

# Utilisation de la diffraction acoustique pour la détection de fond

Using acoustic diffraction  
to determine the seabed slope

**Vincent Creuze, Olivier Parodi**

LIRMM, Université Montpellier II / CNRS, 161 rue Ada, 34392 Montpellier Cedex 5, France  
E-mail : vincent.creuze@lirmm.fr, olivier.parodi@lirmm.fr

**Manuscrit reçu le 20 novembre 2006**

**Résumé et mots clés**

En tenant compte du profil de rétrodiffusion acoustique du fond marin, nous montrons que, sous certaines conditions d'inclinaison d'un transducteur monofaisceau, il est possible d'exploiter le ou les lobes secondaires du faisceau acoustique diffracté afin de déterminer non seulement la distance du fond marin par rapport au capteur mais aussi son inclinaison relative (dans l'espace à 2 ou 3 dimensions). Cette propriété peut être exploitée à bord des petits véhicules autonomes sous-marins pour accomplir du suivi de fond.

**AUV, robotique sous-marine, navigation, détection d'obstacle, diffraction, suivi de fond.**

**Abstract and key words**

In this paper, we present a new seabed detection method based on the use of a single beam electro-acoustic transducer (echo sounder). This method uses both acoustic diffraction and bottom backscattering properties to determine the 2D or 3D equation for seabed slopes. It can thus be used for bottom tracking (e.g. for autonomous underwater vehicles). In comparison to existing sonar-based processes, our method offers the advantages of mono-beam transducers: low computational cost, lower power consumption and higher sampling rate.

**AUV, Undersea Robotics, navigation, obstacle detection, diffraction, bottom tracking.**



# 1. Introduction

Depuis quelques années, les applications des véhicules autonomes sous-marins (A.U.V. Autonomous Underwater Vehicles) se sont multipliées, notamment dans les zones de très petits fonds (de l'ordre de la dizaine de mètres). Les principales problématiques sur lesquelles ont porté les études récentes sont le positionnement [1,2], l'évitement d'obstacle [3,4], le suivi de fond [5] et la reconnaissance de cibles [6]. Dans la plupart de ces applications, la perception de l'environnement repose sur l'utilisation d'un sonar multifaisceaux, d'un sonar frontal à balayage, d'un sonar latéral ou d'un sonar interférométrique. Dans tous les cas, le capteur employé consomme une part importante des ressources énergétiques et diminue la charge utile et l'autonomie du véhicule, qui voit son intérêt en tant que vecteur d'instrumentation scientifique réduit. Ce problème devient crucial dans le cas des petits AUV tels que les véhicules Gavia [17], Remus [18], Bluefin-9 ou encore TAIPAN [7].

Pour des applications du suivi de fond telles que l'imagerie sonar ou vidéo, nous avons développé une nouvelle approche basée sur la diffraction du faisceau acoustique émis par un transducteur monofaisceau. Ce type de capteur très compact et nécessitant peu de puissance est rarement utilisé à bord des AUV dans la mesure où il ne délivre qu'une seule information, insuffisante pour faire du suivi de fond : la distance du premier obstacle situé sur son axe. Cependant, lorsque les dimensions d'un transducteur électroacoustique monofaisceau (sondeur) sont du même ordre de grandeur que la longueur d'onde de l'onde émise, le faisceau est diffracté. Selon la forme du transducteur, un ou plusieurs lobes secondaires apparaissent. Dans les conditions habituelles d'utilisation, ce défaut est négligé. Néanmoins, les lobes secondaires peuvent être exploités si l'on tient compte des propriétés de rétrodiffusion du fond. Sous certaines conditions d'inclinaison du transducteur, nous avons montré qu'il était possible de déterminer la distance et la pente du fond marin en analysant l'écho acoustique renvoyé par le fond. Des essais en milieu naturel nous ont permis de valider cette méthode. Dans cet article, nous détaillons les aspects théoriques et expérimentaux de cette nouvelle méthode de détection. Nous précisons également les critères de choix de la durée d'émission en tenant compte du niveau de bruit ambiant.

## 2. Caractéristiques des signaux émis et reçus

### 2.1 Hypothèses

On considère le cas d'un véhicule autonome sous-marin côtier dont l'avant est équipé d'un transducteur électroacoustique. On

note  $\psi$  l'angle d'orientation entre l'axe du véhicule et celui du transducteur. On suppose que le véhicule se déplace à tangage nul. On note  $\xi$  l'angle entre le fond marin et l'axe du transducteur (Fig. 1). Le signal acoustique émis est une impulsion monochromatique à bande étroite (ping ou burst), c'est-à-dire un train sinusoïdal de fréquence  $f = 200\text{kHz}$  et de durée  $\tau$ . Étant donné le domaine d'utilisation de l'AUV (immersion  $< 60\text{m}$ ), on peut considérer que les ondes acoustiques se propagent dans la strate homogène (mixed layer) du profil bathycélérimétrique et ne sont donc pas réfractées.

On considère par ailleurs que l'AUV est suffisamment proche du fond et se trouve à une immersion telle que les échos dus à d'éventuels trajets multiples ne parviennent au transducteur qu'après l'extinction de l'écho acoustique rétrodiffusé par le fond. Compte tenu de l'orientation du transducteur proche de  $\psi = 60^\circ$ , cette hypothèse est vérifiée dès lors que  $z_{auv} \gg z_{fond} / (1 + \frac{\sqrt{3}}{2})$ , où  $z_{auv}$  est la profondeur d'immersion de l'AUV et  $z_{fond}$  est la profondeur à laquelle se trouve le fond marin.

Dans un premier temps, on étudiera le problème dans l'espace à deux dimensions et la pente du fond sera définie comme étant l'angle du fond par rapport à l'horizontale.

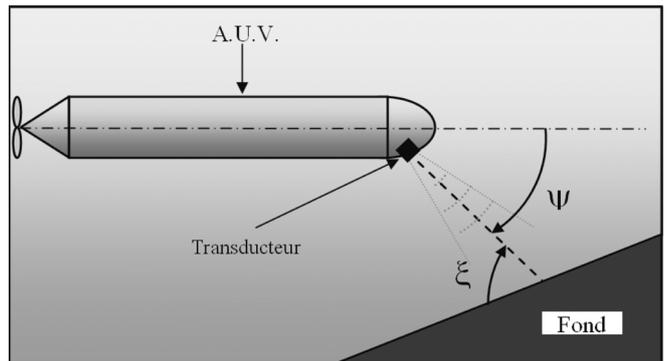


Figure 1. Le véhicule autonome sous-marin et son transducteur.

### 2.2 Diffraction acoustique dans le cas d'un émetteur circulaire

Lorsque les dimensions de l'ouverture d'un transducteur sont du même ordre de grandeur que la longueur d'onde  $\lambda$  du signal émis, alors le faisceau est diffracté (à 200kHz, on a  $\lambda = 7,5\text{mm}$ ). La figure de diffraction obtenue est couramment appelée directivité du transducteur. Dans la zone de Fraunhofer (zone distante de l'émetteur de plus de  $A/\lambda$ , où  $A$  est l'aire de la surface émettrice), l'application du principe de Huyghens-Fresnel nous donne la directivité de l'émetteur en fonction de l'angle  $\theta$  compté par rapport à la normale au transducteur. Dans le cas d'une surface d'émission circulaire, on a [10]:

$$Directivite(\theta) = \left( \frac{2J_1((\pi D/\lambda)\sin\theta)}{(\pi D/\lambda)\sin\theta} \right)^2 \quad (1)$$

où  $J_1()$  est la fonction de Bessel de premier ordre,  $\lambda$  est la longueur d'onde,  $D$  est le diamètre de l'ouverture du transducteur. La figure de diffraction obtenue porte le nom de figure d'Airy (Fig. 2). Au centre, on observe un lobe principal entouré d'une couronne qui constitue le lobe secondaire. L'atténuation du lobe secondaire par rapport au lobe principal vaut -17,7 dB [13]. Les autres lobes décroissent très rapidement et sont négligeables. Pour la suite, on notera  $Directivite_{dB}(\theta)$  la part d'atténuation acoustique due à la diffraction :

$$Directivite_{dB}(\theta) = 10 \log \left( \frac{2J_1((\pi D/\lambda) \sin \theta)}{(\pi D/\lambda) \sin \theta} \right)^2$$

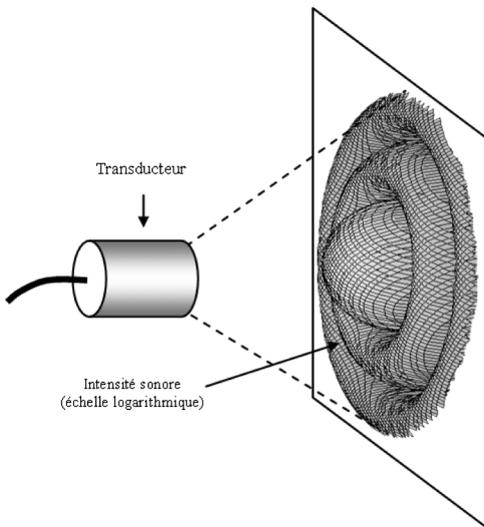


Figure 2. Intensité du faisceau émis par un transducteur à ouverture circulaire.

### 2.3 Pertes de transmission

L'intensité sonore  $I(R, \theta)$  émise à une distance  $R$ , dans la direction  $\theta$  vaut [13] :

$$I(R, \theta) = I_0(R) \cdot Directivite(\theta) \quad (2)$$

$I_0(R)$  correspond à l'intensité sonore sur l'axe du faisceau à la distance  $R$  du transducteur, c'est-à-dire au niveau d'intensité sonore d'émission  $SL$  (Source Level) affecté des pertes de transmission  $TL$  (Transmission Loss). Ces pertes sont dues à l'atténuation sphérique de l'onde et à la dissipation d'une partie de l'énergie du fait de la viscosité de l'eau et de la relaxation des molécules d'acide borique et de sulfate de magnésium présentes dans la mer.

$$TL = 10 \log R^2 + \alpha \cdot 10^{-3} \cdot R \quad (3)$$

où  $R$  est la distance en mètres et  $\alpha$  est le coefficient d'absorption (en dB/km). Lorsque la fréquence vaut 200kHz,  $\alpha$  est compris entre 40 et 90dB/km selon la température [13].

### 2.4 Rétrodiffusion

Lorsque l'onde acoustique heurte le fond, elle est diffusée, c'est-à-dire renvoyée dans plusieurs directions (signal dit diffus ou incohérent). Une partie est rétrodiffusée, c'est-à-dire renvoyée dans la direction de l'émetteur. Il n'existe pas de modélisation générale de la diffusion incohérente dans le cas d'un fond rugueux. Lorsque  $f = 200kHz$ , la pénétration de l'onde acoustique dans le sédiment est très faible. De plus,  $\lambda$  est faible devant les dimensions caractéristiques du relief et le problème devient analogue à celui de la réflexion par une surface non plane [13]. On note  $IF$  l'indice surfacique de rétrodiffusion. Cet indice traduit la quantité d'énergie diffusée dans une direction donnée, par unité de surface ( $1m^2$ ) rapportée à l'énergie incidente [13]. Il dépend de l'angle  $\varphi$  entre l'onde incidente et la normale au fond marin (fig. 3). Pour les angles d'incidence supérieurs à  $25^\circ$ , le niveau  $IF$  peut être approximé par la loi de Lambert [11] :

$$IF = IF_0 + 20 \log(\cos \varphi_i) \quad (4)$$

où  $IF_0$  est une constante dépendant de la nature du fond (dureté, granularité...) et  $\varphi_i$  est l'angle d'incidence locale de l'onde acoustique.

Pour les angles d'incidences inférieurs à  $25^\circ$ ,  $IF$  est obtenu en calculant :

$$IF = IF_N + \frac{\varphi_i}{\varphi_0} (IF_0 - IF_N + 20 \log(\cos \varphi_0)) \quad (5)$$

où  $IF_N$  correspond à la valeur de  $IF$  en incidence normale,  $IF_0$  est la même constante que dans (4),  $\varphi_0$  est l'angle de transition ( $= 25^\circ$ ) et  $\varphi_i$  est l'angle d'incidence. L'indice surfacique de rétrodiffusion  $IF$  est exprimée en  $dB/m^2$  [13]. Comme pour  $IF_0$ , la valeur de  $IF_N$  dépend de la nature du fond. De nombreux exemples sont donnés dans [16].

Dans les équations habituellement utilisées pour dimensionner les sonars, on rencontre souvent la notation  $IC$  pour Indice de

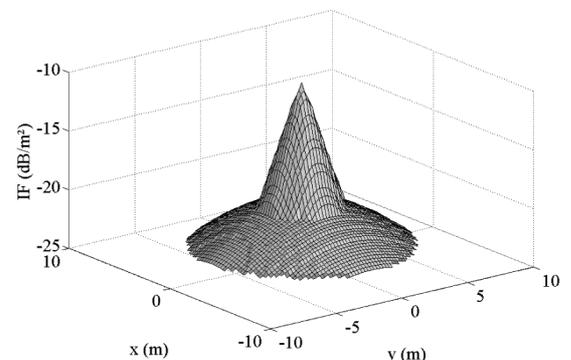


Figure 3. Indice surfacique de rétrodiffusion en fonction de l'angle d'incidence.

Cible (ou TS pour Target Strength) défini comme  $IC = 10 \log(I_{reemis}/I_{incident})$ . Avec les notations précédentes,  $IC$  correspondrait à  $IC = IF + 10 \log S$  [13] où  $S$  correspond à la surface insonifiée sur le fond marin. Dans ce qui suit, nous n'utiliserons pas  $IC$  mais  $IF$  puisqu'il s'agit justement d'intégrer les contributions surfaciques de la zone insonifiée.

Par ailleurs, compte tenu de la faible vitesse de déplacement d'un petit AUV (de l'ordre de 2m/s), on négligera l'effet Doppler lors de la rétrodiffusion.

## 2.5 Détermination de l'écho acoustique

Pour déterminer l'intensité de l'écho acoustique reçu au niveau du transducteur, il faut intégrer l'ensemble des échos rétrodiffusés par chaque parcelle de la zone insonifiée. Pour chaque élément de surface  $dx dy$ , l'atténuation totale  $H(x, y)$  du signal incohérent rétrodiffusé est différente et dépend de l'atténuation  $Directivite_{dB}(x, y)$  due à la directivité de l'émetteur (2), des pertes de transmission  $TL(x, y)$  à l'aller et au retour (3) et de l'indice surfacique de rétrodiffusion  $IF(x, y)$ . On obtient :

$$H(x, y) = Directivite_{dB}(x, y) - 2TL(x, y) + IF(x, y) \quad (6)$$

L'atténuation  $H$  étant exprimée en dB, on détermine comme suit la pression acoustique  $s(t)$  de l'écho perçu par le transducteur :

$$s(t) = \int \int_S e(t - \Delta t(x, y)) 10^{\frac{H(x, y)}{20}} e^{j\varphi(x, y)} dx dy \quad (7)$$

où  $e(t)$  est la pression acoustique du ping émis par le transducteur,  $\varphi(x, y)$  est un déphasage aléatoire gaussien de moyenne nulle et d'écart-type  $\sigma$  dû à la rugosité du fond,  $S$  désigne la zone insonifiée par le faisceau émis,  $(x, y)$  sont les coordonnées sur le fond marin et  $\Delta t(x, y)$  est le temps de vol défini par :

$$\Delta t(x, y) = 2 \frac{R(x, y)}{c} \quad (8)$$

où  $c$  est la vitesse du son dans l'eau et  $R(x, y)$  est la distance entre le transducteur et le fond.

À l'aide de  $F = e^{-\frac{\sigma^2}{2}}$ , la fonction caractéristique de  $\varphi(x, y)$ , on peut calculer l'espérance  $E(s(t))$  en fonction de  $\hat{s}(t)$ , où  $\hat{s}(t)$  serait la fonction déterministe représentant l'écho si la rétrodiffusion se faisait sans déphasage. On obtient :  $E(s(t) - \hat{s}(t)) = (e^{-\frac{\sigma^2}{2}} - 1)\hat{s}(t)$  et puisque  $\hat{s}(t)$  est déterministe, on obtient :  $E(s(t)) = \hat{s}(t)e^{-\frac{\sigma^2}{2}}$  ce qui prouve que le déphasage aléatoire  $\varphi(x, y)$  n'introduit pas de déformation de l'écho reçu mais atténue son amplitude.

# 3. Détermination de l'inclinaison du fond

## 3.1 Principe

Dans le faisceau acoustique émis, l'intensité sonore du lobe secondaire est très inférieure ( $-17,7dB$ ) à celle du lobe principal (Fig. 2). Qui plus est, dans les conditions habituelles d'utilisation des sondeurs (transducteur orienté verticalement vers le bas), le lobe secondaire heurte le fond en incidence rasante ce qui atténue fortement l'écho rétrodiffusé, le rendant négligeable ( $-40$  à  $-60$  dB par rapport à l'écho principal). En revanche, si le transducteur est orienté d'un angle correspondant à l'écart angulaire entre le lobe principal et le lobe secondaire (Fig. 4), alors ce dernier heurte le fond en incidence normale et le lobe principal en incidence rasante. Ainsi, lors de la rétrodiffusion, le lobe principal est beaucoup plus atténué ( $-25dB$  à  $-40dB$ ) que le lobe secondaire ( $BS_N = -10dB$  à  $-25dB$  selon la nature du fond) ce qui a pour conséquence un rééquilibrage relatif des niveaux d'intensité sonore des échos des deux lobes. La différence de parcours des deux lobes et les pertes de transmission  $TL$  liées contribuent aussi à ce rééquilibrage. Bien qu'encore inférieur au lobe principal, l'écho du lobe secondaire n'est plus négligeable et son niveau d'intensité sonore est détectable. À droite de la figure 4, on observe  $H(x, y)$  l'atténuation (au niveau du transducteur) de l'écho reçu en fonction de sa provenance au sein de la zone insonifiée. On voit clairement apparaître les deux lobes et l'on constate que dans la zone d'incidence normale, l'écho du lobe secondaire est moins atténué. Si l'on applique (7) à l'ensemble de la zone insonifiée, on obtient l'évolution temporelle de l'écho acoustique, dont la figure 5 représente uniquement l'enveloppe. On observe que les échos du lobe principal et du lobe secondaire apparaissent distinctement. En mesurant les instants d'occurrence de ces deux échos, il est possible de déterminer non seulement la distance du fond, mais aussi sa pente (2D).

## 3.2 Méthode de calcul de la pente

Nous avons démontré [12] qu'il était possible de déterminer  $\xi$  l'angle entre le fond et la ligne de mire du transducteur (Fig. 1) en appliquant la formule :

$$\xi = \arccos \left( \frac{t_p - t_s \cos \theta_s}{\sqrt{t_p^2 + t_s^2 - 2t_p t_s \cos \theta_s}} \right) \quad (9)$$

où  $t_p$  et  $t_s$  sont respectivement les instants d'occurrence des maxima d'intensité sonore des échos du lobe principal et du secondaire et  $\theta_s$  est l'angle entre l'axe du transducteur et celui du lobe secondaire. D'après [13], on calcule  $\theta_s$  (en degrés) de la façon suivante :

$$\theta_s = 48,5 \frac{\lambda}{r_c} \quad (10)$$

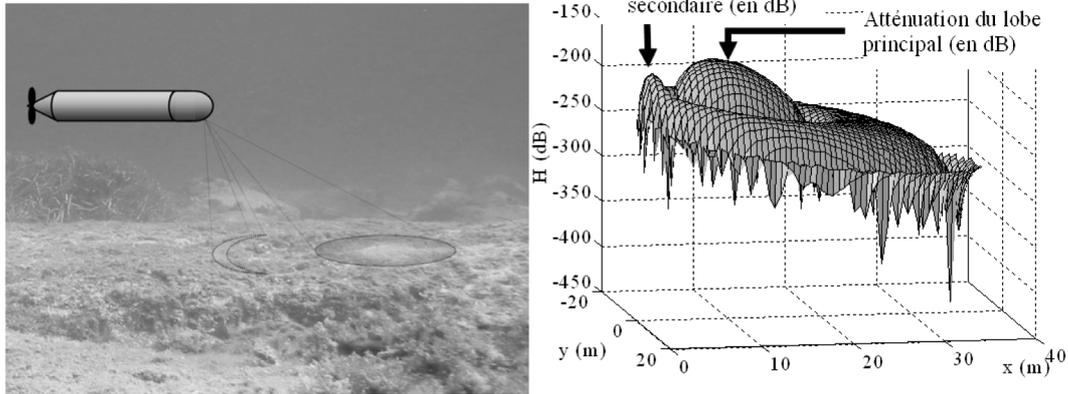


Figure 4. Lobe principal, lobe secondaire et atténuation globale  $H$  correspondante.

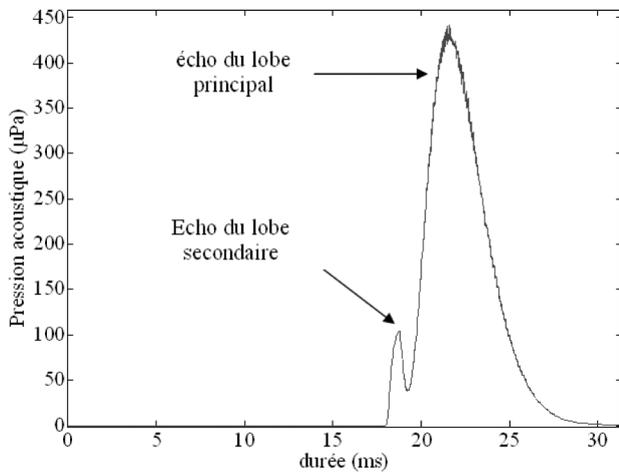


Figure 5. Enveloppe de l'écho acoustique reçu (simulation).

où  $\lambda$  est la longueur d'onde du signal émis et  $r_c$  est le rayon de l'ouverture du transducteur. Enfin, si l'on note  $\psi$  l'angle d'inclinaison du transducteur (Fig. 1), on détermine la pente  $p$  du fond en calculant  $p = \psi - \xi$ , à quoi il convient, le cas échéant, de retrancher la valeur de l'angle de tangage du véhicule au moment de l'émission.

### 3.3 Cas tridimensionnel

Dans ce qui suit, on suppose que le relief du fond est suffisamment régulier pour que la zone insonifiée puisse être représentée localement par un plan. La méthode que nous venons de présenter, basée sur un transducteur à ouverture circulaire, ne permet de détecter que la pente longitudinale du fond. Pour accéder à la pente latérale, nous avons montré [14] qu'il était possible d'utiliser un transducteur à ouverture carrée. Dans ce cas en effet, le faisceau diffracté est constitué d'un lobe principal entouré de quatre lobes secondaires. Si l'on choisit convenablement [14] les dimensions de l'ouverture du transducteur ainsi que son orienta-

tion, il est alors possible d'exploiter le lobe principal et deux des quatre lobes secondaires (Fig. 6) pour déterminer l'équation tridimensionnelle du plan représentant localement le fond :

$$\alpha \cdot x + \beta \cdot y + \gamma \cdot z + \delta = 0 \quad (11)$$

où  $\alpha$ ,  $\beta$  et  $\delta$  sont des coefficients dépendant de l'inclinaison du fond et de la profondeur et  $\gamma$  est fixée à 1 par convention. Le repère  $(O, x, y, z)$  est centré sur le transducteur et orienté comme l'indique la figure 6. Avec ces conventions,  $\delta$  représente directement l'opposé de la distance entre le transducteur et le fond et les coefficients  $\alpha$  et  $\beta$  sont respectivement les inclinaisons du fond selon les axes  $Ox$  et  $Oy$ .

Le traitement de l'écho acoustique reçu dépend alors du nombre de pics (de maxima) observés et trois situations différentes apparaissent :

a. écho à deux maxima

Dans ce cas, les échos des deux lobes secondaires sont superposés, ce qui signifie que la pente selon  $Oy$  est nulle et donc  $\beta = 0$ . Les coefficients  $\delta$  et  $\alpha$  sont donnés par [14] :

$$\delta = -\frac{c}{2} t_s \cos i \quad (12)$$

$$\alpha = \frac{-\delta}{\frac{c}{2} t_m \cos \psi} - \tan \psi \quad (13)$$

où  $t_s$  est l'instant d'occurrence de l'écho commun des lobes secondaires,  $t_m$  est l'instant d'occurrence du maximum de l'écho du lobe principal,  $c$  est la vitesse du son dans l'eau,  $i$  est l'angle d'incidence des lobes secondaires et  $\psi$  est l'angle d'inclinaison du transducteur.

b. écho à trois maxima

Dans ce cas, les échos des deux lobes secondaires sont distincts (des échos parasites dus à des lobes tertiaires peuvent également apparaître). On a [14] :

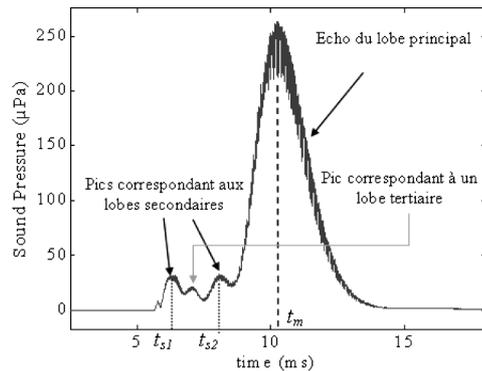
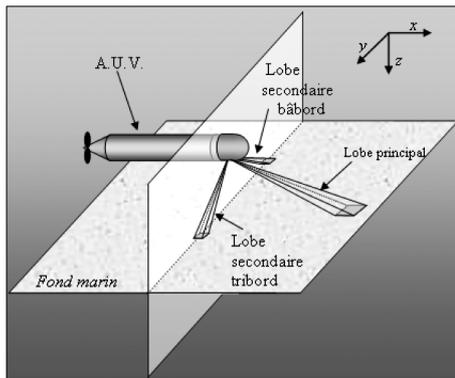


Figure 6. Les trois lobes du faisceau diffracté d'un transducteur carré et la simulation de l'enveloppe des échos acoustiques correspondants.

$$\delta = -\frac{c}{4}(t_{s1} + t_{s2})$$

$$\beta = \pm \frac{2\delta ct_{s1} \cos i}{ct_{s1} \sin i} \quad (14)$$

$$\alpha = \frac{\delta}{\frac{c}{2}t_m \cos \psi} - \tan \psi$$

où  $t_{s1}$  et  $t_{s2}$  sont les instants d'occurrence des échos des lobes secondaires et  $t_m$  celui du maximum de l'écho du lobe principal. Les grandeurs  $c$ ,  $i$  et  $\psi$  sont les mêmes que dans le cas précédent. L'incertitude de signe de  $\beta$  est due à la symétrie des lobes secondaires mais peut être levée soit par une manoeuvre de roulis, soit par continuité, soit par le choix d'une géométrie d'ouverture de transducteur différente (voir paragraphe suivant).

c. écho à un seul maximum

Les échos des deux lobes secondaires arrivent en même temps que l'écho du lobe principal. Dans ce cas, il est impossible de déterminer  $\beta$ , mais on peut approximer  $\delta$  par :

$$\delta \approx -\frac{c}{2}t_{min} \quad (15)$$

où  $t_{min}$  est l'instant où l'écho débute.

Bien que, dans cette situation,  $\alpha$  ne puisse être déterminé, on peut affirmer que la pente du fond selon l'axe  $Ox$  est supérieure à  $\tan(\frac{1}{2} \arcsin(\frac{3\lambda}{2a}) - \arcsin(\frac{\lambda}{a}))$  où  $a$  est la largeur de l'ouverture du transducteur et  $\lambda$  la longueur d'onde.

3.4 Géométrie de l'émetteur

Dans le cas d'un transducteur à ouverture carrée, l'orientation du transducteur et ses dimensions optimales sont étroitement liées. Il faut à la fois maximiser la différence de temps de trajet des lobes secondaires et du lobe principal, et minimiser l'écart angulaire entre les lobes secondaires et la normale au fond.

L'orientation du transducteur doit, quant à elle, permettre de placer les deux lobes secondaires inférieurs dans le plan vertical. L'étude complète du choix des paramètres du transducteur est détaillée dans [19].

Afin d'améliorer la robustesse (renforcement de la puissance des lobes secondaires, meilleure immunité aux irrégularités du terrain, élargissement de la zone de perception...), d'autres géométries de transducteurs sont envisageables (Fig. 7). Parmi les résultats les plus intéressants, on peut citer l'ouverture rectangulaire inclinée qui permet, par la dissymétrie de ses lobes secondaires, de distinguer le signe de la pente latérale du fond. Sur la figure 8, on voit clairement la différence d'ordre d'arrivée des lobes secondaires en fonction du signe de la pente selon  $Oy$ .

4. Précision de la mesure

4.1 Bruit ambiant

Le milieu sous-marin est affecté par de nombreuses sources de bruit. Selon la gamme de fréquences utilisée, le bruit peut avoir pour origine par exemple le trafic maritime, la pluie ou encore les animaux marins (cétacés, crustacés, poissons...). Autour de

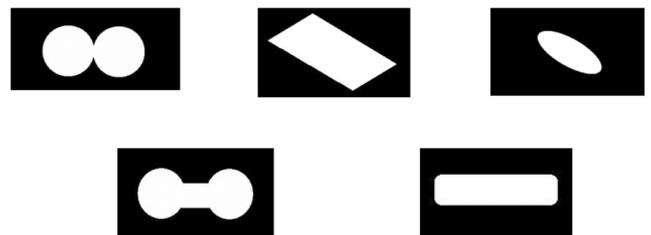


Figure 7. Différentes géométries possibles pour le transducteur.

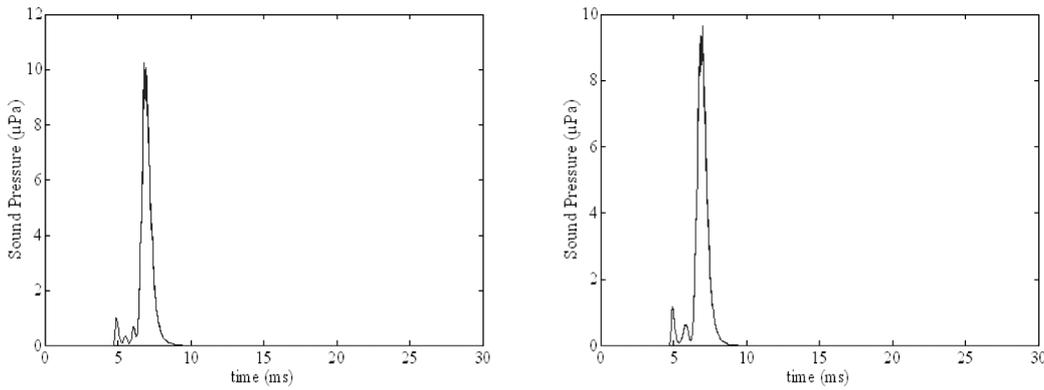


Figure 8. Simulations pour des fonds de pentes  $Ox = 55^\circ$   $Oy = -25^\circ$  (gauche) et  $Ox = 55^\circ$   $Oy = +25^\circ$  (droite).

la fréquence à laquelle nous travaillons (200 kHz) seuls interviennent le bruit d'agitation de surface (provoqué par l'éclatement des bulles d'air dues aux mouvements de surface) et le bruit thermique d'agitation moléculaire. Dans ce qui suit, nous supposons que ce bruit ambiant est isotrope. Autour de 200 kHz, le niveau isotrope spectral de bruit ambiant  $NB_0$  est compris entre 35 et 65 dB/ $\mu\text{Pa}/\text{Hz}$  selon les conditions de surface et de température [13]. Ce niveau de bruit doit, dans l'équation du sonar, être corrigé par la largeur de bande  $B$  du système récepteur considéré, soit :

$$NB = NB_0 + 10 \log B \quad (16)$$

où  $NB_0$  est le niveau isotrope spectral de bruit ambiant et  $NB$  le niveau de bruit effectivement perçu par le récepteur. Pour un ping monochromatique de durée  $T$ , la largeur de bande du signal vaut  $B \simeq \frac{1}{T}$ .

#### 4.2 Niveau et durée d'émission

Dès lors que nous connaissons le niveau de bruit ambiant, il est possible de déterminer le niveau d'émission minimal permettant de distinguer clairement l'écho des lobes secondaires. Pour déterminer un niveau d'émission garantissant quantitativement la précision de la mesure des instants d'occurrence des échos des lobes, l'équation du sonar (Signal - Bruit > Seuil) est insuffisante. Au lieu de cette dernière, on utilise la formule de Woodward [13] qui permet de calculer la variance de la mesure de temps  $var(t_{mesure})$  en fonction du rapport Signal/Bruit  $SNR$  et de la largeur de bande  $B$  :

$$var(t_{mesure}) = \frac{1}{2\pi \cdot SNR \cdot B^2} \quad (17)$$

Les paramètres d'émissions accessibles dans notre cas étant le niveau d'émission et la durée du ping, on se place à niveau

d'émission maximal ( $SL = 200$  dB pour notre système) afin de maximiser le  $SNR$ . La précision de la mesure (17) ne dépend alors plus que de la durée  $\tau$  d'émission.

La figure 9 donne la valeur de l'écart-type de la mesure de l'instant d'arrivée d'un écho (en ms) en fonction de la durée du ping émis (en ms) pour un niveau d'émission de 200dB et une distance de 10 mètres entre l'AUV et le fond, en prenant les paramètres environnementaux utilisés dans le chapitre suivant. L'écart-type augmente avec la durée d'émission. Cependant, lorsque l'on diminue la durée d'émission, on augmente la largeur de bande du système et donc le niveau de bruit, dégradant ainsi le  $SNR$  (Fig. 10, obtenu dans les mêmes conditions que Fig. 9). On doit veiller à conserver ce dernier au-dessus du seuil de détection de notre sondeur. Dans le cas d'un transducteur circulaire, ceci doit être appliqué au lobe secondaire (le plus faible) afin de dimensionner l'impulsion émise et de déterminer l'écart-type de la mesure. On choisit donc la durée d'émission minimale qui garantit tout de même un  $SNR$  suffisant pour la détection du lobe secondaire. Dans notre cas, la durée d'émission retenue est  $\tau = 0,1ms$ , ce qui correspond à un écart-type sur la mesure de temps de  $\sigma = 4.10^{-3}ms$ .

#### 4.3 Détection du lobe secondaire

Outre l'aspect statistique de la précision de la mesure de temps, l'intérêt d'une durée d'émission courte apparaît évident dans la mesure où cela contribue à dissocier l'écho du lobe secondaire de celui du lobe principal. Ainsi, la figure 11 montre les échos obtenus en simulation dans des conditions identiques mais avec des durées d'impulsion différentes. On constate la difficulté à distinguer les lobes dès que  $\tau$  augmente.

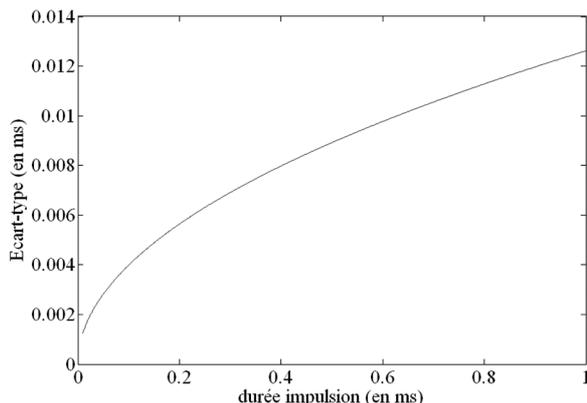


Figure 9. Écart-type de la mesure de temps en fonction de la durée d'émission du ping.

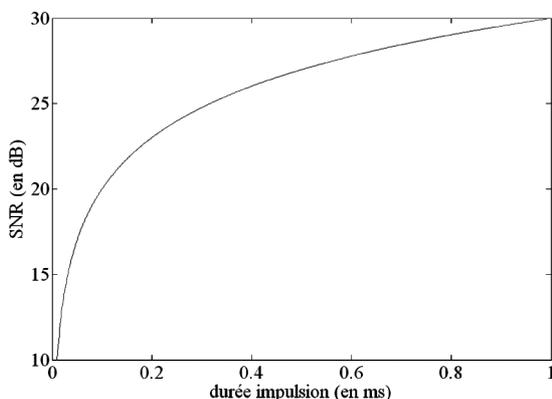


Figure 10. Rapport Signal/Bruit en fonction de la durée d'émission du ping.

## 5. Résultats expérimentaux

### 5.1 Conditions expérimentales

Les expérimentations ont été menées en Méditerranée (été) dans des fonds mixtes (sable prédominant et petites roches) d'une profondeur de 14 mètres. Le signal émis est un ping monochromatique de fréquence 200 kHz, de durée  $\tau = 0,1ms$  et d'intensité 200 dB/ $\mu Pa/1m$ . Le transducteur circulaire (Murata UT200BA8) a un diamètre d'ouverture de  $r_c = 1,25cm$  et il est incliné de  $30^\circ$  par rapport à la verticale. La température de l'eau est  $23^\circ C$  et donc  $\alpha = 50$  dB/km. Le vent est inférieur à 5 nœuds, ce qui, ajouté au bruit thermique engendre un niveau de bruit de  $NB_0 = 40$  dB/ $\mu Pa/Hz$ . Le fond étant sableux, on prend  $IF_N = -10$  dB et  $IF_0 = -35$  dB. Les essais étant réa-

lisés en statique, l'effet Doppler n'est pas considéré. L'absence de rides sur le fond permet de conserver l'hypothèse d'isotropie. À la réception, une amplification à gain variable dans le temps (TVG) est appliquée au signal reçu par le transducteur et nous avons développé une interface permettant de traiter sur un PC les échos acoustiques perçus (conversion analogique / numérique 12 bits).

### 5.2 Résultats

Les résultats expérimentaux ont permis de valider la méthode de détection de l'inclinaison du fond dans le cas d'un transducteur à ouverture circulaire. La figure 12 permet de comparer l'écho obtenu en simulation avec l'écho expérimental dans le cas d'un fond incliné longitudinalement. Les paramètres de simulation sont identiques aux paramètres expérimentaux. On voit apparaître les échos du lobe principal et du lobe secondaire. En appliquant (9) avec  $\theta_s = 29^\circ$ ,  $t_p = 22,6ms$  et  $t_s = 18,6ms$ , on obtient  $\xi = 54,2^\circ$ , ce qui correspond à une pente de  $24,2^\circ$  (pente réelle =  $21^\circ$ ).

Les tests effectués pour de nombreuses inclinaisons du fond nous ont permis de vérifier la validité de la méthode pour des angles d'inclinaison compris entre  $-15^\circ$  et  $+40^\circ$ . En dessous de  $-15^\circ$ , l'écho du lobe secondaire devient trop faible pour être détecté (rétrodiffusion insuffisante) et se superpose à celui du lobe principal. Au-delà de  $40^\circ$ , l'étalement de l'écho du lobe principal ne permet plus une détection précise de son maximum. Les expérimentations effectuées récemment avec un transducteur à ouverture carrée ont donné des résultats conformes à la théorie mais sur une plage réduite de distance, du fait de la faible puissance des lobes secondaires. Dans ce cas, l'augmentation nécessaire du SNR pourrait dans ce cas être obtenue en émettant un chirp (gain lors du traitement cohérent de l'écho), en veillant à conserver une durée d'émission minimale.

## 6. Conclusion

La méthode présentée, basée sur la forme de la figure de diffraction d'un signal acoustique monofaisceau, permet de déterminer les caractéristiques 3D de la pente du fond marin. Les essais en milieu naturel (traitement des données en post-processing) en ont prouvé la validité dans le cas bidimensionnel et le cas tridimensionnel. Actuellement, nos efforts portent sur l'optimisation de la forme du transducteur afin de garantir au système la fiabilité et la robustesse exigibles pour la navigation d'un véhicule autonome sous-marin. L'équipe de robotique sous-marine du LIRMM vient d'achever la réalisation d'un nouveau prototype d'AUV appelé Taipan 300 (Fig. 13). C'est à bord de cet engin que notre méthode sera prochainement testée pour des missions de suivi de fond en milieu naturel.

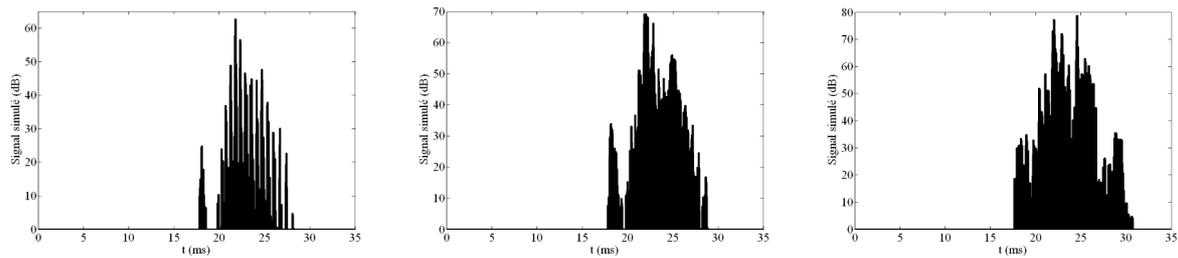


Figure 11. Comparaison des échos reçus après l'émission d'un ping de durée 0,1ms (à gauche), 0,5ms (au milieu) et 1ms (à droite).

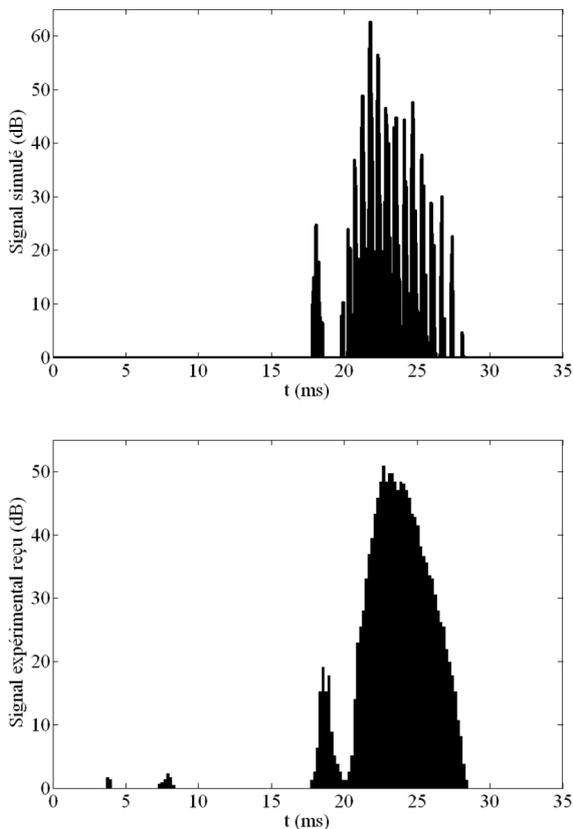


Figure 12. Simulation (en haut) et expérimentation (en bas) de l'écho d'un fond incliné de  $21^\circ$ .



Figure 13. Le véhicule autonome sous-marin Taipan 300.

## Références

- [1] J.J. LEONARD and H.F. DURRANT-WHYTE, "Directed Sonar Sensing for Mobile Robot Navigation", ser. The Kluwer International Series in Engineering and Computer Science, Norwell, MA: Kluwer, 1992.
- [2] P. BACCOU, B. JOUVENCEL, and V. CREUZE, "Homing and Navigation Using One Transponder", IEEE ICRA2002, Washington D.C., Mai 2002.
- [3] Y. PETILLOT, I. TENA RUIZ, and D. M. LANE, "Underwater Vehicle Obstacle Avoidance Using a Multi-Beam Forward Looking Sonar", IEEE Journal of Oceanic Engineering, Vol. 26, no. 2, pp. 240-251, Avril 2001.
- [4] V. CREUZE and B. JOUVENCEL, "Avoidance of Underwater Cliffs for Autonomous Underwater Vehicles," IEEE IROS 2002, Lausanne, Switzerland, pp. 793-798, October 2002.
- [5] V. CREUZE et B. JOUVENCEL, "Perception et suivi de fond pour véhicules autonomes sous-marins", Traitement du Signal, 2003 Vol. 20 no. 4, pp. 323-336, Décembre 2003.
- [6] J.R. EDWARDS, H. SCHMIDT, and K.D. LEPAGE, "Bistatic Synthetic Aperture Target Detection and Imaging with an AUV," IEEE Journal of Oceanic Engineering, Vol. 26, no. 4, pp. 690-699, Octobre 2001.
- [7] J. VAGANAY, B. JOUVENCEL, P. LÉPINAY et R. ZAPATA, "Taipan, an AUV for very Shallow Water Applications," WAC'98, Anchorage, 1998.
- [8] R. ZAPATA, P. LÉPINAY, "Collision Avoidance and Bottom Following of a Torpedo-like Vehicle", MTS/IEEE OCEANS96, Fort Lauderdale, Floride, Septembre 1996.
- [9] A.D. PIERCE, Acoustics, an introduction to its physical principles and applications, McGraw Hill, New-York, 1981.
- [10] R. J. URICK, Principles of Underwater Sound, Peninsula Publishing, 1983.
- [11] X. LURTON, An introduction to Underwater Acoustics' Principles and Applications, Springer Praxis Books, 2003.
- [12] V. CREUZE, B. JOUVENCEL et P. BACCOU, "Using Sound Diffraction to Determine the Seabed Slope", IROS 2005 IEEE, International Conference on Intelligent Robots & Systems, Edmonton, Canada, pp. 1731-1736, Août 2005.
- [13] X. LURTON, Acoustique sous-marine : Présentation et applications, Editions Ifremer, 1998.
- [14] V. CREUZE, B. JOUVENCEL et P. BACCOU, "3D-Bottom Tracking based on Acoustic Diffraction for Autonomous Underwater Vehicles", IEEE ICAR 2005, Seattle, Washington, Juillet 2005.

- [15] A. SANTOS, Contribution à la conception des sous-marins autonomes : architecture des actionneurs, architecture des capteurs d'altitude, et commandes référencées capteurs, Thèse de doctorat, École Nationale Supérieure des Mines de Paris, Paris, 1995.
- [16] G. LE CHENADEC, Analyse de descripteurs énergétiques et statistiques de signaux sonar pour la caractérisation des fonds marins, Thèse de doctorat, Université de Bretagne Occidentale, Juillet 2004.
- [17] JOHANNSSON, H. THORHALLSSON, T. HAFSTEINSSON, "An efficient method of combining detection and identification of seafloor objects using Gavia AUV", OCEANS 2006, Boston, USA, Sept. 2006.
- [18] R. P. STOKEY, C. VON ALT, B. ALLEN, N. FORRESTER, T. AUSTIN, R. GOLDSBOROUGH, M. PURCELL, F. JAFFRE, G. PACKARD, and A. KUKULYA, "Development of the REMUS 600 Autonomous Underwater Vehicle", IEEE Oceans 2005, Washington, USA, 18-23 sept 2005.
- [19] V. CREUZE, B. JOUVENCEL et P. BACCOU, "3D-Bottom Tracking based on Acoustic Diffraction for Autonomous Underwater Vehicles", IEEE ICAR 2005, International Conference on Advanced Robotics, Seattle, WA, USA, Juillet 2005.



Vincent Creuze

Vincent Creuze est Maître de Conférences à l'Université Montpellier 2. Il enseigne l'informatique industrielle à l'IUT de Montpellier. Ses travaux de recherche au sein du LIRMM UMR5506 concernent la perception et la commande pour les véhicules autonomes sous-marins.



Olivier Parodi

Olivier PARODI prépare une thèse de robotique sous-marine au LIRMM. Il a obtenu un DESS de robotique sous-marine à l'Université de Toulon et un DEA Systèmes Automatiques à l'Université Montpellier 2. Il développe actuellement un simulateur multi-véhicules hardware in loop incluant les communications acoustiques sous-marines afin d'étudier la coordination d'une flottille d'engins sous-marins autonomes.

