



RAPPORT DU PROJET PERSONNEL DE RECHERCHE

---

## L'ACOUSTIQUE SOUS-MARINE

---

UFR Sciences et Techniques  
2A Licence Renforcée de Mathématiques  
2022-2024



Institut Matériaux Microélectronique Nanosciences Provence

CLAVIERE Timm  
ÉTABLISSEMENT : UNIVERSITÉ DE TOULON

Tuteur : B.BORLOZ  
Laboratoire : IM2NP

*Je tiens au préalable à remercier M Bruno BORLOZ, qui m'a accompagné, conseillé, donné de son temps et qui m'a surtout transmis son expertise dans le domaine de l'acoustique sous-marine ; ainsi que la responsable de projet Dre Gloria FACCANONI pour m'avoir fait confiance.*

# Table des matières

<b>1</b>	<b>Introduction</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Les Signaux Acoustiques Sous-Marin</b>	<b>4</b>
2.1	Caractérisation des ondes et du milieu . . . . .	4
2.1.1	Type de propagations . . . . .	4
2.1.2	Pertes de propagation . . . . .	5
2.2	Bruits sous-marins . . . . .	6
<b>3</b>	<b>L'Effet Doppler</b>	<b>7</b>
3.1	Situations en dimension 1 . . . . .	7
3.1.1	Émetteur fixe . . . . .	7
3.1.2	Émetteur mobile . . . . .	8
3.2	Aller-retour du signal . . . . .	8
3.3	Situations en dimension 2 . . . . .	8
3.3.1	Le mouvement circulaire . . . . .	8
3.3.2	Émetteur mobile . . . . .	9
<b>4</b>	<b>Étude des ondes acoustiques</b>	<b>10</b>
4.1	Intercorrélation . . . . .	10
4.1.1	Cas sans effet Doppler . . . . .	10
4.1.2	Cas avec effet Doppler . . . . .	12
<b>5</b>	<b>Conclusion</b>	<b>13</b>
<b>6</b>	<b>Bibliographie</b>	<b>14</b>
<b>7</b>	<b>Résumé</b>	<b>15</b>

# 1 Introduction

Au XIX<sup>e</sup> siècle, suite à la découverte des propriétés des ondes électromagnétiques, de nouveaux champs s'ouvrent dans le domaine spatial et de la télécommunication. Cependant, un autre domaine reste inconnu, celui-ci n'est pas explorable avec les ondes électromagnétiques, c'est le milieu sous-marin.

Encouragés par la recherche du Titanic en 1912, les océans ont commencé à être explorés au XX<sup>e</sup> siècle avec l'emploi d'ondes acoustiques. Correspondant à 70% de la surface du globe, le milieu marin est très propice à la propagation des ondes sonores.

Le traitement des signaux acoustiques sous-marins est une application du traitement du signal dans un domaine multidisciplinaire que les ingénieurs, les acousticiens, les physiciens, les océanographes et les biologistes marins utilisent dans le cadre de systèmes de télédétection sous-marine afin de résoudre les problèmes des applications réelles, caractérisées par la détection, la classification, la localisation et le suivi des systèmes étudiés.

Sans oublier le milieu militaire marin, où le besoin de *déetecter, localiser, mesurer, transmettre* est essentiel.

L'acoustique sous-marine peut être structurée en différentes parties intriquées :

- une première partie introductive caractérisant les propriétés des ondes, du milieu, des sonars,
- une seconde partie abordant les différents effets physiques,
- une dernière partie traitant de l'étude des signaux acoustiques.

La caractérisation des signaux permet de définir, de quantifier, de comprendre des généralités théoriques dans un objectif de clarifier des applications.

Dans le milieu marin, plusieurs effets physiques semblables au milieu aérien existent ; ce rapport se concentrera autour de l'effet Doppler et de ses usages dans les cas pratiques.

L'étude des signaux constitue l'aboutissement des recherches en acoustique sous-marine, liant des méthodes mathématiques et physiques, cette branche de la physique permet d'apporter des réponses concrètes aux différents phénomènes.

Nous allons voir plusieurs des notions abordées ci-dessus dans un cadre de recherche destiné à une meilleure compréhension de l'étude des signaux sous-marins.

## 2 Les Signaux Acoustiques Sous-Marins

Les problèmes de navigation et de sécurité sont à l'origine du développement de l'acoustique sous-marine. Ils ont suscité la conception de nombreux systèmes dans le but de répondre à 3 enjeux : *déecter et localiser, mesurer, transmettre*. Lors de la Première Guerre Mondiale, les expériences de Paul Langevin et Constantin Chilowski ont ouvert la porte aux techniques modernes de détection sous-marine, notamment avec l'invention du sonar , permettant un bon en avant dans la caractérisation de la propagation des ondes acoustiques. Tout cela a abouti à une nouvelle branche d'étude : la caractérisation des signaux acoustiques.

### 2.1 Caractérisation des ondes et du milieu

#### 2.1.1 Type de propagations

##### Réfraction, Diffraction

Dans l'eau, les ondes acoustiques ne se déplacent pas de manière rectiligne en raison de deux phénomènes :

- la réfraction : dans le milieu sous-marin, la densité varie avec la température et la pression, les caractéristiques des milieux changent ce qui dévie les ondes acoustiques de leur trajectoire initiale, qui est rectiligne dans un milieu homogène et isotrope.

Si le milieu marin est séquencé en couches, l'onde est sommée aux lois de Snell-Descartes.

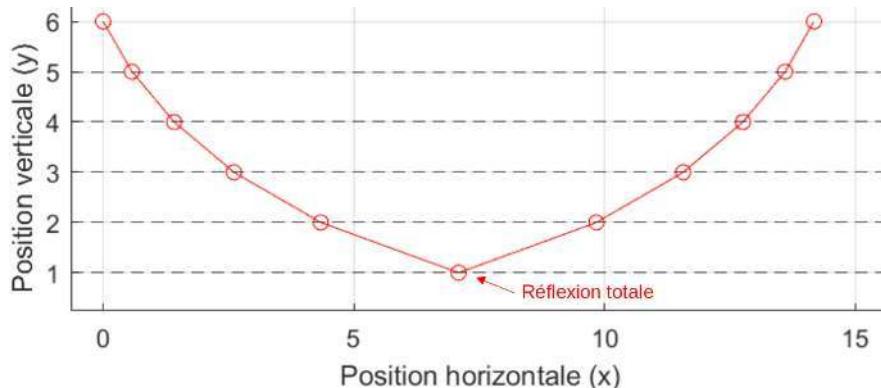


FIGURE 2.1 – Modèle simple de propagation d'un faisceau dans des couches d'eau d'indices différents

- Diffraction : lorsque les ondes acoustiques rencontrent un obstacle, elles se plient ou se courbent autour de celui-ci, ne se propageant donc pas de manière rectiligne.

## Propagation transversale et longitudinale

Dans le cadre sous-marin, l'eau de mer dans laquelle se propagent les onde acoustiques longitudinales n'est pas concerné par les ondes transverses, contrairement au sol constituant le fond des mers.

## Principe de réciprocité de propagation

Ce principe décrit une symétrie de la propagation entre une source et un récepteur lorsque leurs positions sont échangées. Cela simplifie grandement l'analyse des systèmes de sonar actif monostatique car les effets de la propagation ne doivent être évalués qu'une seule fois.

### 2.1.2 Pertes de propagation

Le milieu sous-marin, bien que propice à la propagation des signaux sonores, réduit de manière non-négligeable la puissance des ondes lorsqu'elles se déplacent dans le milieu, on parle alors de perte ou d'affaiblissement de propagation. Les deux pertes d'intensité majeures sont dues à l'effet géométrique de divergence et à l'absorption de l'énergie acoustique.

#### Perte par divergence géométrique

Le phénomène de perte par divergence géométrique apparaît lorsqu'une onde, émise à puissance constante par une source sonore, se propage dans toutes les directions de l'espace en étalant son énergie sur une surface de plus en plus importante.

$$P_{geom} = 20 \log(R) \quad \text{avec } P_{geom} \text{ en dB et R en m.}$$

#### Perte par amortissement

Le cas précédent considère le milieu comme homogène et la propagation comme multi-directionnelle ; or le milieu marin est hétérogène et dispersif. Une onde qui se propage dans un milieu dispersif comme la mer se déforme car ses longueurs d'onde se déplacent à des vitesses différentes.

Cette atténuation est exprimée à l'aide d'un coefficient d'absorption  $\alpha(f)$  qui est exprimé en dB perdu par mètre. Il vient que :

$$P_{amor} = \alpha(f)\hat{d} \quad \text{avec f en Hz et } \hat{d} \text{ en m}$$

où  $f$  est la fréquence du signal émis et  $d$  la distance curviligne parcourue par le signal.

L'atténuation dépend aussi de la zone géographique. La formule de Thorp est utilisée en Atlantique et la formule de Leroy en Méditerranée. Par exemple, pour la méditerranée :

$$\alpha(f) = 0,001 + 0,007f^2 + \frac{0,2635f^2}{2,89+f^2}$$

#### Perte totale

Elle correspond à la somme de la perte géométrique et de la perte par amortissement :

$$P_{tot} = P_{geom} + P_{amor} = 20 \log(R) + \alpha(f)$$

## 2.2 Bruits sous-marin

Le bruit est un signal dont l'amplitude instantanée n'est pas connue et ne peut être prédit (sauf peut être en moyenne et en énergie). De manière générale, il se superpose à un signal, limitant la transmission de l'information et diminuant les performances de décision (détection, estimation, classification). Il est nuisible à d'autant plus que sa puissance est élevée par rapport à celle du signal d'intérêt. L'important est de retenir qu'il est non-prédictible et nuisible.

### Le bruit ambiant

Le bruit ambiant provient du fond de la mer, c'est un bourdonnement qui existe indépendamment de la présence de capteurs et de sources sonores. Il ne peut y avoir aucune action directe sur ce bruit, il faut essayer de le réduire avec par exemple des méthodes statistiques.

### Le bruit propre

Le bruit propre est lié à la présence de l'hydrophone et de son support. L'hydrophone est posé au fond de l'eau, suspendu ou tracté, il y a souvent transmission des vibrations. Le bruit propre baisse les performances de son propre système, et ce à toutes les fréquences.

### Le bruit rayonné

Il provient des machines tournantes telles que les moteurs, pompes, hélices. Ces masses en rotation entraînent un bruit caractéristique dont les raies spectrales correspondent à la signature de l'objet. Ce sont ces signatures que les « oreilles d'or » essaient de détecter.

### Le bruit de réverbération (sonar actif)

Les signaux émis par le sonar induisent des bruits par réverbération. Les signaux sont réfléchis sur la surface, le fond de l'eau, les bancs de poissons, les bulles. Plus il y a de réverbération, plus il y a de bruit nuisible rendant la détection de l'objet très complexe.

TABLE 2.1 – Tableau des principaux bruits sous-marins

Les Bruits	Continues	Intermittentes	Fréquence en (Hz)
Bruit Ambiant	effets hydrostatiques des marées et des vagues turbulences océaniques et courants trafic maritime éloigné et activités industrielles conditions météo locales (vent) ou éloignées (houle) -	- - - dauphins, baleines crevettes claquées et crustacés divers précipitations (pluie)	< 1 Hz 1 – 10 Hz 10 – 500 Hz 100 Hz – 100 kHz 10 Hz – 100 kHz 1 Hz – 20 kHz 100 Hz – 100 kHz
Bruit Rayonné	machines tournantes cavitation (bruit d'hélice)	-	10 Hz – 1000 Hz 100 Hz – 1000 Hz

La difficulté de ces bruits est qu'ils ressemblent fortement au signal utile. Mais, ils peuvent aussi donner des informations utiles : dans le domaine sismique, la détection des échos donne une information sur la distance des nappes sous-terraines.

## 3 L'Effet Doppler

Christian Doppler, mathématicien et physicien Autrichien est devenu célèbre en 1842 pour avoir découvert le décalage Doppler. Cet effet correspond à la différence de fréquence entre une onde émise par un émetteur et celle reçue par un récepteur.

Cette notion est basée sur l'étude des mouvements, d'un point par exemple, indépendamment des causes qui les produisent. Cet effet faisant intervenir des notions de mécanique et de géométrie a des applications beaucoup plus importantes en acoustique sous-marine qu'avec les ondes électromagnétiques.

L'étude de plusieurs situations va permettre d'assimiler les notions mathématiques de l'effet Doppler. L'ensemble des démonstrations a été réalisé au préalable.

### 3.1 Situations en dimension 1

#### 3.1.1 Émetteur fixe

On étudie le cas d'un émetteur fixe en  $O$  et d'une cible  $C(t)$  animée d'un mouvement rectiligne uniforme sur l'axe  $Ox$ . La cible a une vitesse  $\vec{v}$ . On émet un ping infiniment court à  $t = 0$  dont la célérité dans le milieu est  $c$ , puis un second ping est émis à  $t = T$ . On pose  $t_{e2} = t_{e1} + T$  et  $t_{r2} = t_{r1} + T'$ , les dates d'émission et de réception.



FIGURE 3.1 – Émetteur fixe

Il vient que  $T' = T + \frac{OC(t_{r2}) - OC(t_{r1})}{c}$ . La célérité est  $c = 1500m.s^{-1}$  pour une onde sonore dans l'eau,  $c = 340m.s^{-1}$  pour une onde sonore dans l'air, d'où :  $v \ll c$ ,  $\frac{v}{c} \ll 1$ . En utilisant la formule du développement limité à l'ordre 1 au voisinage de 0, il vient que :

$$T' = \frac{1}{1 - \frac{v}{c}} T \implies T' \sim \left(1 + \frac{v}{c}\right) T$$

On appellera  $\delta = \frac{v}{c}$  le coefficient Doppler. Si le signal émis est de fréquence  $f_0$  sur l'intervalle  $[0, T]$ . On peut alors trouver la fréquence  $f'_0$  perçue par la cible.

$$f'_0 = (1 - \delta) f_0$$

$\delta$  est  $< 0$  ou  $\geq 0$ . Pour  $v > 0$  la cible s'éloigne de  $O$ ,  $T' > T$  et  $f'_0 < f_0$ , il y a une augmentation de la durée du signal due à une dilatation du signal émis. Inversement pour

$v < 0 : T' < T$  et  $f'_0 > f_0$  il y a une diminution de la période impliquant une compression du signal. C'est typiquement le phénomène acoustique observé lorsque le moteur d'un bateau émet un signal sonore à une fréquence  $f_0$  et que l'on perçoit dans l'eau des sons à une fréquence différente selon que le bateau s'éloigne ou se rapproche.

### 3.1.2 Émetteur mobile

On se place dans le même contexte que précédemment, hormis que l'émetteur se déplace à vitesse constante  $\vec{u}$  dans la direction  $Ox$ . Comment cela modifie nos calculs ?

On a :  $u, v \ll c$  d'où  $\frac{u}{c}, \frac{v}{c} \ll 1$ . En utilisant la formule du développement limité, il vient que :

$$T' = \frac{1 - \frac{u}{c}}{1 - \frac{v}{c}} \Rightarrow T' \sim \left(1 + \frac{v-u}{c}\right)T$$

Dans le cas pratique, il faut calculer  $\delta = \frac{v-u}{c}$ . On aura  $\delta = 0$  si  $v = u$ , c'est-à-dire si la distance relative émetteur-récepteur est invariante. L'effet Doppler est bien dû à la variation de la distance relative entre l'émetteur et le récepteur.

## 3.2 Aller-retour du signal

Dans le cas d'un radar actif, le radar émet un signal et le reçoit ensuite lorsque celui-ci a rebondi sur une cible quelconque. Il peut alors faire une analyse cinématique de la cible. Le but de cette situation est de voir l'impact d'un aller-retour sur le Décalage Doppler et donc de savoir comment sont modifiés nos calculs.

Lors de l'étude de [3.1.2], on trouve que  $T' = \frac{1-\frac{u}{c}}{1-\frac{v}{c}}T$ . Or  $\vec{u}$  et  $\vec{v}$  sont constants, on peut retrouver de manière analogue à  $T'$  et  $T$  la propriété liant  $T''$  et  $T'$ . Il vient alors que :

$$T'' \sim \left(1 + 2\frac{v-u}{c}\right)T'$$

Pour  $\delta = \frac{v-u}{c}$ ,  $\Delta T = 2\delta T$ , le décalage de la période lorsque le signal fait un aller-retour est donc égal à deux fois le coefficient Doppler. En effet, à l'aller l'onde subit une variation de sa période, puis est réfléchie par la cible, et varie de nouveau lors du chemin retour.

Par ailleurs, à partir de la formule de ci-dessus, on a :  $v = u + \frac{f_0 - f''_0}{f''_0} \frac{c}{2}$

On en déduit qu'une utilité de l'effet Doppler est de pouvoir mesurer la vitesse de cibles relativement au milieu environnant à partir de la mesure du décalage de fréquence des échos.

## 3.3 Situations en dimension 2

### 3.3.1 Le mouvement circulaire

Si l'émetteur est fixe et la cible se déplace sur un cercle de rayon  $R$  constant, on aura  $OC(t_{r1}) = OC(t_{r2})$ , ce qui implique que  $T' = T$ . À travers cette expérience, on remarque que

quelque soit le mouvement décrit par l'émetteur et le récepteur, s'il n'y a pas de variation de la distance au cours du temps, il n'y a pas d'effet Doppler. Une autre propriété du mouvement circulaire est que  $\vec{v} \perp \vec{OC}$  mais est-ce que cela a un lien avec l'Effet Doppler ?

### 3.3.2 Émetteur mobile

Cette situation est plus compliquée car plus générale. On se place dans un espace de dimension 2.  $O(t)$  est un émetteur qui se déplace à la vitesse  $\vec{v}$ , et  $M(t)$  est la cible qui se déplace à la vitesse  $\vec{v}'$ . Les pings sont émis à  $t_{e1}$  et  $t_{e2}$ , ils sont reçus à  $t_{r1}$  et  $t_{r2}$ .

Ici, on suppose la période entre le temps de la 1<sup>re</sup> et de la 2<sup>nde</sup> émission très courte, de ce fait on a :  $t_{e2} - t_{e1} = dt$  et  $t_{r2} - t_{r1} = dt'$ , tel que  $dt, dt' \ll 1$ . Le fait que  $dt$  et  $dt'$  soient infiniment petits permet de supposer que les vitesses  $\vec{v}$  et  $\vec{v}'$  sont de direction et de norme constante. On introduit le vecteur unitaire de  $\vec{OM}$ , noté  $\vec{u} = \frac{\vec{OM}}{\|\vec{OM}\|}$ .

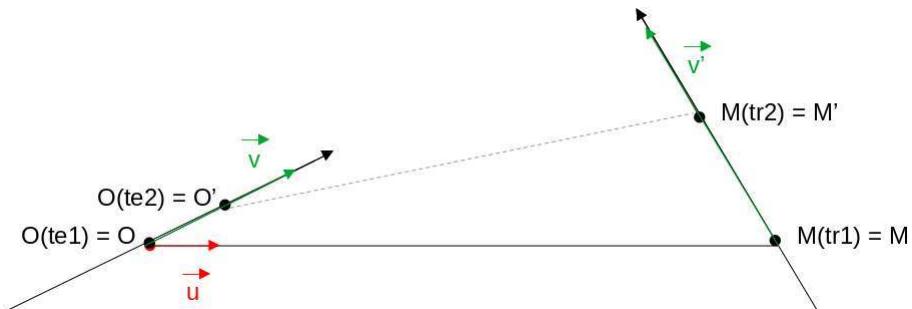


FIGURE 3.2 – Emetteur mobile

$(dt)^2, (dt')^2, dt dt'$  sont des infiniment petits d'ordre 2, donc ils sont négligeable devant  $dt$  et  $dt'$ . En utilisant, un DL en 0 à l'ordre 1, on détermine  $dt'$  en fonction de  $dt$  :

$$dt' = \frac{1 - \frac{\vec{v} \cdot \vec{u}}{c} dt}{1 - \frac{\vec{v}' \cdot \vec{u}}{c}} \Rightarrow dt' \sim \left(1 + \frac{(\vec{v}' - \vec{v}) \cdot \vec{u}}{c}\right) dt$$

On appelle vitesse radiale, les vitesses :  $\vec{v} \cdot \vec{u}$  et  $\vec{v}' \cdot \vec{u}$ . La vitesse radiale correspond à la vitesse d'un objet mesurée dans une direction, c'est donc une projection qui est donnée sur l'espace par le produit scalaire. Si  $\vec{v} = \vec{v}'$ , il n'y a pas d'effet Doppler. Si  $\vec{u} \perp \vec{v}$  et  $\vec{u} \perp \vec{v}'$ , il y a une vitesse radiale nulle et une variation de la distance entre O et M nulle et donc pas d'effet Doppler. C'est donc bien la variation de distance entre O et M qui est responsable de l'effet Doppler.

Dans le cadre de l'acoustique sous-marine, sur un bateau, dont la vitesse de déplacement est connue, équipé d'un sonar actif, on pourrait isoler la vitesse v radiale d'une cible grâce aux équations de l'effet Doppler. Mais comment estimer ce retard Doppler ?

## 4 Étude des ondes acoustiques

L'étude des ondes acoustiques passent par le traitement du signal : on peut l'analyser, le détecter, le mesurer, le filtrer, le synthétiser, le coder, le stocker, ... En reprenant les notions des précédents chapitres, on abordera plusieurs situations utilisant les mathématiques pour les modèles et les preuves, la physique pour la modélisation des lois naturelles et les applications et l'informatique pour la mise en pratique.

### 4.1 Intercorrélation

Soit  $\underline{u}, \underline{v} \in \mathbf{R}^{n \times 1}$  tel que  $\underline{u}$  et  $\underline{v}$  sont unitaires. D'après l'inégalité de Cauchy-Schwarz, on a que  $|\langle \underline{u}, \underline{v} \rangle| \leq \|\underline{u}\| \cdot \|\underline{v}\| = 1$ . Le produit scalaire est maximal lorsqu'il y a égalité de  $\underline{u}$  et  $\underline{v}$ , et donc lorsque les vecteurs sont colinéaires. Le produit scalaire est un outil de ressemblance de 2 vecteurs.

$$\langle \underline{u}, \underline{v} \rangle = \begin{cases} 0 & \text{si } \underline{u} \perp \underline{v}, \\ 1 & \text{si } \underline{u} = \underline{v}. \end{cases}$$

Soit  $e(t)$  le signal émis pendant une durée  $T$  avec  $0 \leq t \leq T$ .

Soit  $r(t')$  le signal reçu avec  $\tau \leq t' \leq \tau + T'$  ( $T' = T$  si pas d'effet Doppler), où l'intervalle de temps  $[0, \tau]$  correspond à la distance parcourue par le signal avant d'être reçu, on peut aussi écrire :  $r(t' - \tau) = r(t)$ .

#### 4.1.1 Cas sans effet Doppler

Question 1 : Comment mesurer la ressemblance de 2 signaux  $e(t)$  et  $r(t)$  ?

On échantillonne les signaux. On choisit un intervalle  $\Delta t$  assez petit et l'on découpe la durée  $T$  en  $N$  points, tel que  $T = N\Delta t$ . On a alors une liste segmentée par  $\Delta t$  :  $e(t) \rightarrow \{e_n\}_{0 \leq n \leq N-1}$  et  $r(t) \rightarrow \{r_n\}_{0 \leq n \leq N-1}$ . Ces listes sont respectivement assimilables à des vecteurs  $\underline{e}$  et  $\underline{r}$ .

On peut alors comparer les 2 signaux avec la méthode des rectangles pour l'approximation d'une intégrale :

$$\langle \underline{e}, \underline{r} \rangle \simeq \int_0^T e(t)r(t)dt$$

Question 2 : Comment estimer  $\tau$  ?

Voici les signaux qui ont été émis et reçus par le sonar actif :

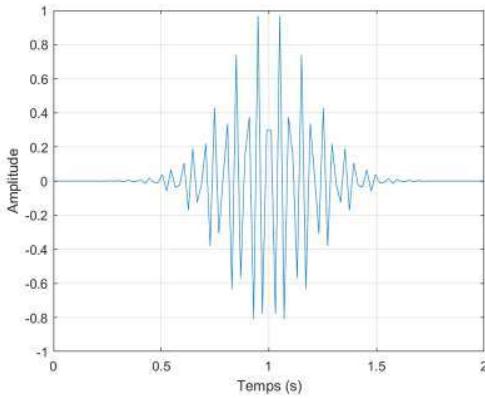


FIGURE 4.1 – Signal émis

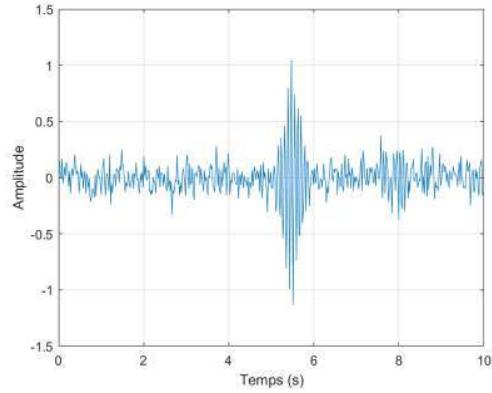


FIGURE 4.2 – Signal reçu

Similairement à la question précédente, on échantillonne  $e(t)$  et  $r(t)$  pour avoir des vecteurs  $\underline{e}$  et  $\underline{r}$ . Pour pouvoir comparer,  $r(t)$  à  $e(t)$  on réalise un produit scalaire « glissant », i.e. on fixe un  $t_0$  du signal reçu et on réalise le produit scalaire entre  $e(t)_{[0,T]}$  et  $r(t)_{[t_0,t_0+T]}$ . Avec les vecteurs  $\underline{e}$  et  $\underline{r}$ , on a que :

$$f(t_0) = \langle \underline{e}, \underline{r}_{[t_0,t_0+T]} \rangle \simeq \int_{t_0}^{t_0+T} r(t)e(t-t_0)dt$$

On a  $e(t-t_0)$  car comme dit à la question 1,  $t$  du signal émis doit varier sur  $[0, T]$ . On effectue l'intercorrélation de  $e$  et  $r$ .

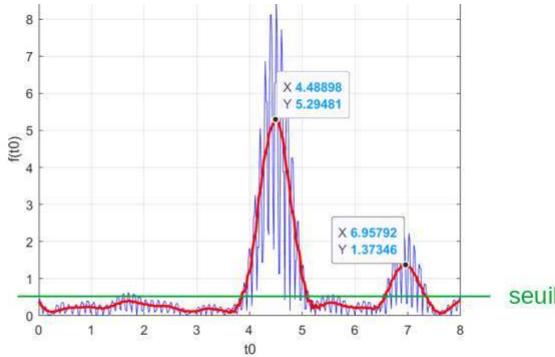


FIGURE 4.3 – Graphique du produit scalaire glissant (en rouge)

On fixe un seuil de détection, un signal est déclaré s'il est supérieur au seuil. À  $\tau = 4.48$ , on a l'intervalle  $[\tau, \tau + T]$  où la ressemblance avec le signal émis est maximale. On remarque qu'à  $\tau' = 6.95$ , on a  $[\tau', \tau' + T]$  où la ressemblance est diminuée en amplitude. Cela signifie que dans le signal reçu, on a 2 fois le motif du signal émis. Le 1<sup>er</sup> correspond à la réception du trajet direct du signal émis, le 2<sup>nd</sup> correspond à une réverbération. En effet il est identique au premier mais a perdu en intensité car il a parcouru une plus grande distance.

On vient d'estimer la date de réception. On en déduit la distance  $\hat{d} = \frac{c\hat{\tau}}{2}$  avec  $c$  la célérité du son,  $\hat{d}$  la distance curviligne et  $\frac{1}{2}$  car l'onde réalise un aller-retour.

### 4.1.2 Cas avec effet Doppler

On a un signal  $e(t)$  émis de période  $T$  et de fréquence  $f_0$ . On a un signal reçu où on distingue un unique motif semblable à celui de  $e(t)$  sur un intervalle  $[\tau, \tau + T']$  tel que les durées  $T$  et  $T'$  sont différentes.

Question 3 : Quelle est la distance parcourue par le signal avant d'être reçu ? Quelle est la vitesse radiale de la cible ?

L'idée est de modifier le signal émis de plein de façons différentes, en le dilatant ou le compressant. On réalise des copies Doppler de  $e(t)$ . On obtient des signaux de longueurs différentes, leurs tailles dépendent du coefficient Doppler. A partir du signal le plus long, je rajoute des « zéros » aux autres signaux pour qu'ils aient tous la même durée.

Dans mon exemple, j'ai 5 copies Doppler, on va alors avoir :  $T_1 > T_2 \rightarrow f_1 < f_0 \rightarrow \delta_1 > 0$ ,  $T_2 > T \rightarrow f_2 < f_0 \rightarrow \delta_2 > 0$ ,  $T_3 = T \rightarrow f_3 = f_0 \rightarrow \delta_3 = 0$ ,  $T_4 < T \rightarrow f_4 > f_0 \rightarrow \delta_4 < 0$ ,  $T_5 < T_4 \rightarrow f_5 > f_0 \rightarrow \delta_5 < 0$ . ( $|\delta| \ll 1$ )

On échantillonne les  $e_i(t)$  en  $\underline{e}_i$ . Comme dans la question précédente, on réalise le produit scalaire, on a alors 5 graphiques donnés par :  $f_i(t_0) = \langle \underline{e}_i, \underline{r}_{[t_0, t_0+T_1]} \rangle$ .

On se positionne par rapport à la période la plus grande donc  $T_1$ . On obtient alors :

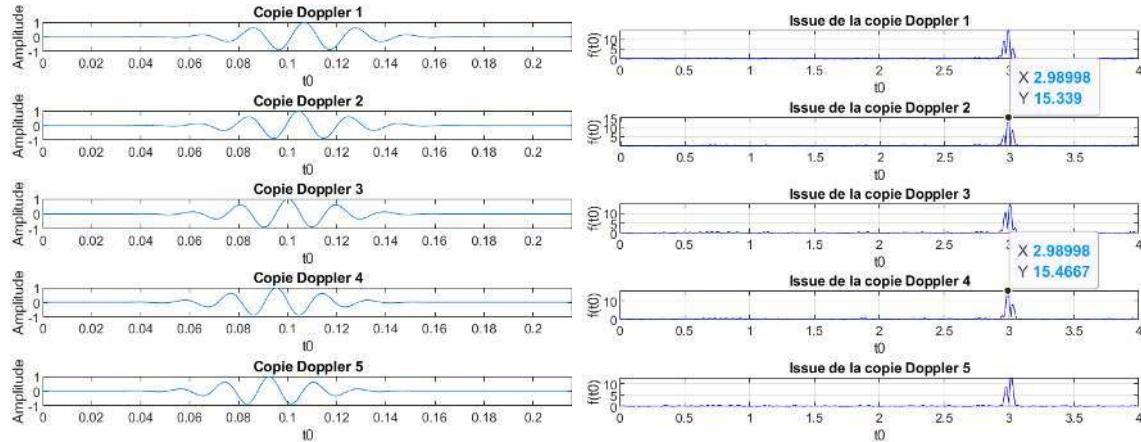


FIGURE 4.1 – Copies Doppler

FIGURE 4.2 – Produits scalaires

La valeur maximale du produit scalaire est atteinte pour la copie Doppler n°4. La date  $t_0 = 15.4667$  correspond au temps  $\hat{\tau}$  tel que où le signal est reçu sur  $[\tau, \tau + T_4]$ .

On peut approximer la distance la plus courte entre l'émetteur et le récepteur  $\hat{d} = \frac{c\hat{\tau}}{2}$ . On connaît aussi  $\delta_4$  qui vaut  $2\delta$  (voir [sect3.2]). On a que  $\delta_4 = 2\frac{\hat{v}_r}{c}$  d'où :

$$\hat{v}_r = \frac{\delta_4 c}{2}$$

On peut alors déterminer la vitesse radiale à laquelle se déplace l'objet ayant émis le signal. En augmentant le nombre de copies Doppler, on améliore la précision de l'estimation de  $\hat{v}_r$ .

## 5 Conclusion

Alors que les progrès de la recherche en acoustique sous-marine ont été très conséquents ces 100 dernières années, les difficultés concernant le traitement des signaux restent les mêmes, les pertes dues à la nature du milieu, les bruits ambients, les réflexions et les trajets non rectilignes, en grande distance, multiples empruntés par les ondes acoustiques viennent toujours complexifier les études. La difficulté de ces bruits étant qu'ils ressemblent fortement au signal utile.

Même s'il existe plusieurs méthodes mathématiques, telles que l'approximation par moindres carrés et l'autocorrélation, pour débruiter et traiter des signaux bruités, certains de ces bruits sont utiles, en sismique la détection des échos donne une information sur la distance des nappes sous-terraines. Ces méthodes de traitement permet de comprendre des effets physiques comme l'effet Doppler.

On peut penser que l'utilité de l'effet Doppler est faible et qu'elle n'est liée qu'aux systèmes de sécurité et de surveillance pour le calcul de la vitesse relative d'un objet. Cependant, cet effet admet plusieurs applications en dynamique des fluides, notamment en courantométrie acoustique avec les courants marins et en détection des turbulences marines avec les présences de vortex.

Toutefois, l'étude de l'effet Doppler en dynamique des fluides passe par les équations d'ondes. En étendant le sujet aux équations d'ondes, il serait intéressant de retrouver un décalage Doppler en animant la source sonore d'une vitesse. Les équations d'ondes servent notamment à prédir la trajectoire. Dans le cas où le signal est mêlé à des réflexions, ce qui rend difficile le discernement des signaux reçus, pouvoir estimer le décalage doppler directement dans les équations d'onde serait très utile pour les simulations.

Tout laisse penser que la prospection pétrolière et gazière sous-marine, ainsi que les tensions militaires navales autour de ces ressources vont encourager au développement de la recherche en acoustique sous-marine.

## 6 Bibliographie

- Xavier Lurton, Édition IFREMER, « Acoustique Sous-Marine, Présentation et Application » (2001).  
ISBN : 2-905434-92-9
- Douglas A. Abraham, Édition Springer, « Underwater Acoustic Signal Processing » (2019).  
ISBN : 978-3-319-92981-1
- Isabelle Terrasse, Toufic Abboud, Édition 2007 « Modélisation des phénomènes de propagation d'ondes ».  
ISBN : 978-2-7302-1436-0
- « Effet Doppler ». Wikipédia, (21 janvier 2024)  
[https://fr.wikipedia.org/wiki/Effet\\_Doppler](https://fr.wikipedia.org/wiki/Effet_Doppler)
- Cours, « Acoustique sous-marine, Sonar ».  
Université de Toulon S&T - M2 ISC ST/V
- Denis PILLON, « Introduction à la détection en sonar actif - Notions de base » Techniques-ingénieur.fr (10 nov. 2017).  
<https://www.techniques-ingénieur.fr/base-documentaire/technologies-de-l-information-th9/applications-radars-42592210/introduction-a-la-detection-en-sonar-actif-rad6714/>
- « Traitement du signal1 ». GitHub, Vincent Mazet (Université de Strasbourg), 2020-2024  
<https://vincmazet.github.io/signal1/vectoriel/representation-vectorielle.html>. CC BY-NC 4.0.
- MathWorks, code matlab.  
<https://fr.mathworks.com/help/index.html>
- Promotion Bombard, « Cours de Géophysique Marine ». Bachelor Océanographe, (juillet 2004)  
<http://forumbachelor.free.fr/gma/GMA2/index.php?page=18>
- « PROPAGATION DE RAYONS ACOUSTIQUES EN MILIEU MARIN ». Ectia, (septembre 2006)  
<http://www.ectia.fr/TOMO/PRAMM.pdf>  
Référence : ECTIA/004/CI
- « Son ». Cochelea, Antoine Lorenzi et Benjamin Chaix, (27 décembre 2016)  
<https://www.cochlea.eu/son>

## 7 Résumé

À travers ce projet de recherche sur l'acoustique sous-marine, nous avons abordé la complexité de l'étude des ondes acoustiques dans le milieu sous-marin. Nous avons pu caractériser les signaux, que ce soit des généralités sur les types et pertes de propagation des ondes acoustiques aux bruits nuisibles du milieu, et approfondir notre compréhension dans ce domaine. Ces connaissances ont permis de travailler sur des effets physiques tel que l'effet Doppler, qui est de manière générale toujours présents dans les problèmes d'application réelles. Les signaux sous-marins ont pu être clairement étudié en mêlant les connaissances physiques précédemment définies et les méthodes mathématiques de corrélation, par exemple maintenant nous sommes en capacité de déterminer la distance émetteur-récepteur et la vitesse radiale de cet émetteur. Plusieurs des notions étudiées n'ont pas été retranscrites dans ce rapport, notamment des démonstrations mathématiques, des équations d'ondes et des analyses d'effets physiques ; cela montre que nous sommes encore loin d'avoir atteint les limites de l'acoustique sous-marine. Actuellement, avec les systèmes militaires de détection, localisation, de mesure et de transmission, nous sommes capables de bien plus encore. La recherche dans le domaine de l'exploration des fond marins et la course à l'armement poussent les différents pays à toujours plus innové tant que le milieu marin reste source de convoitises.

Through this research project on underwater acoustics, we tackled the complexity of studying acoustic waves in the underwater environment. We have characterise the signals, from generalities on the types and propagation losses of acoustic waves to the harmful noises of the environment, and finally deepen our understanding in this field. This knowledge made it possible to work on physical effects such as the Doppler effect, which is generally always present in real-life application problems. Underwater signals have been clearly studied by combining the physical knowledge previously defined with mathematical methods such as cross-correlation, for example we are now able to determine the distance between the transmitter and the receiver and the speed of this transmitter. Several of the concepts studied have not been transcribed in this report, in particular mathematical demonstrations, wave equations and analyses of physical effects ; this shows that we are still far from having reached the limits of underwater acoustics. Today, with military detection, localisation, measurement and transmission systems, we are capable of much more, even if research into the exploration of the seabed and the arms race are pushing different countries to innovate ever further, as long as the marine environment remains a source of covetousness.