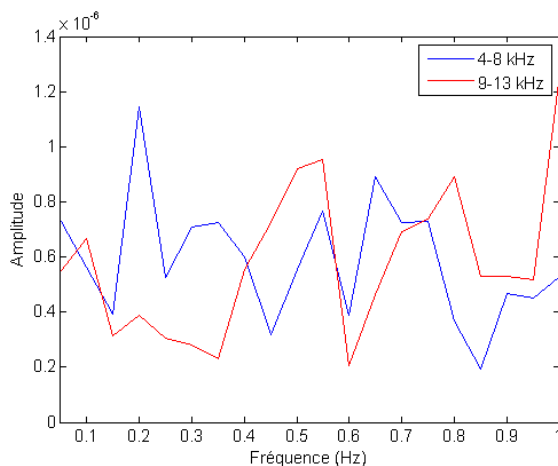


Figure 8: Module du spectre de l'enveloppe du bruit en mer entre 0 et 1 Hz après filtrage passe-bande entre : 4 et 8 kHz (bleu) et entre 9 et 16 kHz (rouge).

4 Signatures acoustiques des navires

La seconde application envisagée concerne la signature acoustique des navires. Les bruits rayonnés par les bâtiments présentent des spécificités caractéristiques du type de bruiteur [5]. Dans notre étude, seul le cas d'un bâtiment de surface est traité. L'une des sources de bruits a pour origine le bruit hydrodynamique (dû aux éléments du bateau en contact direct avec l'eau) et plus particulièrement le bruit des hélices. Ce bruit d'hélice va se traduire par des signaux large bande modulés périodiquement en amplitude

au rythme des pales de l'hélice. Ceci s'explique par le phénomène de cavitation. La cavitation résulte de l'implosion de petites bulles d'air formées à l'extrémité des pales. Ce phénomène est dépendant de la pression, cette dernière variant avec la hauteur d'eau. Ainsi le déplacement des pales de l'hélice entraîne une variation périodique de la profondeur d'eau. Le bruit créé est donc modulé en fonction des paramètres propres de l'hélice. L'approche DEMON va travailler à partir du bruit de cavitation et va estimer la modulation de l'enveloppe du signal pour en déduire les caractéristiques techniques du bâtiment. Il est possible de déterminer les fréquences émises par les pales de cette hélice [6,7], à savoir :

$$f_{ph} = k \cdot \frac{n_h}{60} \quad (1)$$

avec :

$k = 1, 2, 3, \dots$: indice des harmoniques ;
 n_h , vitesse de rotation de la ligne d'arbre

Si l'hélice comporte n_b pales, les fréquences émises par l'ensemble de l'hélice sont données par la relation :

$$f_h = k \cdot \frac{n_h}{60} \cdot n_b \quad (2)$$

Des mesures acoustiques du bruit rayonné par un petit remorqueur ont été effectuées sur la station de mesures du GESMA à Lanvéoc. Le bateau comporte une hélice constitué de trois pales. Les signaux ont été enregistrés au passage du bateau par des hydrophones positionnés au fond de l'eau. L'étude du signal est faite sur les 16 secondes encadrant le CPA (Closest Point of Approach) (figure 9). Les enregistrements proposés correspondent à une vitesse de rotation de la ligne d'arbre n_h de 660 tr/min soit une vitesse voisine de 6 noeuds. Les signaux sont numérisés avec une fréquence d'échantillonnage de 44100 Hz. Il est possible d'obtenir les niveaux acoustiques (en dB ref 1 μ Pa à 1 m) en tenant compte des sensibilités des hydrophones, des gains d'amplification de la chaîne d'acquisition et en corrigeant des pertes de propagation.

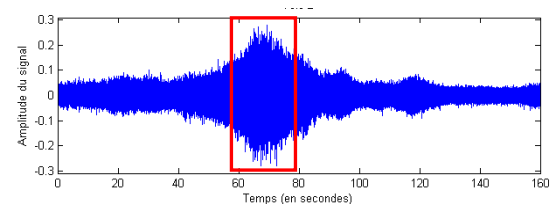


Figure 9 : Fenêtre d'observation sur le signal temporel brut.

L'application numérique pour une vitesse de 6 noeuds conduit aux valeurs suivantes : le fondamental théorique pour f_{ph} est déterminé par la fréquence 11 Hz, la première harmonique étant à 22 Hz. La fréquence attendue pour l'hélice entière (avec 3 pales) correspond donc à une fréquence fondamentale f_h de 33 Hz.

Le bruit rayonné par le navire est caractérisé par un spectre large bande (figure 10) dont émergent des raies spectrales en basses fréquences comme le montre la figure 11 sur la bande de fréquences entre 0 et 100 Hz. Ceci nous donne déjà une information sur la zone fréquentielle à privilégier.

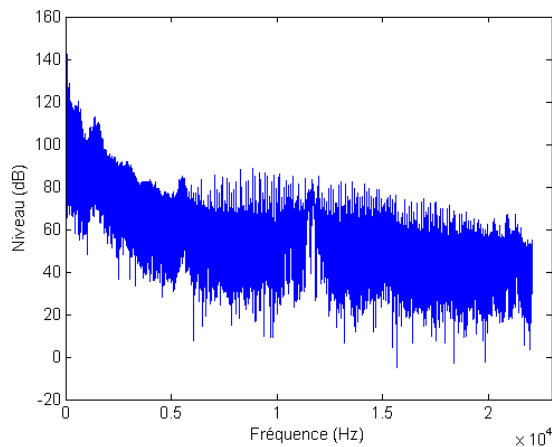


Figure 10 : Module du spectre du signal brut.

L'objectif est de répertorier les fréquences des différentes raies observées pour caractériser l'origine des sources de bruit : pale, hélice, auxiliaires... Dans le cadre de cette étude, nous nous concentrons sur la fréquence correspondant à la pale de l'hélice.

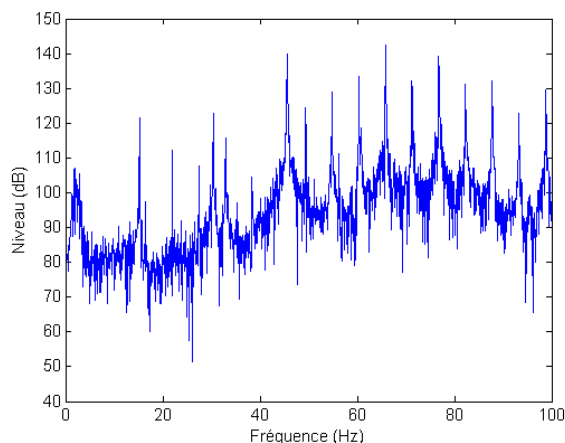


Figure 11 : Raies fréquentielles observées pour le signal brut entre [0 ; 100 Hz].

Les applications numériques théoriques nous permettent d'envisager une zone d'intérêt fréquentielle comprise entre [0;100 Hz]. Un filtrage passe-bas de nos données est donc réalisé pour une fréquence de coupure de 400 Hz. L'estimation de l'enveloppe débute par l'application de la transformée de Hilbert sur des fenêtres temporelles de durée 1 ms. La reconstruction ne retient que la valeur maximale dans cette fenêtre. Après une étape d'interpolation et un calcul de FFT, nous obtenons le spectre DEMON. L'idée est ensuite de repérer les différentes fréquences pour les associer à des sources de bruit.

Nous proposons sur la figure 12 la comparaison entre les modules du spectre du signal brut et celui du spectre de l'enveloppe établie à partir de DEMON pour une même fenêtre temporelle de durée 16 s et pour un hydrophone donné. Des tests effectués entre les enregistrements des deux voies aboutissent à des résultats identiques.

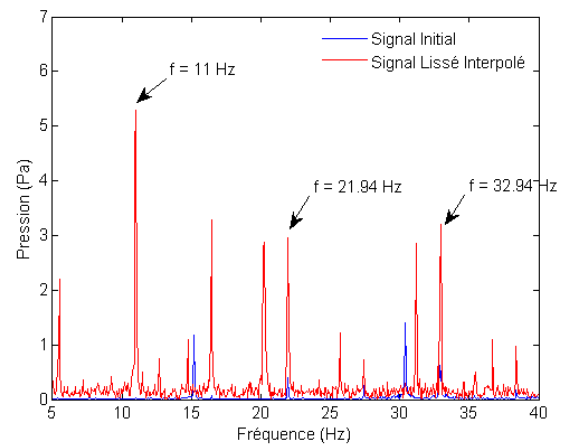


Figure 12: Modules du spectre du signal brut et de l'enveloppe du signal modulé pour une vitesse de 6 nœuds.

Parmi toutes les raies observées sur ces spectres, des valeurs fréquentielles s'avèrent coïncider avec les fréquences obtenues théoriquement. Nous voyons ainsi apparaître une fréquence de 11 Hz sur le signal DEMON, correspondant au fondamental d'une pale ainsi que ses harmoniques à 21.94 Hz et 32.94 Hz avec un pas fréquentiel de 0.06 Hz. Nous pouvons noter le rehaussement des raies après application du traitement DEMON pour les raies à 21.94 et 32.94 Hz.

5 Conclusion

Notre étude porte sur l'analyse de signaux réels marins et l'identification de leurs fréquences caractéristiques en utilisant la méthode DEMON.

Dans un premier temps, cette approche a été exposée puis a été appliquée sur des signaux de respiration de plongeurs et de bruits rayonnés par un bateau.

Le traitement de nos mesures avec DEMON a permis d'une part de remonter à la fréquence caractéristique de respiration des plongeurs en environnement bruité. D'autre part, elle a conduit à un rehaussement des valeurs des raies fréquentielles attendues dans le cadre de la rotation de l'hélice à 3 pales.

Après cette étude préliminaire et les premiers résultats obtenus, nous envisageons un pré-traitement des données brutes avant application de DEMON et une évaluation de la portée de détection puis nous prévoyons de procéder à de nouvelles campagnes de mesure (amélioration du dispositif de détection).

Remerciements

Nous tenons à remercier le Groupe d'Etudes Sous-Marine de l'Atlantique (GESMA) pour sa collaboration lors de la campagne de mesures et son expertise.

Références

- [1] K. Krapels, R.G. Driggers, J.F. Garcia, Performance of infrared systems in swimmer detection for maritime security, *Optics Express* **15 (19)**, 12296-12305 (2007).
- [2] B. Borowski, A. Sutin, H-S.Roh, B. Bunin, Passive acoustic threat detection in estuarine environments, *Proc. of SPIE* **6945**, 694513 (2008).
- [3] KW. Chung, A. Sutin, A.Sedunov, M. Bruno, DEMON Acoustic Ship Signature Measurements in an Urban Harbor, *Advances in Acoustics and Vibration, Volume 2011* (2011).
- [4] D. M. Donskoy, N.A. Sedunov, A.N. Sedunov, and M.A. Tsionskiy, Variability of SCUBA diver's Acoustic Emission, *Proc. of SPIE* **6945**, 694515 (2008).
- [5] J-P.Marage, Y.Mori, *Sonars et acoustique sous-marine Volume I*, Edition Hermès- Lavoisier, (2009).
- [6] Underwater Radiated Noise of Ocean-Going Merchant Ships, *A Background Paper Produced by Participants of the International Workshop on Shipping Noise and Marine Mammals*, Held By Okeanos : Foundation for the Sea Hamburg, Germany, 21st-24th April 2008, <http://www.okeanos-stiftung.org/assets/Uploads/BiologyPaper2.pdf>
- [7] Rapports internes Ecole Navale 2008 et 2009.