



**HAL**  
open science

# Théorie de l'estimation appliquée à l'étude de performances d'un système anti-collision entre navires et cachalots

Cedric Gervaise, M. Andre

► **To cite this version:**

Cedric Gervaise, M. Andre. Théorie de l'estimation appliquée à l'étude de performances d'un système anti-collision entre navires et cachalots. *Traitement du Signal*, 2008, 25 (1-2), pp.13-26. hal-00449741

**HAL Id: hal-00449741**

**<https://hal.science/hal-00449741v1>**

Submitted on 31 May 2021

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

# **Théorie de l'estimation appliquée à l'étude de performances d'un système anti-collision entre navires et cachalots**

## Optimal design of a whale of anti-collision system

**C. Gervaise<sup>1</sup>, M. André<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> ENSIETA, E3I2, EA3876, 2 rue François Verny, 29806, Brest Cedex 9, France.

E-mail: cedric.Gervaise@ensieta.fr

<sup>2</sup> Laboratoire d'Applications bioacoustiques – Université Polytechnique de Catalogne, Avda. Rambla Exposicio, 08800 Vilanova i la Geltru, Barcelona, Spain.

### Résumé et mots clés

Dans cet article, des outils issus de la théorie de l'estimation sont proposés pour permettre l'évaluation des performances et le dimensionnement de systèmes expérimentaux. Ceux-ci ont été appliqués au système WACS (Whales Anti Collision System), système de localisation passive des cachalots vocalisants ou non afin de contribuer à réduire les collisions avec les navires. Basée sur des outils théoriques, l'approche proposée s'attache à se rapprocher au mieux de la réalité par les hypothèses effectuées. Sans monitoring de l'environnement acoustique, il est démontré que WACS est un bon outil pour le biologiste mais pourrait ne pas être assez précis pour être inséré au sein d'un réseau anti-collision. Associé à un monitoring de l'environnement acoustique, il est démontré que WACS est assez précis pour être inclus dans un réseau anti-collision, les degrés de liberté de WACS sont optimisés et la maille du réseau est identifiée.

**Théorie de l'estimation, bornes de Cramer et Rao, mammifères marins, cachalots, système de localisation, acoustique passive, anti-collision.**

### Abstract and key words

This paper summarizes tools coming from estimation's theory to evaluate and design experimental device. These tools are applied to the "Whale Anti Collision System" dedicated to localise Sperm Whales and to avoid collision with ships. Relying on theoretical tools, our approach tries to be as close as possible of reality by using true sperm clicks, realistic measurement noise by allowing sensors and acoustic environmental missknowledges. Without any acoustic environmental assesment, WACS system shows to be a good tool for biology study but may not be enough accurate to be included in a anti-collision network. With an acoustic environmental assesment, WACS system is accurate enough to be included in an anti-collision network. WACS settings and step of the anti-collision network are identified.

Estimation theory, Cramer and Rao bounds, Marine mammals, Sperm whale, Localization device, Passive Acoustic, Collision Avoidance.

# 1. Introduction

Face à la dégradation acoustique des océans et à la nécessité de trouver un compromis entre le développement des activités humaines et la conservation des écosystèmes et organismes marins, la détection des grands cétacés, en particulier le cachalot, dans les régions où la densité de ses populations le rend plus vulnérable aux collisions avec des navires, a récemment mobilisé la communauté scientifique. Les îles Canaries et le Japon sont deux exemples de zones où les collisions entre les navires et le cachalot sont en constante augmentation.

Le cachalot, *Physeter macrocephalus*, est un cétacé odontocète (à dents, en opposition avec les cétacés à fanons ou baleines). Les males peuvent atteindre 18,3 m de long et peser 60 tonnes tandis que les femelles ne dépassent pas 11 m et 24 tonnes.

Sa distribution est cosmopolite. Les males parcourent les océans, de l'Arctique à l'Antarctique, mais les femelles et leurs petits limitent leurs déplacements à des eaux plus tempérées (40°S – 40°N). Il s'alimente normalement de céphalopodes, d'une taille allant de peu de centimètres à plus de 10 mètres, mais aussi de poulpes et de petits poissons. On estime qu'un male adulte peut arriver à ingérer une tonne de calmars par jour. Ses immersions à la recherche de ses proies sont profondes (500-700 m) et durent environ 40 minutes, même si il a été décrit des plongées de 90 minutes à plus de 2000 mètres de profondeur.

Les espèces grégaires de cétacés, qui forment des liens sociaux durables, collaborent à l'heure de chercher leur nourriture et présentent des systèmes sociaux complexes. Ces espèces sont connues pour produire des sifflements et des sons pulsés pour communiquer. Le cachalot, cependant, est une des espèces qui produisent et utilisent seulement des clics.

Les sons du cachalot ont été tout d'abord identifiés et décrits en 1957 ([Worthington57]) comme une série de clics courts dans une bande de fréquences allant de 10 à 17 kHz. Les clics étaient produits habituellement à intervalles d'environ une demi seconde, pouvant aller parfois jusqu'à cinq clics par seconde. Quelques années plus tard, en 1966 (Backus & Schevill), une analyse plus détaillée de ces sons décrit les clics comme étant souvent composés d'une série de pulsations à bande large de 200 Hz à 32 kHz, avec une fréquence dominante de 5 kHz [Backus66]. L'intervalle entre les clics variait généralement de 0,025 à 1,250 secondes, et le clic entier durait entre 2 à 24 ms. Les clics étaient typiquement répétés en longues séquences, à intervalles réguliers, quand les cachalots recherchaient leur nourriture, et ces séries pouvaient continuer sans interruption ou changement appréciable des intervalles pendant 20 minutes ou plus. Deux tiers de chaque heure d'enregistrement acoustique consistaient en ces séries, appelés clics « habituels » ou « réguliers ».

À cette époque, il fut également fait mention de « séquences courtes, irrégulièrement espacées de clics répétés plusieurs fois en l'espace de quelques dizaines de secondes ». Ces « codas » ont été caractérisés plus tard (Watkins & Schevill, 1977) comme

étant des modèles stéréotypés et répétitifs, composés d'une courte série de 3 à 40 clics ou plus. Bien que ces sons n'aient été entendus qu'occasionnellement, les auteurs les ont décrits comme distincts et nettement reconnaissables par rapport « au bruit de fond » des clics habituels du cachalot. Des études récentes ont confirmé ces conclusions et mis en évidence que les codas étaient utilisés pour la communication, y compris l'information concernant l'identité de l'individu et du groupe, l'accouplement et la défense territoriale, les mouvements du groupe et les liaisons sociales.

Bien que certains auteurs aient indiqué que les clics habituels du cachalot pourraient être des signaux sociaux, parce qu'ils présentent des caractéristiques différentes par rapport aux clics d'autres odontocètes et parce que les cachalots semblent coordonner leurs mouvements sous-marins, il a été suggéré que la fonction primaire des clics « habituels » est l'écholocation. Les données les plus récentes ont confirmé cette hypothèse [Mohl03] et ont même permis de déterminer les performances sonar de leurs clics et la distance moyenne de détection de leur proie (calamar de 25 cm de long) à environ deux kilomètres en condition de mer Beaufort 1-2 (bruit de fond 70 dB re 1Pa/Hz) [Andre07].

Les cachalots possèdent une remarquable structure cohésive quand ils se nourrissent. Les membres d'un groupe social peuvent se disperser sur plusieurs kilomètres carrés tout en maintenant toujours le même cap pendant une période pouvant aller jusqu'à plusieurs heures, avant que tous les animaux n'en changent simultanément pour aller dans une autre direction. L'attention portée aux petits du cachalot est aussi remarquable. Dans toutes les régions où les cachalots ont été étudiés, il a été observé que les femelles laissent systématiquement leur petit à la surface quand elles plongent à la recherche de nourriture durant des périodes allant jusqu'à 40 minutes. Les petits continuent leur natation lente en conservant une même direction, comme le reste du groupe, alors que leurs mères sont loin d'eux, dans les profondeurs de la mer. Mais entre deux immersions, les mères les rejoignent finalement, quelquefois à plusieurs kilomètres du point où elles les ont laissés.

Pendant ces deux activités, toutes les deux liées à la recherche de nourriture, les cachalots produisent continuellement des séries de clics habituels. Dans le comportement d'alimentation du cachalot, de longues immersions de 40 à 50 minutes en moyenne alternent avec des périodes de repos de 10 à 15 minutes à la surface, où ils sont habituellement silencieux. Les membres du même groupe social ne font pas surface tous ensemble, puisque des séries de trains de clics habituels sont audibles de façon continue.

Pour localiser les cachalots, ce comportement acoustique particulier permet d'envisager une solution passive face aux limitations des méthodes de détection active et à la dégradation acoustique d'un milieu marin amplement saturé par le bruit ambiant. WACS, Whale Anti-Collision System, est un système de localisation passive en trois dimensions formé d'un réseau d'hydrophones ([Andre05], [Andre04a], [Andre04b]) qui intègre un système de communication pour informer en temps réel les

bateaux en transit de la présence de cétacés sur leur route et pour leur permettre des changements de cap opportuns pour éviter les collisions. Techniquement, WACS comprend deux systèmes en interactions : un système 3D d'écoute, appelé Loc3D, qui permet la détection et la localisation 3D des sources sonores sous-marines (distance, azimuth et élévation) et un système de localisation azimuthal (locAz) des cétacés non-vocalisants, détectés par le contraste spatio-temporel produit par le bruit ambiant dans la région d'étude [Delory07].

Ce dernier point est fondamental parce que beaucoup d'espèces de cétacés (par exemple le cachalot et probablement les baleines à bec) sont silencieux pendant l'ascension ou près de la surface, ou produisent des signaux acoustiques de fréquence très basse, difficile à détecter au-dessus du bruit ambiant (comme par exemple la plupart des mysticètes).

Alors que les techniques d'Imagerie par Bruit Ambiant (ANI, Ambient Noise Imaging) ont montré leur capacité à détecter des individus silencieux en utilisant les vocalisations d'autres membres du groupe ([Delory07]), leur succès dépend dans ce cas de la localisation précise des cachalots acoustiquement actifs qui doivent être identifiés individuellement dans un groupe social, pour leur allouer une position qui permettra de les utiliser comme sources sonar actives multi-statiques. Van der Schaar *et al.* ([Van der Schaar07a], [Van der Schaar07b]) ont montré que lorsque les clics sonar sont reçus sur plus d'un hydrophone, l'utilisation de techniques de traitement du signal rend possible la séparation automatique des clics d'animaux différents au sein d'un petit groupe.

Pour évaluer la faisabilité de détecter et de localiser précisément des cachalots vocalisant, une quantité considérable d'information sur l'acoustique du cachalot a été analysée pour créer une structure de simulation capable de recréer un scénario reflétant un monde réel ([Delory07]). Dans ces travaux passés, nous avons modélisé la réponse du WACS en fonction de différentes configurations pour tester sa composante LocAz.

L'objectif du présent papier, complémentaire des travaux cités précédemment, est d'étudier les performances de la composante Loc3D du système WACS et d'optimiser le choix des degrés de liberté du système. Une première partie met en place les outils généraux de théorie de l'estimation pour l'évaluation des performances et le dimensionnement des systèmes expérimentaux. Les deux parties suivantes sont dédiées à la spécialisation des outils pour le problème spécifique de la localisation des cachalots vocalisants avec Loc3D en prenant en compte un maximum de phénomènes de la réalité comme la forme du click émis, le bruit de mesure réaliste, la mauvaise connaissance du profil de célérité, la corrélation possible entre deux trajets acoustiques proches et une connaissance dégradée de la position des capteurs. Une quatrième partie étudie les performances de Loc3D lorsque l'on dispose ou pas d'un monitoring de l'environnement acoustique. La dernière partie dresse les conclusions et identifie les perspectives à nos travaux.

## 2. Théorie de l'estimation appliquée à l'évaluation de performances et au dimensionnement de systèmes expérimentaux

Cette partie générale a pour objectif de poser les définitions et présenter les outils de théorie de l'estimation qui seront appliqués, dans la suite du papier, au problème spécifique de la localisation des cachalots.

On considère un système expérimental fournissant les mesures, rassemblées dans le vecteur  $\{m\}$ . De ce vecteur  $\{m\}$ , on désire inférer un vecteur de paramètres d'intérêt  $\{\theta_i\}$ . Le vecteur de mesures étant acquis par un système, il dépend de degrés de liberté à choisir par son concepteur que l'on rassemble dans le vecteur de réglages expérimentaux  $\{\theta_l\}$ , d'autre part la mesure dépend d'un certain nombre de conditions expérimentales non contrôlables, imposées par l'expérience et pouvant varier d'une réalisation à l'autre, ces conditions sont rassemblées dans le vecteur  $\{\theta_s\}$ .

L'évaluation des performances consiste à prédire la précision d'estimation de  $\{\theta_i\}$  à partir des mesures  $\{m\}$  pour des réglages expérimentaux  $\{\theta_l\}$  et un niveau de connaissance de  $\{\theta_s\}$  donnés.

Le dimensionnement de systèmes consiste à choisir les réglages expérimentaux  $\{\theta_l\}$  afin d'avoir la meilleure estimation possible de  $\{\theta_i\}$  en étant le moins sensible possible à  $\{\theta_s\}$ .

Une hypothèse effectuée jusqu'à la fin de l'article est que le vecteur de mesures  $\{m\}$  s'écrit comme un modèle déterministe  $M$  ( $M$  est un vecteur de même dimension que  $\{m\}$ ) connu et fonction des paramètres  $\{\theta_i\}$ ,  $\{\theta_l\}$  et  $\{\theta_s\}$  et d'un vecteur de bruit additif  $\{b\}$  gaussien de matrice de covariance  $C_b$ , on a donc le modèle de mesures suivant :

$$\{m\} = M(\{\theta_i\}, \{\theta_l\}, \{\theta_s\}) + \{b\}. \quad (1)$$

Soient  $N$  le nombre de mesures réalisées,  $N_i$  le nombre de paramètres d'intérêt,  $N_l$  le nombre de réglages expérimentaux et  $N_s$  le nombre de conditions expérimentales non contrôlables, on définit les matrices de sensibilité  $X_i$  et  $X_s$  par :

$$X_i(l, m) = \frac{\partial M(l)}{\partial \{\theta_i\}(m)}, \quad l \in [1..N], m \in [1..N_i]. \quad (2)$$

$$X_s(l, m) = \frac{\partial M(l)}{\partial \{\theta_s\}(m)}, \quad l \in [1..N], m \in [1..N_s]. \quad (3)$$

Soit  $C_{\theta_i}$ , la matrice de covariance d'un estimateur non biaisé du vecteur de paramètres  $\{\theta_i\}$ , les références [Gervaise99] page 80, et [Gaucher04] page 61, en s'appuyant sur le formalisme de Cramer Rao [Kay93] fournissent une limite inférieure à  $C_{\theta_i}$  en

fonction du niveau de connaissance des conditions expérimentales non controlables  $\{\theta_s\}$ .

Si ces dernières sont monitorées sans erreur à chaque réalisation expérimentale, on a :

$$C_{\theta_i}^1 \geq (X_i^t C_b^{-1} X_i)^{-1}. \quad (4)$$

Si ces dernières sont monitorées avec une précision limitée et possède une matrice de covariance  $C_s$ , on a :

$$C_{\theta_i}^2 \geq C_{\theta_i}^1 + T, \quad (5)$$

avec T définie par :

$$T = (X_i^t C_b^{-1} X_i)^{-1} X_i^t X_s C_s X_s^t X_i (X_i^t C_b^{-1} X_i)^{-1}. \quad (6)$$

Si ces dernières ne sont pas monitorées et doivent être estimées simultanément avec les paramètres d'intérêt, on a :

$$C = ([X_i X_s]^t C_b^{-1} [X_i X_s])^{-1}. \quad (7)$$

et

$$C_{\theta_i}^3 \geq C(1 : N_i, 1 : N_i). \quad (8)$$

Les équations 4, 5, 8 fournissent une borne inférieure à la matrice de covariance de tout estimateur non biaisé de  $\{\theta_i\}$ , cette borne inférieure est asymptotiquement atteinte par l'estimateur du maximum de vraisemblance, ainsi jusqu'à la fin de l'article le terme de droite de chaque inégalité des équations 4, 5, 8 sera considéré comme une expression de la précision optimale accessible à partir des mesures. Ces performances sont calculables si l'on est capable de donner l'expression de M et de la dériver, ce qui est réalisable dans la majeure partie des cas. Il a été démontré dans [Gervaise99] que la précision optimale se dégrade avec la perte de connaissance sur les conditions expérimentales  $\{\theta_s\}$  et que l'on a donc l'inégalité suivante :

$$C_{\theta_i}^1 \leq C_{\theta_i}^2 \leq C_{\theta_i}^3. \quad (9)$$

Le formalisme mis en place dans cette partie générale fournit les outils nécessaires à l'étude de dimensionnement du système d'anti-collision entre cachalots et navires et sera appliqué dans les parties suivantes.

### 3. Paramétrisation du problème de positionnement des cachalots par le système WACS

Préparatoire à l'évaluation des performances de localisation du système WACS et aux réglages de degrés de liberté de ce dernier, cette partie est dédiée à la description du système de localisation et à l'identification des vecteurs de paramètres  $\{m\}$ ,  $\{\theta_i\}$ ,  $\{\theta_s\}$  et  $\{\theta_s\}$ .

La figure 1 (partie A) décrit le système WACS dans sa globalité. Comme indiqué dans l'introduction, WACS est constitué de deux composantes fournissant des capacités de localisation par acoustique passive des cachalots vocalisants et non vocalisants. La composante LocAz basée sur les méthodes ANI (Ambiant Noise Imaging) permet une localisation des cachalots non vocalisants en utilisant le chorus créé par les cachalots vocalisants se réfléchissant sur les non-vocalisants. LocAz est composée d'une antenne circulaire de 4 mètres de diamètre. Cette composante ne sera pas abordée dans l'article, une description complète de cette dernière et des traitements associés peut être trouvée dans [Delory03].

La seconde composante (figure 1, partie B) nommée Loc3D a pour objectif de positionner les cachalots vocalisants par acoustique passive dans l'espace à partir d'un quadruplet d'hydrophones disposés au sommet d'un tétraèdre. La position des quatre hydrophones détermine les performances du système. Une première question abordée dans cet article est le choix de la profondeur de l'hydrophone  $h_4$  qui résulte d'un compromis. En effet, plus sa profondeur est importante, meilleure sera la précision mais plus grande sera la sensibilité à la dérive de l'hydrophone en fonction des courants. Une seconde question abordée est d'évaluer les conséquences du bruit de mesure et de la mauvaise connaissance du profil de célérité sur les performances de localisation. Pour ces deux questions, les conclusions qui peuvent être portées sur un positionnement en deux dimensions dans un plan vertical P contenant le cachalot et l'axe vertical de Loc3D restent valables pour un dimensionnement en trois dimensions. Ainsi par souci de simplification, le travail est effectué pour une géométrie bidimensionnelle dans le plan P avec un système de localisation constitué des trois hydrophones (figure 1, partie C).

En se focalisant sur le positionnement 2D dans un plan vertical, un paramétrage complet du problème de localisation peut être proposé. La figure 2 illustre ce dernier.

*Les mesures  $\{m\}$ , figure 2, partie D:* Le temps d'arrivée d'un clic émis par le cachalot à localiser est mesuré pour chacun des trois hydrophones du réseau. À partir de ces trois hydrophones, les deux couples d'hydrophones indépendants  $\{h_2, h_1\}$  et

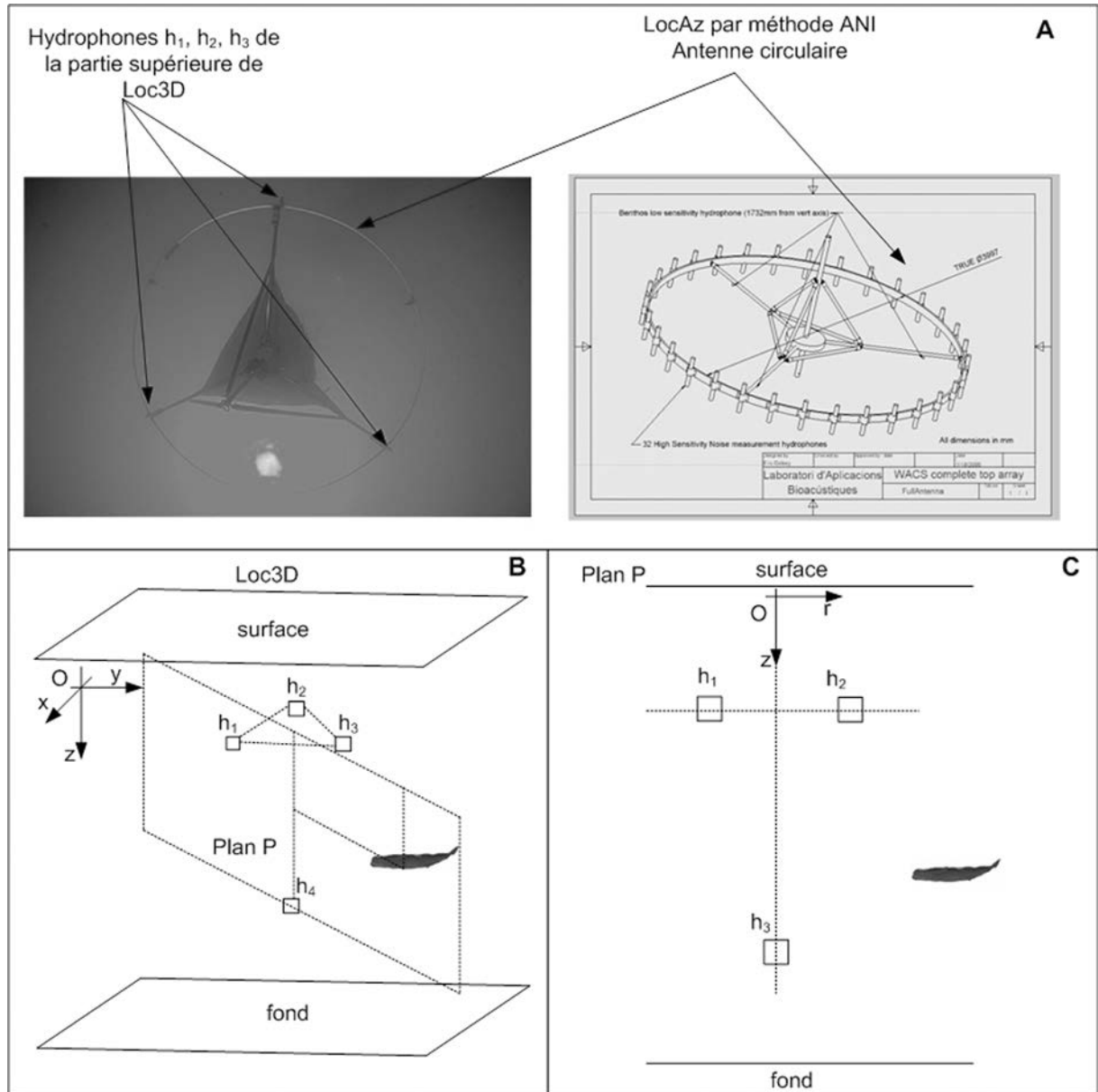


Figure 1. Système WACS, partie A : description du système WACS complet avec ses composantes Loc3D et LocAz, la photographie a été réalisée le 30 septembre 2005 au large de Barcelone durant la première phase de test du système, partie B : synoptique de la composante Loc3D permettant une localisation 3D des cachalots, partie C : synoptique du système de localisation des cachalots vocalisants étudié dans le présent article.

$\{h_3, h_1\}$  sont formés en utilisant l'hydrophone 1 comme référence et les différences de temps d'arrivée entre les hydrophones des couples constituent les mesures recueillies par le système, soit  $\{m\} = \{\tau_{c2} - \tau_{c1}, \tau_{c3} - \tau_{c1}\}$ .

Dans ce modèle de mesure, nous avons volontairement occulté la présence de multi-trajets (réflexions fond et surface) car dans les développements à venir, nous nous focaliserons principalement sur les conséquences de la prise d'inclinaison de l'hydrophone profond et de la méconnaissance du profil de célérité sur le positionnement, ces deux erreurs nous paraissant du premier ordre. Concernant l'existence des multi-trajets, celle-ci est soumise aux conditions expérimentales (état de mer, directivité des

émissions, bathymétrie). Elle contribue, d'une part, à dégrader les performances des algorithmes de détection et d'estimation des temps d'arrivée mais, d'autre part, apporte un supplément d'information pour la localisation (mis à profit par Laplanche *et al.* [Laplanche05a] [Laplanche05b]).

Les paramètres d'intérêt  $\{\theta_i\}$ , figure 2, partie C : les paramètres d'intérêt à estimer à partir des mesures  $\{m\}$  sont les coordonnées du cachalot dans le plan vertical P. Dans la suite du papier, deux repères seront retenus : le repère cartésien 2D dans le plan P de coordonnées  $(r, z)$  et le repère sphérique 2D dans le plan P de coordonnées  $(R, \theta)$ . Ainsi le vecteur de paramètres d'intérêt à estimer est au choix  $\{\theta_i\} = (r_c, z_c)$  ou  $\{\theta_i\} = (R_c, \theta_c)$ .

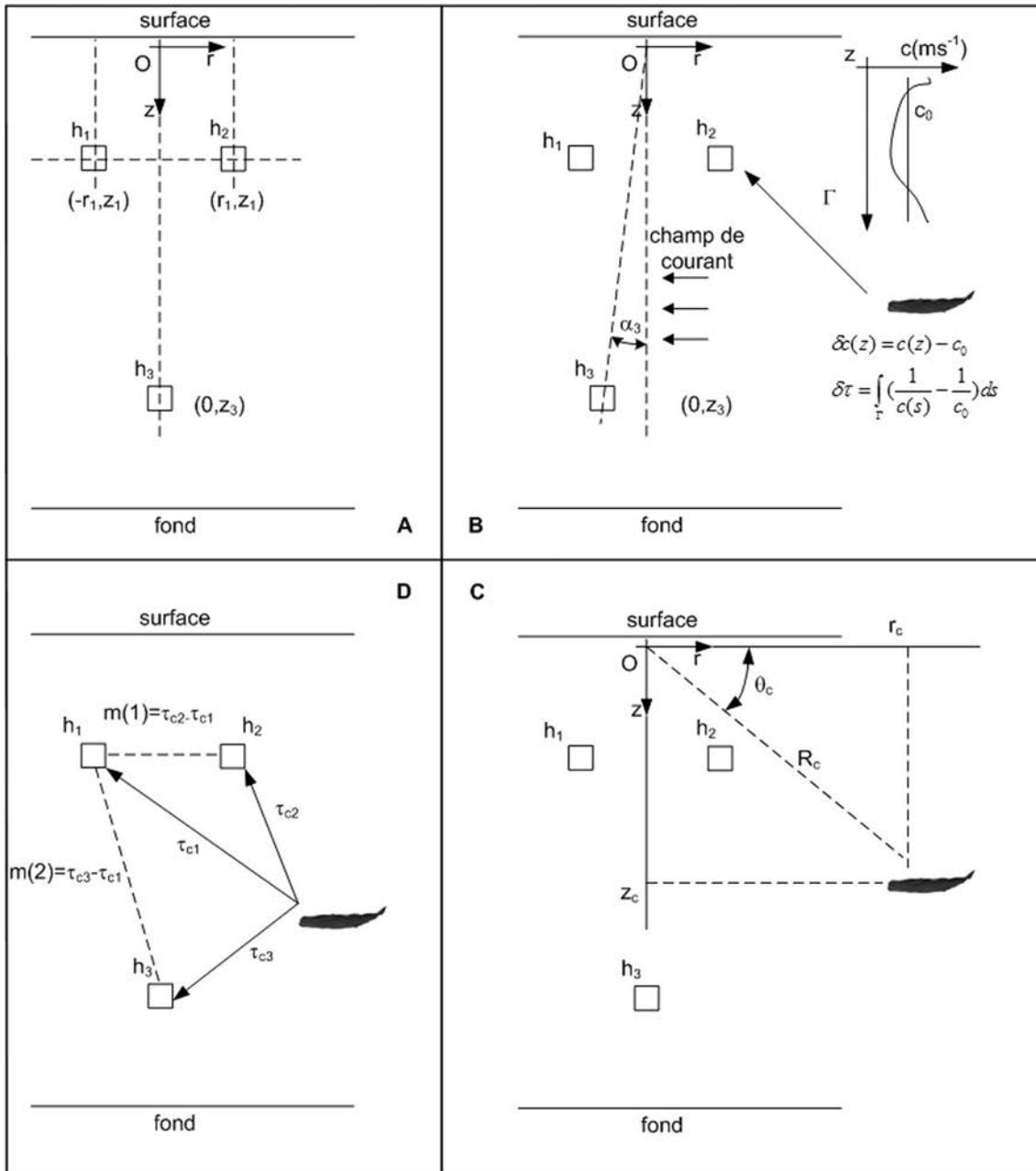


Figure 2. Synthèse du paramétrage du problème de positionnement des cachalots vocalisants à partir du système WACS, partie A: les degrés de liberté du système, partie B: les conditions expérimentales non maîtrisables, partie C: les paramètres à estimer, partie D: les mesures réalisées par le système.

Les degrés de liberté du système  $\{\theta_l\}$ , figure 2, partie A: les degrés de liberté du système sont essentiellement les positions des hydrophones du système. Concernant les hydrophones de la partie supérieure, ceux-ci sont intimement liés à la composante LocAz, puisqu'ils partagent la même structure mécanique. Leurs positions sont contraintes par LocAz et ainsi une profondeur de 100 mètres est retenue afin que LocAz soit au centre de la zone des cachalots non-vocalisants et une ouverture horizontale de 4 mètres est retenue pour la compacité du système. Ainsi jusqu'à la fin de l'article, les positions des hydrophones  $h_1$  et  $h_2$  sont fixées avec  $(r_{h_1}, z_{h_1}) = (-2 \text{ m}, 100 \text{ m})$  et

$(r_{h_2}, z_{h_2}) = (2 \text{ m}, 100 \text{ m})$ . Afin de produire une bonne précision de localisation en profondeur, l'hydrophone  $h_3$  est suspendu verticalement au centre de l'antenne à une profondeur à choisir pouvant varier entre 100 mètres et 1000 mètres, ainsi la position idéale de l'hydrophone  $h_3$  est  $(r_{h_3}, z_{h_3}) = (0 \text{ m}, z_3 \text{ m})$  où  $z_3$  constitue le degré de liberté  $\{\theta_l\}$  à choisir.

Les conditions expérimentales non maîtrisables  $\{\theta_s\}$ , figure 2, partie B: Afin de se rapprocher au mieux des configurations expérimentales de mise en oeuvre du système, deux conditions expérimentales non maîtrisables sont prises en compte. La première est liée au déploiement de l'hydrophone profond  $h_3$  que

l'on espère à la verticale du centre de WACS mais qui peut subir une dérive en fonction des courants. Cette dérive due au courant est modélisée par une prise d'inclinaison quantifiée par l'angle  $\alpha_3$  existant entre la verticale et une ligne liant le centre de WACS et l'hydrophone  $h_3$ . La seconde est liée au profil de célérité des ondes de compression existant dans le canal entre le cachalot et les hydrophones. Dans le modèle déterministe M liant les mesures avec les paramètres du problème, il sera effectué l'hypothèse que la célérité est connue, constante et égale à  $c_0$ . Cette hypothèse permettra de fournir un modèle simple permettant de convertir les mesures  $\{m\}$  qui sont des différences de temps d'arrivée en différence de distances et donc de lier  $\{m\}$  à la position  $\{\theta_i\}$  du cachalot. En réalité, la célérité est variable en fonction de  $z$  formant un profil  $c(z)$ , on appelle  $\delta c_{c1}, \delta c_{c2}, \delta c_{c3}$  les valeurs moyennes des écarts entre  $c_0$  et  $c(z)$  le long des chemins acoustiques directs reliant le cachalot avec respectivement les hydrophones 1, 2 et 3.  $\alpha_3$  constitue la composante du vecteur  $\{\theta_s\}$  alors que les termes  $\delta c_{c1}, \delta c_{c2}$  et  $\delta c_{c3}$  seront intégrés dans le bruit de mesure.

*Le modèle de mesures:* Sous l'hypothèse d'une propagation acoustique rectiligne et mono-trajet entre le cachalot et les hydrophones, en notant  $z_0^3$  la profondeur de l'hydrophone  $h_3$  pour  $\alpha_3 = 0$ , un modèle de mesures reliant l'ensemble des paramètres peut être obtenu par de simples considérations géométriques. Ce dernier est défini par les équations suivantes.

$$\begin{aligned} \{m(1)\} &= \tau_{c2} - \tau_{c1} + e_1; \\ \{m(1)\} &= \frac{d_{c2}}{c_0} - \frac{d_{c1}}{c_0} + \delta\tau_{c2} - \delta\tau_{c1} + e_1; \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} d_{c2} &= \sqrt{(r_c - r_2)^2 + (z_c - z_2)^2}; \\ d_{c1} &= \sqrt{(r_c - r_1)^2 + (z_c - z_1)^2} \end{aligned} \quad (11)$$

$$\delta\tau_{c2} = -\frac{\delta c_{c1}}{c_0^2} d_{c2}; \quad \delta\tau_{c1} = -\frac{\delta c_{c2}}{c_0^2} d_{c1} \quad (12)$$

$$e_1 = \delta\tau_{c2} - \delta\tau_{c1} + b_1; \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \{m(2)\} &= \tau_{c3} - \tau_{c1} + e_2; \\ \{m(2)\} &= \frac{d_{c3}}{c_0} - \frac{d_{c1}}{c_0} + \delta\tau_{c3} - \delta\tau_{c1} + b_2; \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} d_{c3} &= \sqrt{(r_c - r_3)^2 + (z_c - z_3)^2} \\ &= \sqrt{(r_c - \sin(\alpha_3)z_3^0)^2 + (z_c - \cos(\alpha_3)z_3^0)^2} \end{aligned} \quad (15)$$

$$\delta\tau_{c3} = -\frac{\delta c_{c3}}{c_0^2} d_{c3}; \quad (16)$$

$$e_2 = \delta\tau_{c3} - \delta\tau_{c1} + b_2; \quad (17)$$

Les équations 12, 16 sont obtenues par développement limité à l'ordre 1 des quantités du type  $\frac{dc_i}{c_0 + \delta c_{ci}}$  par rapport à  $\frac{\delta c_{ci}}{c_0}$ . Les équations 13, 17 définissent le bruit de mesure complet sur les différences de temps d'arrivée entre capteurs en intégrant les erreurs d'estimation de temps de trajet et les erreurs dues à la mauvaise connaissance de la célérité dans le canal.

Cette partie a identifié les différents paramètres intervenant dans le problème de localisation des cachalots avec le système WACS. Il a abouti sur la donnée d'un modèle de mesures (le modèle M est donné par les équations 10, 11, 12, 14, 15, 16 auxquelles on retranche le terme  $e_1$  ou  $e_2$ ) à partir duquel il est possible d'appliquer directement les outils proposés dans la partie 2, soit:

$$\{M(1)\} = \frac{d_{c2}}{c_0} - \frac{d_{c1}}{c_0}; \quad \{M(2)\} = \frac{d_{c3}}{c_0} - \frac{d_{c1}}{c_0}; \quad (18)$$

## 4. Calcul des grandeurs nécessaires à l'évaluation des performances du système de localisation

Par soucis de concision, nous avons choisi dans cette partie de mettre l'accent sur les hypothèses sous lesquelles ont été faits les calculs des grandeurs nécessaires à l'évaluation des performances du système de localisation et de renvoyer aux références bibliographiques pour le développement des calculs lorsque ceux-ci nous ont paru plutôt complexes ou d'indiquer, dans le cas contraire, que ces calculs ne posent pas de problèmes particuliers. Afin d'appliquer les outils de théorie de l'estimation décrits dans la partie 2 au problème spécifique de la localisation des cachalots par le système WACS, il est nécessaire d'effectuer le calcul des matrices de sensibilité  $X_i$  et  $X_s$  (cf. équations 2 et 3) des mesures par rapport aux paramètres d'intérêt  $\{\theta_i\}$  et aux conditions expérimentales non maîtrisables  $\{\theta_s\}$ . Celles-ci sont obtenues en dérivant le modèle M de l'équation 18 par rapport à  $r_c, z_c$  et  $\alpha_3$ . Cette dérivation ne pose pas de problème et les résultats ne sont pas reportés dans ce papier.

L'application des outils de la partie 2 nécessite la connaissance de la matrice de covariance du bruit de mesure ( $e_1, e_2$ ) sur  $\{m\}$ , les expressions de  $e_1$  et  $e_2$  étant données respectivement par les équations 13 et 17. Les valeurs de bruit  $e_1$  et  $e_2$  sont constituées de contributions dues aux erreurs de célérités (termes du type  $\delta\tau_{ci}$ ) et de contributions dues aux erreurs d'estimation des différences de temps d'arrivée entre les hydrophones (termes  $b_1$  et  $b_2$ ). Cette dernière contribution est causée par le bruit ambiant et la forme des signaux émis par le cachalot. Le calcul de la matrice de covariance du vecteur de bruit  $\{e\}$  est fondamental pour l'évaluation des performances de localisation et mérite d'être détaillé.

Pour ce calcul, l'hypothèse d'indépendance entre les vecteurs  $e_c = (\delta\tau_{c3} - \delta\tau_{c1}, \delta\tau_{c2} - \delta\tau_{c1})$  et  $e_s = (b_2, b_1)$  est effectuée puisque *a priori* il n'existe pas de relation entre le bruit de



mesure des hydrophones et la méconnaissance de la célérité. Dans ce cas la matrice de covariance de  $\{e\}$  s'écrit comme la somme de la matrice  $C_{e_s}$ , matrice de covariance de  $\{e_s\}$  et de la matrice  $C_{e_c}$ , matrice de covariance de  $\{e_c\}$ .

#### 4.1. Évaluation de $C_{e_s}$ : matrice de covariance de $\{e_s\}$

Soit  $\{s_e\} = s_e(t), t \in [0, D]$  le signal émis par un cachalot. On suppose que chaque hydrophone recueille en fonction du temps un signal  $\{s_{h_i}\} = \{s_{h_i}(t), t \in [0, T]\}$ , le filtre passe bas à la fréquence  $0.5f_e$  et l'échantillonne à la fréquence  $f_e$  et enregistre ce signal sur  $N$  points de telle manière que les hydrophones voient entièrement la vocalise. Les mesures temporelles recueillies  $\{s_{h_3}\}, \{s_{h_2}\}, \{s_{h_1}\}$  par les trois hydrophones suivent le modèle suivant :

$$\begin{aligned} s_{h_1}(t) &= A_1 s_e(t - \tau_1) + \epsilon_1(t) ; \\ s_{h_2}(t) &= A_2 s_e(t - \tau_2) + \epsilon_2(t) ; \\ s_{h_3}(t) &= A_3 s_e(t - \tau_3) + \epsilon_3(t) ; t \in [0, \frac{N-1}{f_e}]. \end{aligned} \quad (19)$$

$\epsilon_1(t), \epsilon_2(t), \epsilon_3(t)$  sont les bruits de mesures des hydrophones constitués du bruit de capteur et du bruit de mer. Il est supposé que le bruit de mer est prépondérant. À partir des trois mesures  $\{s_{h_3}\}, \{s_{h_2}\}, \{s_{h_1}\}$ , le système doit estimer  $m(1) = \tau_2 - \tau_1$  et  $m(2) = \tau_3 - \tau_1$  et la matrice de covariance des estimées est celle de  $\{e_s\}$  puisque le seul bruit pris en compte est le bruit de mesure des signaux hydrophoniques. Le calcul de cette matrice de covariance  $C_{e_s}$  a été effectué sous les hypothèses suivantes :

- le signal émis par le cachalot est un clic hors d'axe obtenu à partir d'un enregistrement réel et porté à un niveau égal à 175 dB ref ( $1\mu\text{P}_{\text{rms}}\text{at}1\text{m}$ ), (la référence [Delory07] présente en détail les caractéristiques de ce signal) ;
- pour le problème d'estimation des temps d'arrivée relatifs  $s_e(t)$  est considéré comme un signal déterministe inconnu ;
- les bruits de mesures  $\epsilon_1(t), \epsilon_2(t), \epsilon_3(t)$  sont supposés blancs, gaussiens, indépendants ; la composante prépondérante du bruit est le bruit de mer et sa variance est égale au produit de la densité spectrale du modèle de Wenz (évaluée à la fréquence centrale du clic off-axis soit 4kHz pour une vitesse de vent égale à  $20\text{ms}^{-1}$ ) par la fréquence d'échantillonnage  $f_e$  ;
- les amplitudes des signaux reçus sont calculées en appliquant des pertes sphériques entre le cachalot et les hydrophones additionnées des pertes par atténuation dans l'eau de mer dont la formule est disponible dans la référence [APL94], de plus elles sont considérées comme des inconnues du problème.

Pour notre étude, nous avons supposé que la matrice de covariance  $C_{e_s}$  est égale à la matrice de Cramer Rao et son calcul a été effectué conformément à la référence [Kay93], pages 48 et 49.

#### 4.2. Évaluation de $C_{e_c}$ : la matrice de covariance de $\{e_c\}$

Cette sous-section s'intéresse à la matrice de covariance  $C_{e_c}$  des mesures des différences de temps de propagation lorsque la célérité dans le milieu est mal connue et que le temps de propagation est évalué par le rapport entre la distance et la célérité de l'onde.  $C_{e_c}$  est la matrice de covariance du vecteur  $e_c = (\delta\tau_{c3} - \delta\tau_{c1}, \delta\tau_{c2} - \delta\tau_{c1})$  et on rappelle que :

$$\delta\tau_{c3} = -\frac{\delta c_{c3}}{c_0^2} d_{c3} ; \delta\tau_{c2} = -\frac{\delta c_{c2}}{c_0^2} d_{c2} ; \delta\tau_{c1} = -\frac{\delta c_{c1}}{c_0^2} d_{c1} ; \quad (20)$$

Le calcul de la matrice  $C_{e_c}$  ne pose pas de problèmes particuliers dès que l'on a posé les hypothèses suivantes :

- puisque les hydrophones 1 et 2 sont proches,  $\delta c_{c2}$  (l'erreur de célérité le long du chemin cachalot – hydrophone 2) est parfaitement corrélée avec  $\delta c_{c1}$  (l'erreur de célérité le long du chemin cachalot – hydrophone 1),
- puisque les hydrophones 1 et 3 sont plutôt éloignés,  $\delta c_{c3}$  (l'erreur de célérité le long du chemin cachalot – hydrophone 3) est parfaitement décorrélée avec  $\delta c_{c1}$  (l'erreur de célérité le long du chemin cachalot – hydrophone 1),
- $\delta c_{c1}, \delta c_{c2}, \delta c_{c3}$  sont supposées suivre une loi gaussienne de moyenne nulle, d'une valeur égale à  $5\text{ms}^{-1}$  lorsque l'on ne possède pas de moyen de monitoring de l'environnement acoustique et égale à  $0.5\text{ms}^{-1}$  dans le cas contraire.

#### 4.3. Synthèse

À l'issue de cette partie, il faut noter que l'on possède une expression des matrices de sensibilité  $X_i$  et  $X_s$  ainsi qu'une expression de la matrice de covariance des mesures recueillies par le système WACS pour positionner les cachalots. Ces expressions ont été obtenues pour une configuration théorique que l'on a essayée de rapprocher au plus de la réalité en utilisant les signaux réellement émis par les cachalots, un bruit de mesure réaliste, en prenant en compte la dérive possible de l'hydrophone profond, les erreurs de connaissance de la célérité le long des trajets acoustiques liant le cachalot et les hydrophones ainsi que leur corrélation ou décorrélation suivant la proximité des trajets. Finalement toutes les quantités nécessaires à l'évaluation des performances de Loc3D ont été calculées et peuvent être utilisées dans les parties suivantes.

# 5. Prédiction de performances et dimensionnement de Loc3D

Grâce aux outils mis en place dans les parties précédentes, nous allons évaluer les performances de Loc3D et choisir la profondeur de l'hydrophone  $h_3$ . Cette étude se fera en deux phases distinctes. Dans la première, la position de l'hydrophone profond sera supposée connue exactement, nous incluerons une erreur sur la connaissance de la célérité égale à  $5 \text{ ms}^{-1}$  en écart-type, un clic « hors d'axe » d'une amplitude de  $175 \text{ dB ref}$  ( $1 \mu\text{P}_{\text{rms}}$  at 1 m) et un bruit ambiant créé avec une vitesse de vent égale à  $20 \text{ ms}^{-1}$ . Dans la seconde, on supposera que l'hydrophone profond peut dériver et que la prise d'inclinaison est mesurée avec un écart type de 1 et on étudiera l'influence du monitoring du profil de célérité.

## 5.1. Cas de référence: position de l'hydrophone profond parfaitement connue

Dans un premier temps, l'hydrophone profond est positionné en  $(r, z) = (0 \text{ m}, 300 \text{ m})$  alors que les deux hydrophones supérieurs sont positionnés en  $(r, z) = (-2 \text{ m}, 100 \text{ m})$  et

$(r, z) = (2 \text{ m}, 100 \text{ m})$ . Dans cette configuration géométrique, la figure 3 montre les performances de localisation en fonction de la position du cachalot. Les performances sont présentées sous la forme de lignes iso-(niveau d'erreur à 2 écart-types).

À partir de cette simulation et en analysant la cartographie d'erreur moyenne, on remarque que Loc3D possède un rayon d'action (défini comme la frontière de la zone de positionnement avec une erreur à deux écart-types inférieure à 50 m) relativement limité de l'ordre de grandeur de 500 mètres autour de l'antenne. Cette erreur moyenne est relativement bien répartie entre erreurs sur  $z_c$  et sur  $r_c$ . Pour  $r_c$ , Loc3D est précise dans une zone plutôt sous l'antenne alors qu'elle est précise pour  $z_c$  dans une zone face à l'antenne. Concernant l'estimation de l'élévation, Loc3D permet une localisation angulaire avec une erreur inférieure à  $10^\circ$  sur une zone de l'ordre du kilomètre autour de l'antenne WACS.

Afin de conclure sur les capacités en localisation de la composante Loc3D de l'antenne WACS, les simulations précédentes sont reprises pour plusieurs profondeurs de l'hydrophone  $h_3$  allant de 100m à 1000m par pas de 100m et les résultats sont reportés dans la figure 4.

La figure 4 présente les évolutions de la zone de bonne précision de Loc3D en fonction de la profondeur de l'hydrophone  $h_3$ . Pour une profondeur de  $h_3$  donnée, le contour délimite la zone de précision (à 2 écart-types) meilleure que 50 mètres. Autrement dit, la coordonnée (distance radiale en A et profondeur en B) de tout cachalot situé à l'intérieur du contour est mesurée avec un écart-type inférieur à 25 mètres.

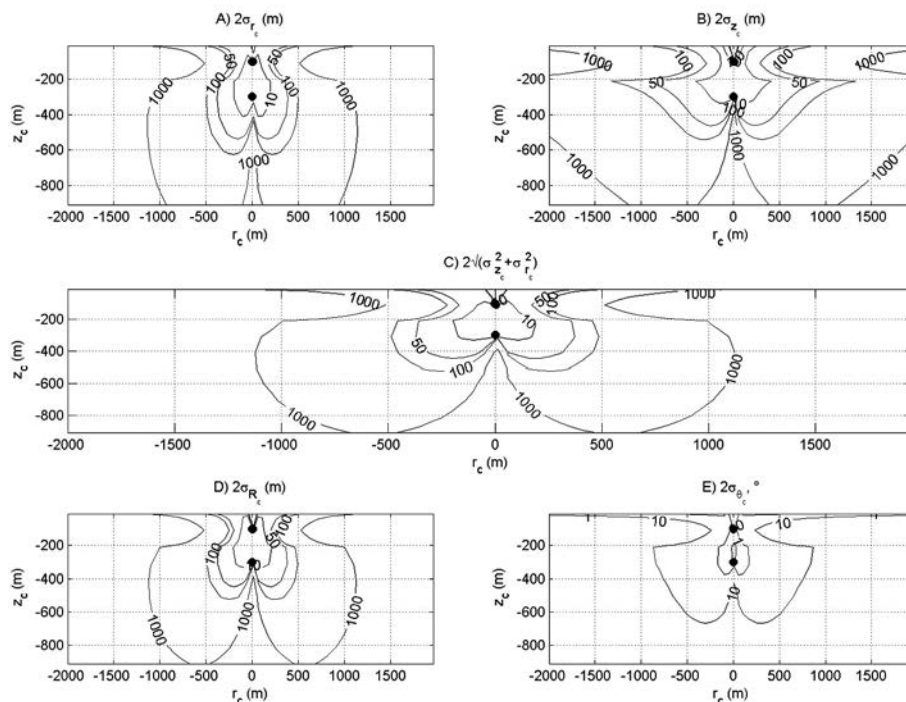


Figure 3. Performance en localisation, rond noir: positions des hydrophones (à l'échelle de la figure les deux hydrophones supérieurs apparaissent confondus), A) erreur de positionnement horizontal en m, B) erreur de positionnement vertical en m, C) erreur moyenne en m, D) erreur en distance radiale en m, E) erreur en site en  $^\circ$ .

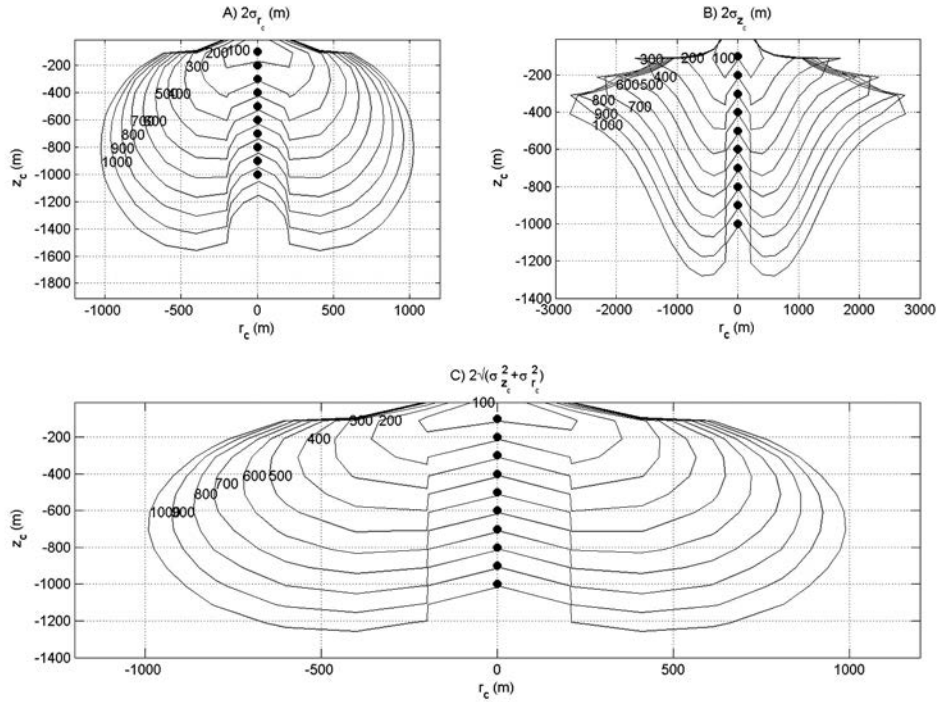


Figure 4. Performance en localisation, contour iso-erreur de localisation égale à 50 m, sur chaque contour est reportée la profondeur de l'hydrophone  $h_3$  en m, rond noir: positions des hydrophones (à l'échelle de la figure les deux hydrophones supérieurs apparaissent confondus), A) erreur de positionnement horizontal en m, B) erreur de positionnement vertical en m, C) erreur moyenne en m.

Il apparaît clairement que la zone de bonne précision de Loc3D augmente avec la profondeur de l'hydrophone profond et est approximativement une sphère de rayon égal à celle-ci (partie C, figure 4). Cependant des comportements sensiblement différents peuvent être observés si l'on s'intéresse à la précision en distance horizontale pour laquelle loc3D possède une faible précision (à cause de l'ouverture horizontale limitée du réseau) (partie A, figure 4) et une bonne précision en profondeur où l'on atteint des domaines d'utilisation de l'ordre de 3 kilomètres autour de WACS pour des profondeurs de cachalot entre 200 mètres et 600 mètres (partie B, figure 4). En oubliant la dérive de l'hydrophone  $h_3$ , le système est optimisé lorsque ce dernier est le plus profond possible.

## 5.2. Cas réel : position de l'hydrophone profond mal connue

Lorsque la dérive de l'hydrophone profond induit une prise d'inclinaison d'angle  $\alpha_3$  inconnu, Loc3D fournit 2 mesures indépendantes et exige d'estimer 3 paramètres (les coordonnées du cachalot et  $\alpha_3$ , les formules proposées dans la partie 2 (Eq 8) fournissent une matrice de Fisher mal conditionnée et des bornes de Cramer Rao infinies. Il est donc obligatoire que la prise d'inclinaison soit mesurée par un capteur spécifique. Dans cette partie, nous supposons posséder une mesure de  $\alpha_3$  suivant une loi gaussienne non biaisée et d'écart-type égal à 1 degré. Cette prise d'inclinaison va venir dégrader la précision de

Loc3D. En condition réelle d'utilisation de Loc3D dans un système anti-collision, compte tenu des vitesses et des inerties des navires la décision de déroutage du navire se fera à une distance supérieure à 500 mètres du cachalot à éviter. Ainsi sous cette contrainte, nous décidons que Loc3D doit mesurer sa position avec une erreur inférieure à 250 mètres (à 2 écarts-types) pour qu'elle puisse être intégrée au sein d'un système anti-collision. L'ensemble des positions de cachalots dont la position est mesurée avec une erreur inférieure à 250 mètres définit alors la zone de bonne précision.

### 5.2.1. Cas du profil de célérité non monitoré

Dans cette sous-section, nous supposons que le profil de célérité n'est pas monitoré et que celui-ci est remplacé par une valeur moyenne induisant une erreur de célérité égale à  $5 \text{ ms}^{-1}$ .

La figure 5 expose les performances de localisation en fonction de la profondeur de l'hydrophone  $h_3$  allant de 100 m à 1000 m. Contrairement au cas de la figure 4, une analyse rapide de la figure 5 montre que la zone de bonne précision de Loc3D ne croit plus uniformément avec la profondeur de l'hydrophone  $h_3$  sous l'influence de la prise d'inclinaison de l'hydrophone  $h_3$ . Afin d'étudier précisément l'influence de la prise d'inclinaison, on définit 3 quantités caractéristiques des zones de bonne précision pour les mesures de la distance radiale ( $r_c$ ) et de la profondeur ( $z_c$ ) du cachalot :

- l'aire de la zone de bonne précision ( $A_{r_c}$  pour la mesure de  $r_c$  et  $A_{z_c}$  pour la mesure de  $z_c$ ),

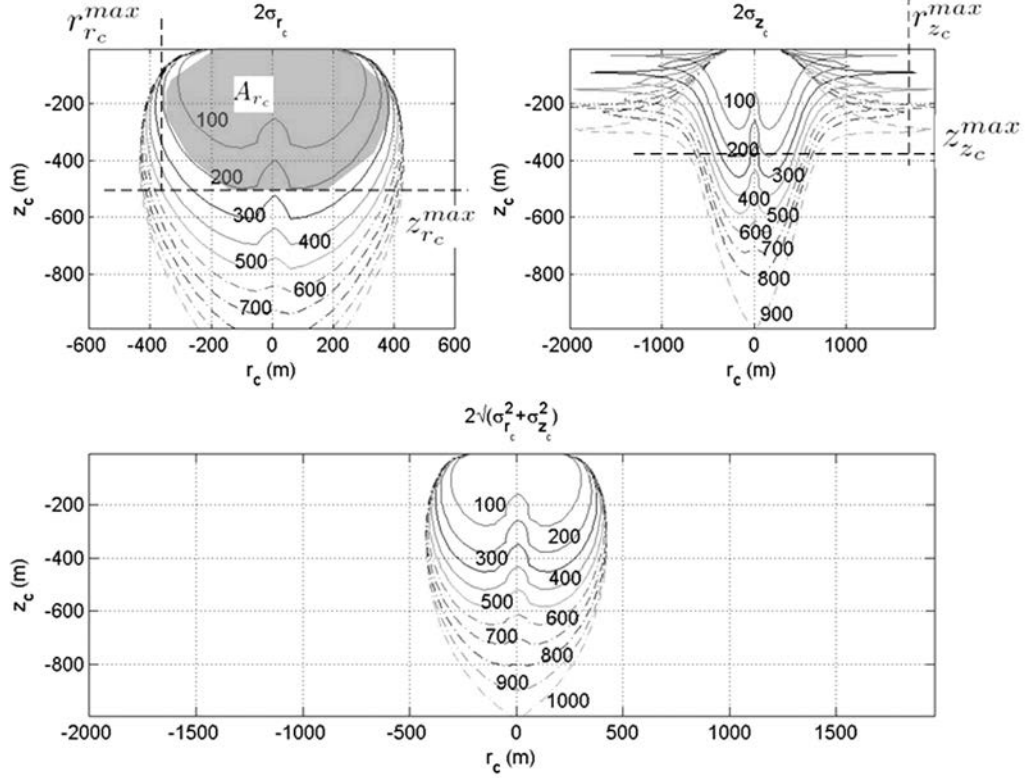


Figure 5. Performance en localisation, contour iso-erreur de localisation égale à 250 m, sur chaque contour est reportée la profondeur de l'hydrophone  $h_3$  en m, A) erreur de positionnement horizontal en m, B) erreur en profondeur en m, C) erreur moyenne en m.

- l'ouverture horizontale de la zone de bonne précision ( $r_c^{max}$  pour la mesure de  $r_c$  et  $r_{z_c}^{max}$  pour la mesure de  $z_c$ ),
- l'ouverture verticale de la zone de bonne précision ( $z_c^{max}$  pour la mesure de  $r_c$  et  $z_{r_c}^{max}$  pour la mesure de  $z_c$ ).

On trouve sur la figure 5 une illustration de ces grandeurs caractéristiques pour  $z_{h_3}$  égale à 200 mètres.

La figure 6 présente l'évolution des caractéristiques de la zone de bonne précision de Loc3D en fonction de  $z_{h_3}$  variant de 100 mètres à 2000 mètres par pas de 20 mètres.

#### Mesure de la position horizontale du cachalot

L'aire de la zone de bonne précision (figure 6, partie  $A_1$ ) croît avec  $z_{h_3}$ , cette croissance est créée par une augmentation de la profondeur de la zone de bonne précision (figure 6, partie  $C_1$ ). La profondeur de la zone de précision est de l'ordre de grandeur de la profondeur  $z_{h_3}$ . Par contre, la partie  $B_1$  de la figure 6 montre l'effet principal de la prise d'inclinaison de l'hydrophone  $h_3$ . Celle-ci limite l'ouverture horizontale de la zone de bonne précision à une valeur de 400 mètres indépendamment de la profondeur de l'hydrophone  $h_3$  si celle-ci est supérieure à 500 mètres.

#### Mesure de la profondeur du cachalot

L'aire de la zone de bonne précision (figure 6, partie  $A_2$ ) croît avec  $z_{h_3}$  jusqu'à 1300 mètres puis se stabilise pour les profondeurs supérieures. La profondeur de la zone de précision est de l'ordre de grandeur de la profondeur  $z_{h_3}$ . Pour l'ouverture horizontale (figure 6, partie  $B_2$ ), des maxima locaux apparaissent

avec  $z_{h_3}$ . Ainsi une profondeur  $z_{h_3}$  égale à 380 mètres optimise la portée horizontale de Loc3D tout en réduisant la complexité du système en limitant la profondeur d'immersion des instruments.

Dans le cas d'un profil de célérité non monitoré, Loc3D mesure assez bien la profondeur des cachalots, par contre elle est peu précise pour la mesure de la position horizontale et possède un rayon d'action limité à 500 mètres.

#### 5.2.2. Cas du profil de célérité monitoré

Dans cette sous-section, nous supposons qu'un effort particulier est porté au monitoring des grandeurs afin d'améliorer la précision de Loc3D. Le profil de célérité est monitoré avec une erreur de célérité égale à  $0.5 \text{ ms}^{-1}$  et la prise d'inclinaison est supposée connue avec un écart-type égal à 0.5.

La figure 7 présente l'évolution des caractéristiques de la zone de bonne précision de Loc3D en fonction de  $z_{h_3}$ .

#### Mesure de la position horizontale du cachalot

L'aire de la zone de bonne précision (figure 7, partie  $A_1$ ) croît avec  $z_{h_3}$ , cette croissance est forte pour  $z_{h_3}$  inférieure à 600 mètres et plus limitée pour les profondeurs supérieures. La profondeur de la zone de précision croît avec  $z_{h_3}$  jusqu'à 500 mètres et se stabilise après à une valeur constante égale à 1900 mètres. Par contre, la partie  $B_1$  de la figure 6 montre que l'ouverture horizontale de la zone de bonne précision croît avec  $z_{h_3}$  et est de l'ordre de grandeur de  $z_{h_3}$ .

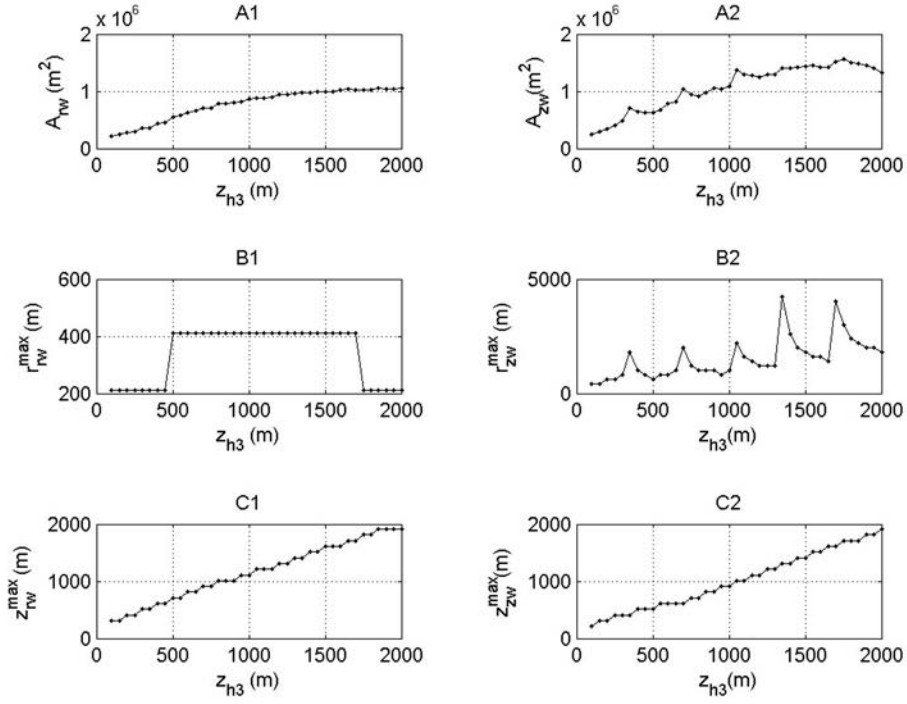


Figure 6. Caractéristiques de la zone de bonne précision; A1 : aire  $A_{rc}$ ; A2 : aire  $A_{zc}$ ; B1 : ouverture horizontale  $r_{rc}^{max}$ ; B2 : ouverture horizontale  $r_{zc}^{max}$ ; C1 : ouverture verticale  $z_{rc}^{max}$ ; C2 : ouverture verticale  $z_{zc}^{max}$ .

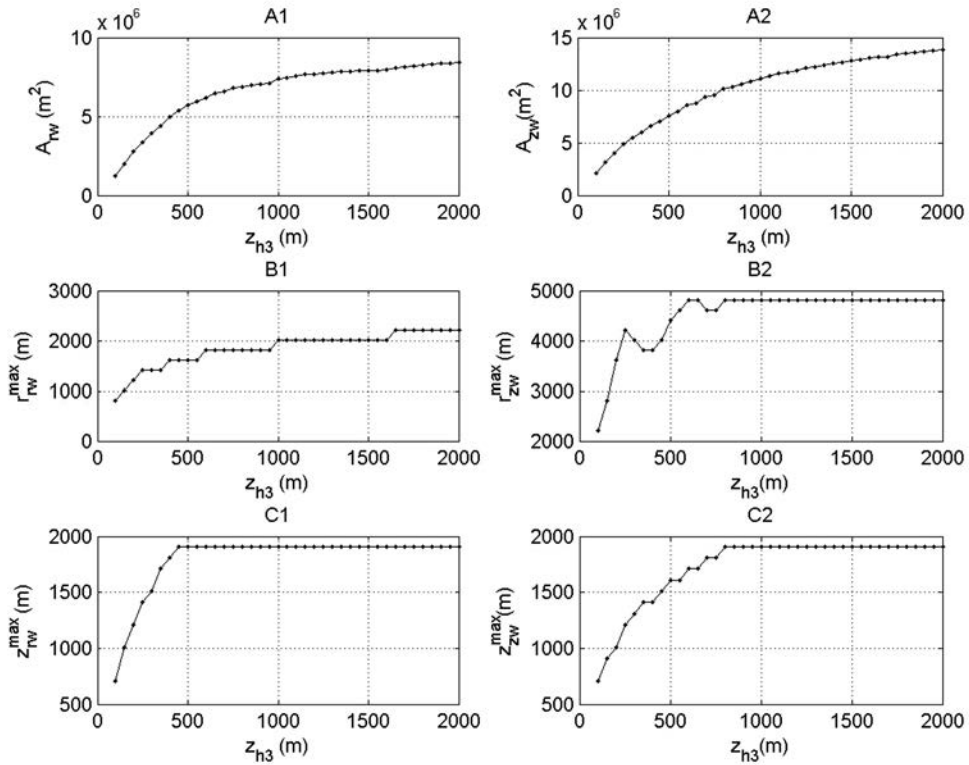


Figure 7. Caractéristiques de la zone de bonne précision; A1 : aire  $A_{rc}$ ; A2 : aire  $A_{zc}$ ; B1 : ouverture horizontale  $r_{rc}^{max}$ ; B2 : ouverture horizontale  $r_{zc}^{max}$ ; C1 : ouverture verticale  $z_{rc}^{max}$ ; C2 : ouverture verticale  $z_{zc}^{max}$ .

### Mesure de la profondeur du cachalot

L'aire de la zone de bonne précision (figure 7, partie  $A_2$ ) croît uniformément avec  $z_{h_3}$ . La profondeur de la zone de précision croît avec  $z_{h_3}$  pour se stabiliser à partir de 800 mètres. Pour l'ouverture horizontale (figure 7, partie  $B_2$ ), des maxima locaux apparaissent avec  $z_{h_3}$  et leurs valeurs croissent avec  $z_{h_3}$  puis celle-ci se stabilise à partir de 800 mètres.

La connaissance du profil de célérité et une bonne mesure de la prise d'inclinaison permettent d'améliorer les performances de Loc3D, le gain principal étant l'augmentation de la portée horizontale. Une profondeur  $z_{h_3}$  égale à 800 mètres optimise les performances. Le rayon d'action horizontal de Loc3D est alors de 2000 mètres pour le positionnement horizontal du cachalot et de 4800 mètres pour le positionnement vertical. L'utilisation d'une chaîne de thermistances le long du câble de suspension de l'hydrophone  $h_3$  ou le recours aux procédés de tomographie acoustique passive (permettant d'identifier les paramètres du milieu à partir des sources acoustiques d'opportunité présentes dans le milieu [Gervaise07], [Vallez07]) sont deux solutions qui peuvent être proposées pour mesurer *in situ* et en continu le profil de célérité.

D'autre part, il faut garder en tête que la position de localisation a été évaluée en utilisant un seul clic alors que les cachalots émettent continuellement un train de clic avec des périodes de répétitions de l'ordre de la seconde. Ainsi le positionnement du cachalot peut être amélioré en moyennant les estimées sur plusieurs clics. Dans ce cas, l'écart-type de l'erreur sera divisé par la racine carrée de l'erreur de positionnement et les dimensions de la zone de précision seront augmentées du même facteur.

## 6. Conclusions et Perspectives

Dans ce papier, nous nous sommes intéressés à la proposition d'outils issus de la théorie de l'estimation permettant l'évaluation des performances et le dimensionnement de systèmes expérimentaux. Ceux-ci ont été appliqués à la composante Loc3D du système WACS, système de localisation passif des cachalots vocalisants afin de contribuer à réduire les collisions avec les navires. Bien que théorique, notre approche s'est attachée à se rapprocher au mieux de la réalité en utilisant les signaux réellement émis par les cachalots, un bruit de mesure réaliste, en prenant en compte la dérive possible de l'hydrophone profond, les erreurs de connaissance de la célérité le long des trajets acoustiques liant le cachalot et les hydrophones ainsi que leur corrélation ou décorrélation suivant la proximité des trajets.

Sur la base de la composante Loc3D du système WACS et lorsque l'on ne mesure pas *in situ* le profil de célérité, nous avons démontré que Loc3D est un bon outil d'étude pour les biologistes, qu'il procure une bonne précision de mesure des profondeurs des cachalots mais présente une précision limitée pour le positionnement horizontal. La position de l'hydrophone profond a été optimisée et une profondeur de 350 mètres produit un bon compromis. Cependant lorsque l'on s'intéresse au positionnement horizontal des cachalots sur une zone géographique étendue dans l'optique d'un système anti-collision, la composante Loc3D n'est pas assez précise et possède un rayon d'action trop limité (250 mètres).

Sur la base de la composante Loc3D du système WACS et lorsque l'on mesure *in situ* le profil de célérité, nous avons démontré que un système WACS seul est assez précis pour être intégré au sein d'un réseau anti-collision entre cachalots et navires. Pour cela l'hydrophone  $h_3$  doit être porté à une profondeur de 800 mètres et le rayon d'action horizontal du système WACS est alors de 2000 mètres. La maille du réseau de systèmes WACS constituant un système anti-collision sur une zone marine donnée est alors égale à 4000 mètres.

Afin d'agrandir cette maille et grâce aux derniers travaux menés en classification des trains de clic émis par les cachalots ([Van der Schaar07a], [Van der Schaar07b]), il est possible d'envisager l'utilisation des mesures de deux composantes Loc3D consécutives dans le réseau afin d'améliorer la précision de localisation des cachalots ou de moyennner les positions estimées avec plusieurs clics de cachalots consécutifs. Sous cette hypothèse, les outils développés dans cette publication peuvent être utilisés pour dimensionner la maille du réseau (des travaux préliminaires menés par notre équipe montrent que l'on peut alors obtenir une maille élargie égale à 10 kilomètres, les résultats seront exposés dans [Andre08]).

Les perspectives de nos travaux s'articulent principalement autour du déploiement à la mer du système WACS. Un prototype d'antenne WACS a été développé, testé à la mer en milieu peu profond à partir d'émissions actives synthétiques issues de pinger, la phase de test du système unitaire et de la mise en réseau de 2 systèmes WACS en eaux profondes constituent les perspectives à courts termes de nos travaux et pourrait avoir lieu au sein du Réseau d'Excellence Européen Esonet. De même, la mise en réseau de deux systèmes WACS inter-dépendants, c'est-à-dire capables de relayer l'analyse temporelle de réception des clics appartenant à un même individu d'un système à un autre, est à l'étude pour vérifier sa viabilité et sa capacité d'augmenter la maille du réseau pour un même niveau de performance. L'utilisation de la tomographie acoustique passive au sein du système WACS afin de mesurer *in situ* et en continu le profil de célérité constitue une perspective à moyen terme de nos travaux.

# Références

- [Andre04a] M. ANDRÉ, E. DELORY, M. VAN DER SCHAAR, « A passive acoustic solution to 3D whale monitoring », *Proceeding of Sea-Tech Week2004*, Brest, France, 2004.
- [Andre04b] M. ANDRÉ, E. DELORY, M. VAN DER SCHAAR, « A passive mitigation solution to the effects of human-generated sound on marine mammals », *Policy on Sounds and Marine Mammals: an International Workshop*, London, England, 2004.
- [Andre05] M. ANDRÉ, E. DELORY, M. VAN DER SCHAAR, J.V. CASTELL, « On the possibility of detecting and tracking echolocating whales by passive acoustics and ambient noise imaging », *19th Conference of the European Cetacean Society*, La Rochelle, France, 2005.
- [Andre07] M. ANDRÉ, T. JOHANSSON, E. DELORY, M. VAN DER SCHAAR, « Foraging on squid: the sperm whale mid-range sonar », *J. Mar. Biol. Ass U.K.*, 87, 59-67, 2007.
- [Andre08] M. ANDRÉ, C. GERVAISE, E. DELORY, M. VAN DER SCHAAR, « A real-time non-intrusive acoustic solution for 3D whale tracking », soumis *J. Mar. Bio. Ass U. K.*
- [APL94] APL-UW, « High-frequency Ocean Environmental Acoustic Models Hand Book », *Technical Report APL-UW TR9407 AEAS 9501*, 1994.
- [Backus66] R.H. BACKUS, W.E. SCHEVILL, « Physeter clicks », *Whales, Dolphins and Porpoises*, (ed. K.S. Norris) pp. 510-528. Univ. Calif. Press, Berkeley, 1966.
- [Delory03] E. DELORY, J. L. NAVARRO-MESA, M. ANDRÉ, « Using sperm whale clicks to detect silent whales », *proceeding 17th Annual Conference of the European Cetacean Society*, Las Palmas de Gran Canaria, Espagne, 1993.
- [Delory07] E. DELORY, M. ANDRÉ, J.-L. NAVARRO MESA, M. VAN DER SCHAAR, « On the possibility of detecting surfacing sperm whales at risk of collision using othersí foraging clicks », *J. Mar. Biol. Ass. U.K.*, 87, 47-58 (2007).
- [Gervaise99] C. GERVAISE, « Caractérisation thermique multi-échelles de revêtements réfractaires – Comportement sous excitation périodique et identification par méthodes inverses », *Thèse de Université Paul Sabatier*, Toulouse, 26 Octobre 1999.
- [Gervaise07] C. GERVAISE, S. VALLEZ, C. IOANA, Y. STEPHAN, Y. SIMARD, « Passive acoustic tomography: new concepts and applications using marine mammals », *J. Mar. Biol. Ass U.K.*, (2007), 87, 5-10.
- [Gaucher04] D. GAUCHER, « Étude des potentialités de la tomographie acoustique océanique passive », *Thèse de l'université de Bretagne Occidentale, ED SMIS 0373*, Brest, 19 janvier 2005.
- [Kay93] S.M. KAY, « Fundamentals of Statistical Signal Processing: Estimation Theory », *Prentice Hall PTR*, 1993.
- [Laplanche05a] C. LAPLANCHE, O. ADAM, M. LOPATKA, J.F. MOTSCH, « Measuring the off-axis angle and rotational movements of phonating sperm whales using a single hydrophone », *J. Acoust. Soc. Am.*, 119(2005)(5).
- [Laplanche05b] C. LAPLANCHE, O. ADAM, M. LOPATKA, J.F. MOTSCH, « Male sperm whale acoustic behaviour observed from multi paths at a single hydrophone », *J. Acoust. Soc. Am.*, 118(2005)(4).
- [Mohl03] B. MOHL, M. WAHLBERG, P.T. MADSEN, A. HEERFORDT, A. LUND, « The monopulsed nature of sperm whale clicks », *Journal of the Acoustical Society of America*, 114, 1143-1154, 2003.
- [Vallez07] S. VALLEZ, C. GERVAISE, A. KHENCHAF, Y. STEPHAN, M. ANDRÉ, « Inversion géoacoustique d'un canal très petit fond à partir des navires en mouvement – traitement incohérent », présent numéro de la revue *Traitement du Signal*.
- [Van der Schaar07a] M. VAN DER SCHAAR, E. DELORY, A. CATALÀ, M. ANDRÉ, « Neural network-based sperm whale click classification », *J. Mar. Biol. Ass U.K.*, 87, 35-38, (2007).
- [Van der Schaar07b] M. VAN DER SCHAAR, E. DELORY, J. VAN DER WEIDE, C. KAMMINGA, J.C. GOOLD, N. JAQUET, M. ANDRÉ, « A comparison of model and non-model based time-frequency transforms for sperm whale click classification », *J. Mar. Biol. Ass U.K.*, 87, 27-34, 2007
- [Worthington57] L.V. WORTHINGTON, W.E. SCHEVILL, « Underwater sounds heard from sperm whales », *Nature*, 180, 291, 1957.