

# Effet Doppler : impact sur la mesure bathymétrique issue des sondeurs multifaisceaux

PAULINE VINCENT<sup>1</sup>, FREDERIC MAUSSANG<sup>1</sup>, CHRISTOPHE SINTES<sup>1</sup>, XAVIER LURTON<sup>2</sup>, RENE GARELLO<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Télécom Bretagne, UeB CNRS UMR 3192 Lab-STICC / CID, Département Image et Traitement de l'information, Technopôle Brest-Iroise-CS 83818- 29238 Brest Cedex 3- France

<sup>2</sup>Ifremer, NSE/AS, Z.I. Pointe du Diable- B.P. 70- 29280 Plouzané- France

<sup>1</sup>Pauline.Vincent@telecom-bretagne.eu, Frederic.Maussang@telecom-bretagne.eu, Christophe.Sintes@telecom-bretagne.eu, Rene.Garello@telecom-bretagne.eu  
<sup>2</sup>Xavier.Lurton@ifremer.fr

**Résumé** – Cet article présente une étude permettant de quantifier l'impact du Doppler provenant des mouvements de l'antenne sur les signaux modulés (FM) utilisés dans la nouvelle génération de sondeurs multifaisceaux bathymétriques. L'objectif est de le comparer avec l'impact sur les signaux non modulés (CW). Le but final est de comprendre pourquoi la mesure bathymétrique utilisant ces signaux modulés n'atteint pas le niveau de performance attendu.

**Abstract** – This article presents a study to quantify the Doppler impact from the array motion on modulated signals (FM) used in the new generation of bathymetric multibeam echosounders, in order to compare this impact with non-modulated signal (CW). The final aim is to understand why the FM signal does not meet the expected improvement.

## 1 Introduction et contexte

La tendance actuelle des sondeurs multifaisceaux de bathymétrie est d'atteindre des fonds plus profonds ou des portées latérales plus importantes (sur les voies extérieures) tout en gardant de bons niveaux de précision. Dans cette optique, la nouvelle génération de sondeurs bathymétriques multifaisceaux [1] utilise des impulsions avec une fréquence modulée (FM) associées à un filtrage adapté, permettant une compression d'impulsion [2]. L'intérêt est double. Premièrement, grâce au filtrage adapté on maximise le rapport signal à bruit ce qui permet d'atteindre des distances plus importantes (dont l'écho pourrait être masqué par le bruit ambiant dans le cas d'émission d'impulsions simples (CW)). Deuxièmement, grâce à la compression d'impulsion résultant du filtrage adapté, la précision de mesure n'est plus liée uniquement à la durée de l'impulsion mais est proportionnelle à l'inverse de la bande fréquentielle émise, il est alors possible d'accroître la durée des impulsions tout en préservant une bonne résolution temporelle.

Cependant, pour des raisons encore indéterminées, les sondeurs à signaux FM n'atteignent pas le niveau d'amélioration attendu. La première hypothèse d'explication avancée est que les mouvements des antennes de réception et d'émission provenant des mouvements du bateau à la surface de la mer induisent un effet Doppler sur le signal reçu et provoquent une désadaptation du filtre en réception. Le signal après compression d'impulsion dans le cas de la FM est déformé ; en particulier, son lobe principal est décalé dans le temps. L'effet Doppler impacterait donc plus les signaux FM que les impulsions simples CW.

Bien que l'impact de l'effet Doppler sur la compression d'impulsions pour des signaux FM

linéaires et le décalage en temps qui en résulte aient été largement étudiés [3-5], peu d'études ont été menées pour déterminer son impact sur les signaux après traitements spécifiques aux sondeurs multifaisceaux, c'est-à-dire après la formation de voies et l'interférométrie. Il est donc nécessaire de pouvoir le quantifier pour ensuite le corriger : soit par traitement à la réception [6], soit en utilisant des formes d'impulsions plus robustes [7]. Cette étude permettra d'identifier le rôle du Doppler dans la dégradation de la bathymétrie observée en signaux FM, et le cas échéant de s'orienter vers d'autres interprétations.

L'étude de l'effet Doppler sur les signaux FM et CW s'est construite autour de deux réalisations : tout d'abord une simulation de l'observation d'un fond plat par une antenne en mouvement, puis sur la formation d'un modèle simple qui nous a permis de tirer des formules analytiques. La confrontation des deux permettra ensuite de conclure sur l'impact du Doppler sur la précision de la mesure bathymétrique.

## 2 Simulation de l'observation du fond avec une antenne de réception en mouvement

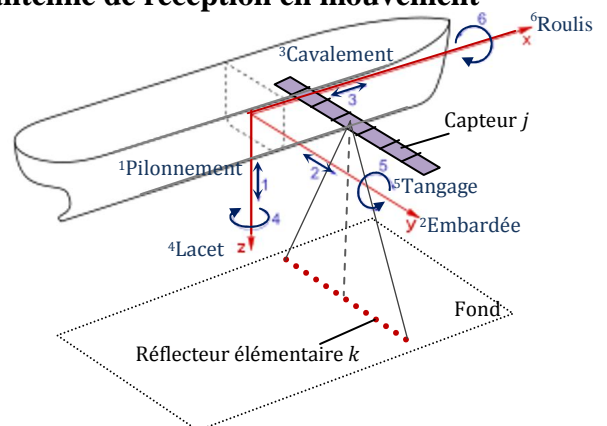


Figure 1 :Mouvements affectant l'observation d'un fond plat

Les mouvements de l'antenne de réception sont commandés par ceux du bateau (angulaires : roulis, tangage, lacet ; translations : pilonnement, embardée et cavalement) (Figure 1). Ces mouvements contribuent à créer un effet Doppler en modifiant dynamiquement la distance effective entre les antennes d'émission de réception et le fond. De plus, les mouvements de rotation (ex Roulis) induisent de plus grandes vitesses sur les cotés de l'antenne de telle sorte que l'effet Doppler est plus important sur les capteurs à l'extérieur de l'antenne (Doppler différentiel).

Dans nos simulations, le fond est supposé plat et est modélisé par une ligne de points-diffuseurs élémentaires aléatoirement répartis, chacun possédant un coefficient de réflexion  $\alpha_k$  suivant une loi de Rayleigh en amplitude, et une phase uniformément répartie entre 0 et  $2\pi$ .

Plusieurs paramètres peuvent être pris en compte comme la forme des signaux (durée, bande, fréquence central et forme de l'enveloppe), les caractéristiques de l'antenne (nombre de capteurs, longueur, position de référence par rapport au centre des mouvements du bateau).

Les mouvements du bateau peuvent être définis de façon paramétrique comme des fonctions sinusoïdales (d'amplitude  $A$  et de période  $T$ ) ou bien entrés directement dans le programme à partir de mouvements réels enregistrés grâce à une centrale d'attitude.

La simulation commence par générer un fond aléatoire ensuite elle calcule (équation 1) le signal reçu par chacun des capteurs de l'antenne  $S_j(t)$  correspondant à chaque instant à la contribution de chacun des réflecteurs élémentaires  $k$  :

$$S_j(t) = \sum_k \alpha_k S_e \left( t - \frac{D_{j,k}(t)}{c} - \frac{D_k}{c} \right) \quad (1)$$

L'antenne étant en mouvement, la distance effective entre les réflecteurs élémentaires et les capteurs de l'antenne ( $D_{j,k}(t)$ ) est variable à chaque instant, ce qui crée un effet Doppler sur le signal reçu.

Le signal reçu dans le cas des signaux FM est ensuite filtré (filtrage adapté) afin de procéder à la compression d'impulsion.

Le dépointage de l'antenne (ou formation de voies) peut se faire de trois façons. Premièrement, lorsqu'il s'agit de signaux bande étroite, on peut retarder le signal par multiplication avec le terme de phase associée.

$$S(t - \delta t_{j,\theta}) = S(t) e^{-2\pi i f_c \delta t_{j,\theta}} \quad (2)$$

Cette méthode sera appelée ici formation de voies en phase. La deuxième méthode s'effectue dans le domaine fréquentiel (domaine de Fourier) en multipliant par le terme complexe de phase associé au décalage temporel, ce qui permet de reconstituer sans erreur le signal retardé (transformée de Fourier inverse).

En réalité, dans les calculs en temps réels des sondeurs, la formation de voies est calculée en prenant l'échantillon le plus proche du retard souhaité et en

multipliant par le terme de phase résiduel. Cette méthode limite les erreurs d'approximation de la bande faites lors de la formation de voies en phase. On la nommera formation de voies en temps. C'est cette dernière méthode qui a été implémentée dans la simulation.

L'antenne est ensuite divisée en deux sous-antennes), formant ainsi nos deux voies de l'interféromètre. Le signal interférométrique considéré est le produit de  $S_a$  par  $S_b^*$ .

Lorsque les deux signaux de l'interféromètre sont en phase, la phase de  $S_a S_b^*$  est nulle. Pour les voies correspondant à des angles supérieurs à  $20^\circ$  la détection du fond est donc faite par passage à zéro de la rampe de phase de  $S_a S_b^*$  pour un angle donné. L'étude de l'erreur possible du passage à zéro est cruciale pour les signaux FM, étant donné qu'ils sont principalement utilisés sur les cotés de la fauchée (en effet leur rôle est d'augmenter le rapport signal à bruit qui est particulièrement faible dû à la forte atténuation des signaux utiles provenant des zones latérales).

### 3 Analyse de l'effet Doppler sur la bathymétrie

#### 3.1 Description du modèle

Dans notre modèle, on suppose que le mouvement de l'antenne de réception peut être décomposé en un mouvement de translation et un mouvement de rotation. Les vitesses de ces deux mouvements sont considérées comme constantes tout au long de la réception. On s'intéresse à la contribution du point du fond situé selon la direction  $\theta$  par rapport à la verticale dans le plan formé par l'antenne et la verticale. Cette contribution est affectée par le mouvement de l'antenne projeté sur ce plan et cette direction (Figure 2). Les deux demi antennes (formant les signaux  $S_a$  et  $S_b$ ) sont modélisées par des récepteurs simples situés en leur milieu (centre de phase). Ainsi modélisés, les mouvements sont décomposables en un mouvement de translation de vitesse  $v_{e,\theta}$  et  $v_{r,\theta}$  (émission, réception) et un mouvement de rotation qui implique des vitesses opposées sur chacun des capteurs  $\pm v_{\alpha,\theta}$ . Dans ce cas particulier, il est possible de calculer l'expression analytique du signal reçu par ces deux capteurs (contribution de la direction  $\theta$ ).

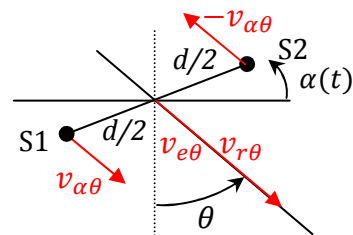


Figure 2 : contribution selon la direction  $\theta$

La contribution d'un réflecteur selon la direction  $\theta$  sur chacun des deux récepteurs peut s'exprimer selon :

$$\begin{aligned} S_1 &= s \left( \frac{k_{r1}}{k_e} (t - \tau) - \frac{1}{k_e} \frac{d}{2c} \sin \theta \right) \\ S_2 &= s \left( \frac{k_{r2}}{k_e} (t - \tau) + \frac{1}{k_e} \frac{d}{2c} \sin \theta \right) \end{aligned} \quad (3)$$

Avec  $k_e = 1 - \frac{v_{e\theta}}{c}$  ;  $k_{r1} = 1 + \frac{v_{r\theta} + v_{\alpha\theta}}{c}$  ;  $k_{r2} = 1 + \frac{v_{r\theta} - v_{\alpha\theta}}{c}$  et  $\tau$  le temps correspondant au parcours par l'onde de deux fois la distance entre le fond à la direction et le centre de l'antenne.

L'effet Doppler va se manifester, non seulement sur la fréquence, mais aussi sur la différence de marche, ce qui va influencer le dépointage de l'antenne (pendant la formation de voies) puisque le principe de ce dépointage est justement d'annuler cette différence de marche afin de pointer vers  $\theta$ . On observera une erreur  $\delta\theta$  sur le pointage de la voie (ceci en mode FM et en CW).

### 3.2 Influence sur les signaux bande étroite (CW)

Dans le cas des signaux bande étroite (CW), les signaux reçus pour la contribution suivant  $\theta$  sont :

$$\begin{aligned} S_1 &= \exp \left( 2\pi i \frac{F_c}{k_e} \left( k_{r1} (t - \tau) - \frac{d}{2c} \sin \theta \right) \right) \\ S_2 &= \exp \left( 2\pi i \frac{F_c}{k_e} \left( k_{r2} (t - \tau) + \frac{d}{2c} \sin \theta \right) \right) \end{aligned} \quad (4)$$

La cible est dans l'axe quand la différence de marche (après correction par le dépointage de l'antenne lors de la formation de voies) entre les deux sources est nulle. Si on considère l'angle de dépointage  $\theta_b$ , la différence de phase entre les deux signaux dans le cas d'une formation de voies en temps est égale à :

$$\begin{aligned} \Delta\varphi &= 2\pi \frac{F_c}{k_e} \left( (k_{r1} - k_{r2})(t - \tau) \right. \\ &\quad \left. - \frac{d}{c} \left( \frac{k_{r1} + k_{r2}}{2} \sin \theta_b - \sin \theta \right) \right) \end{aligned} \quad (5)$$

En annulant la différence de phase, on remarque que la voie pointe en réalité la direction  $\theta_p$  au lieu de  $\theta_b$  selon l'équation :

$$\frac{k_{r1} + k_{r2}}{2} \sin \theta_b - \sin \theta_p = 0 \quad (6)$$

### 3.3 Influence sur les signaux à modulation linéaire de fréquence FM.

Dans le cas de la FM, le signal émis est modulé en fréquence:

$$s(t) = e^{2\pi i (F_c t + \frac{B}{2T} t^2)} \cdot \mathbb{1}_{\left[-\frac{T}{2}; \frac{T}{2}\right]} \quad (7)$$

$\mathbb{1}_{\left[-\frac{T}{2}; \frac{T}{2}\right]}$  est une fonction porte égale à 1 sur  $\left[-\frac{T}{2}; \frac{T}{2}\right]$ . Il est possible de calculer, dans le cas faible bande, une forme analytique approximative de la forme de l'impulsion après compression d'impulsion en présence d'un effet Doppler de facteur  $k$  :

$$\begin{aligned} S(t) &= \int_{-\infty}^{+\infty} s(ku) s^*(u - t) du \\ &\approx T e^{2\pi i F_c (1 + \frac{\alpha}{2}) t} \mathbb{T}(t) \text{sinc} \left( 2\pi \left( f_c \frac{\alpha}{2} + \frac{B}{2T} t \right) \mathbb{T}(t) \right) \end{aligned} \quad (8)$$

Où  $k = 1 + \alpha$ , et  $\mathbb{T}(t)$  représente la fonction triangulaire sur  $[-T; T]$  et égale à 1 en 0.

On retrouve dans cette expression (8), l'ambiguïté bien connu entre le Doppler et la localisation en temps du pic principal, en annulant le terme dans le sinus cardinal ( $\delta t = -\alpha F_c \frac{T}{B}$ ). Grâce à un changement de variable dans (8), il est possible d'exprimer les signaux reçus  $S_1$  et  $S_2$ .

$$\begin{aligned} S_1 &= e^{2\pi i F_c \left( 1 + \frac{\alpha_1}{2} \right) \left( t - \tau - \frac{1}{k_{r1}} \frac{d}{2c} \sin \theta \right)} A_1(t) \\ S_2 &= e^{2\pi i F_c \left( 1 + \frac{\alpha_2}{2} \right) \left( t - \tau + \frac{1}{k_{r2}} \frac{d}{2c} \sin \theta \right)} A_2(t) \end{aligned} \quad (9)$$

$A_1(t)$  et  $A_2(t)$  correspondent aux enveloppes en sinus cardinal biaisées en temps. L'enveloppe de  $S_a \cdot S_b^*$  ( $S_a$  et  $S_b$  étant les signaux des deux semi antennes dépointées) est décalée en temps. L'erreur est :

$$\delta t = -\frac{v_{e\theta} + v_{r\theta}}{c} F_c \frac{T}{B} \quad (10)$$

De plus, l'erreur dans l'estimation de la différence de marche entre les deux sources de l'interféromètre entraîne ici aussi une erreur sur la direction de pointage de la voie. En effet, la différence de phase s'exprime :

$$\begin{aligned} \Delta\varphi &= 2\pi F_c \left( \left( \frac{\alpha_1 - \alpha_2}{2} \right) (t - \tau) - \left( \frac{1 + \frac{\alpha_1}{2}}{k_{r1}} + \frac{1 + \frac{\alpha_2}{2}}{k_{r2}} \right) \frac{d}{2c} \sin \theta \right. \\ &\quad \left. + \left( 2 + \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{2} \right) \frac{d}{2c} \sin \theta_b \right) \end{aligned} \quad (11)$$

En annulant ce terme on obtient la direction réelle  $\theta_p$  de pointage de la voie vérifiant :

$$\left( \frac{1 + \frac{\alpha_1}{2}}{k_{r1}} + \frac{1 + \frac{\alpha_2}{2}}{k_{r2}} \right) \frac{d}{2c} \sin \theta_p - \left( 2 + \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{2} \right) \frac{d}{2c} \sin \theta_b = 0 \quad (12)$$

Pour résumer, en reprenant (6), (10) et (12) à l'aide de développements limités, on trouve l'influence du Doppler au premier ordre sur les mesures bathymétriques (angle, temps) en utilisant des signaux type CW ou de type FM. Les résultats obtenus sont résumés dans Tab 1.

Tab 1 : erreurs théoriques causées par le Doppler

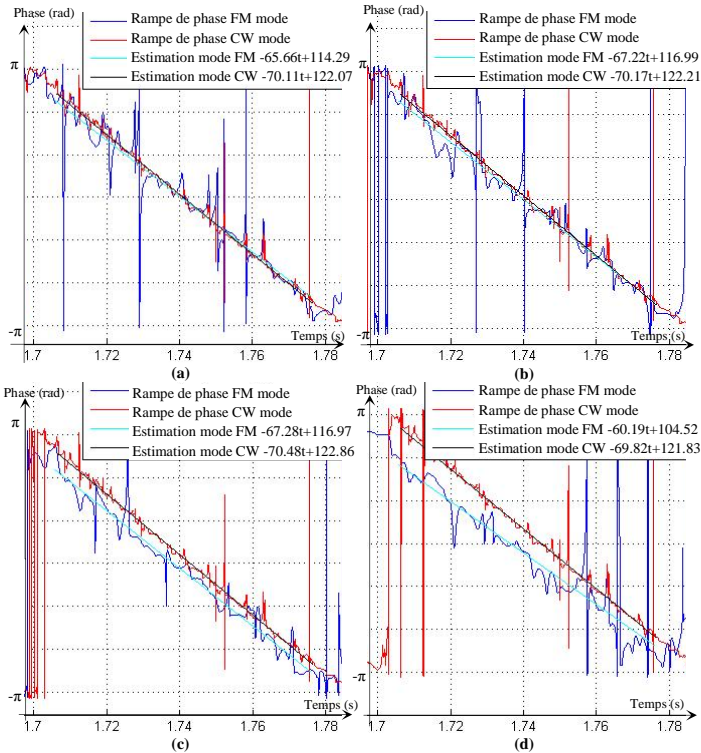
	Erreur $\delta\theta$	Erreur $\delta t$
CW	$-\frac{v_{r\theta}}{c} \tan(\theta_b)$	Aucune
FM	$-\frac{v_{r\theta}}{c} \tan(\theta_b)$	$-\frac{v_{r\theta} + v_{e\theta}}{c} F_c \frac{T}{B}$

L'erreur bathymétrique finale peut être exprimée à partir de l'erreur angulaire et du temps [8]:

$$\frac{\delta H}{H} = \frac{\delta t}{t} + \tan(\theta) \delta\theta \quad (13)$$

## 4 Confrontation simulation/modèle théorique

Il est possible de simuler un grand nombre de configurations de mouvement pour l'antenne de réception. En confrontant ces résultats avec ceux obtenus grâce aux formules théoriques, on obtient bien des ordres de grandeur similaires.



**Figure 3: Rampes de phase obtenues pour différents mouvements paramétriques (pilonnement) ( $T=10s$ ,  $A=0$ ) (a) ,1 (b), 5 (c), 10 (d) m**

Par exemple, le tableau 2 présente l'erreur dans l'estimation du passage à zéro de la rampe de phase pour la voie  $40^\circ$  (fig. 3) dans le cas d'un mouvement paramétrique de type pilonnement d'amplitude 1m, 5m sur une période de 10s sur la même réalisation de fond rugueux.

**Tab 2: Résultats de la confrontation simulation/ modèle théorique**

<i>Modèle théorique</i>			
erreur CW	$3,9 \cdot 10^{-4}$ s	$2,0 \cdot 10^{-3}$ s	$3,9 \cdot 10^{-3}$ s
erreur FM	$-5,4 \cdot 10^{-4}$ s	$-2,7 \cdot 10^{-3}$ s	$-5,4 \cdot 10^{-3}$ s
<i>Simulation</i>			
erreur CW	$4,0 \cdot 10^{-4}$ s	$1,9 \cdot 10^{-3}$ s	$3,8 \cdot 10^{-3}$ s
erreur FM	$-3,0 \cdot 10^{-4}$ s	$-2,1 \cdot 10^{-3}$ s	$-4,2 \cdot 10^{-3}$ s

L'effet Doppler est donc prévisible à partir des formules issues du modèle théorique, ce qui permet d'avoir rapidement une estimation légèrement à la hausse de l'impact de l'effet Doppler sur la bathymétrie pour n'importe quelle configuration de mouvement.

## 5 Conclusion

Finalement, il s'avère après cette étude que l'impact des mouvements de l'antenne sur les signaux FM ainsi que CW n'est pas vraiment pénalisant, induisant une erreur bathymétrique de l'ordre de 1/1000, ce qui n'est pas gênant en regard des exigences habituelles de précision. Le biais introduit sur l'angle de pointage pour les signaux FM et CW est le même, ce qui n'est pas pénalisant pour les signaux CW. Au final, la différence entre la FM et la CW réside principalement dans l'ambiguïté due au Doppler. En effet la FM est supposée robuste puisqu'elle permet d'obtenir même en cas d'effet Doppler un fort pic d'amplitude. Il est cependant biaisé, ce qui est actuellement corrigé en post traitement

en utilisant une estimation des mouvements de l'antenne grâce aux données des centrales d'attitude.

Il est donc vraisemblable que les pertes de qualité de la mesure bathymétrique en mode FM soient dues à d'autres causes qu'il reste à déterminer.

Néanmoins, connaître l'impact de l'effet Doppler sur la bathymétrie mesurée par les sondeurs multifaisceaux peut permettre de proposer d'autres solutions afin de le réduire ou bien de le corriger. En utilisant les résultats de cette étude, une estimation de l'effet Doppler à partir des paramètres de mouvement de l'antenne peut être faite et être utilisée *a posteriori* pour corriger l'erreur (soit en utilisant les données de la centrale d'attitude comme cela se fait actuellement, soit en estimant le décalage Doppler directement à partir du signal reçu, ou bien en combinant les deux). Il est également possible d'émettre d'autres types de signaux modulés, peut-être moins robustes au Doppler mais n'entraînant pas d'ambiguïté temps-fréquence en cas de Doppler inconnu, ou d'envisager l'émission de signaux prenant en compte *a priori* l'information Doppler afin d'améliorer la qualité de la mesure bathymétrique. Des solutions peuvent également être envisagées en post-traitement (en traitement du signal ou d'antenne adaptatif) soit en adaptant le filtrage adapté ou/et la formation de voies non pas à la forme émise, mais plutôt au signal reçu.

## 6 Références

- [1] Kongsberg, "Product Description EM710 Multibeam echo sounder", 2007, p 48
- [2] J.R. Klauder, *et al.* "The theory and design of chirp radars", *Bell Syst Tech*, vol 39, n°4, pp 745–808, July 1960
- [3] H.O. Ramp and E.R. Wingrove, Jr., "Performance degradation of linear FM-pulse-compression systems due to the Doppler effect". *Proc IRE* 49, 1961, p 1693.
- [4] C.E. Cook, *et al.* "Linear FM pulse compression Doppler distortion effects", *Proc IRE* 50, 1962, pp 1535–1536.
- [5] W.L. Rubin and J.V. Difrancò, "The effects of Doppler dispersion on matched filter performance", *Proc IRE* 50, 1962, pp. 2127–2128.
- [6] S.D. Blunt and K. Gerlach, "Adaptive pulse compression," *Proc. IEEE National Radar Conf.*, April 26-29, 2004, pp. 271-276.
- [7] J.A. Johnston and A.C. Fairhead, "Waveform design and Doppler sensitivity analysis for nonlinear FM chirp pulses" Communications, Radar and Signal Processing, *IEEE Proceedings F*, April 1986, pp. 163 – 175.
- [8] X. Lurton, "Précision de mesure des sonars bathymétriques en fonction du rapport signal/bruit", *Traitement du Signal* 2001 – vol 18 – n°3 pp 179-194