



UFR Sciences et Techniques - Licence Physique-Chimie

# PROJET DE RECHERCHE PERSONNEL ( PPR )

2022 - 2024

---

## Éléments de Suivi en Bioacoustique Sous-Marine pour le Suivi de Cachalot

---

*Présenté par :*  
M. GAUCI William

**Tuteur :** GLOTIN Herve

**Laboratoire :** LIS & CIAN

## *Avant propos...*

Cette étude a été réalisée sous la direction de Mr Hervé Glotin, enseignant chercheur au laboratoire d'informatique et des systèmes (LIS) et du Centre international d'Intelligence Artificielle en Acoustique Naturelle (CIAN). Je souhaite sincèrement remercier Monsieur Glotin pour son implication dans mon projet, du temps qu'il m'a accordé, son aide et ses explications, sans quoi ces deux années de recherche n'auraient jamais eu lieu. Je souhaite aussi remercier toutes les personnes dont j'ai pu faire la connaissance et qui m'ont aidé lors de mon travail, lors de déplacements ou au laboratoire.

# Table des matières

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| <b>1</b> | <b>Introduction</b>   | <b>3</b>  |
| <b>2</b> | <b>Prise de Données</b>   | <b>4</b>  |
| 2.1      | Le Cachalot . . . . .   | 4         |
| 2.2      | Réception des signaux . . . . .   | 5         |
| 2.3      | Mission WhaleWay : L'enregistreur Bagheera . . . . .  | 6         |
| <b>3</b> | <b>Traitement et Analyse</b>  | <b>7</b>  |
| 3.1      | Temps de Delais d'Arrivée du Signal (TDoA) . . . . .  | 8         |
| 3.2      | Détermination équations positions : Azimut & Élévation . . . . .                            | 9         |
| 3.3      | Estimation de la distance et trajectoire 3D . . . . .                                       | 11        |
| 3.4      | Observabilité et estimation de la distance par Machine Learning [7] . . .                   | 13        |
| <b>4</b> | <b>Conclusion et Perspectives : Intelligence Artificielle avec Missions Sphyrna Odyssey</b> | <b>15</b> |
| <b>5</b> | <b>Références</b>   | <b>17</b> |
| <b>6</b> | <b>Résumé</b>   | <b>18</b> |

# Chapitre 1

## Introduction

La bioacoustique est une discipline scientifique qui consiste à étudier les signaux acoustiques émis par les animaux terrestres et marins. La bioacoustique dite sous-marine prend racine dans l'exploration des mers et océans ainsi que dans la compréhension de l'écosystème marin.

Plusieurs facteurs limitent l'exploration sous-marine, et l'absence de lumière en est la principale cause. En effet au-delà d'un kilomètre de profondeur l'obscurité règne. Cependant dans ces zones du globe trop peu connu se cache un écosystème bruyant, et c'est la raison pour laquelle nous développons depuis plusieurs décennies des méthodes afin d'observer dans cet inconnu. Les dernières avancées technologiques en termes d'enregistreur acoustique et d'hydrophone permettent une bien meilleure analyse des sons produits par les êtres peuplant les mers, de la baleine à bosse au simple poisson.

Nous avons lors de nos recherches étudié le cachalot ( *Physeter macrocephalus* ), espèce présente dans tous les océans et presque toutes les mers de notre globe, dont la Méditerranée. Cette espèce est menacée par l'activité Humaine, et son suivi acoustique permet de l'observer et l'étudier sans la déranger ni utiliser des méthodes invasive tel que le traçage GPS.

Dans ce rapport, nous allons dans un premier temps présenter brièvement notre source sonore : le cachalot. Puis nous verrons comment nous avons obtenu des enregistrements. L'analyse et le traitement des données sera évidemment abordé, de la détermination des équations et du calcul de l'azimut et de l'élévation à l'estimation de la distance séparant l'animal de l'antenne. Pour finir nous présenterons les perspectives de la *Mission Sphyrna Odyssey* qui s'est déroulée en 2019-2020, et plus particulièrement sur l'aspect du développement d'intelligence artificielle pour la détection acoustique de cétacés.

# Chapitre 2

## Prise de Données

### 2.1 Le Cachalot

Le cachalot (*Physeter macrocephalus*) est un prédateur qui se nourrit de calmars, de pieuvres ou encore de raies, qu'il chasse à des profondeurs atteignant plus d'un kilomètre pour les plus grands plongeurs. Or à de telles distances par rapport à la surface sa vue ne lui permet pas de se repérer, en effet les rayons lumineux sont considérablement atténués par l'eau et peine à atteindre des profondeurs de seulement 100 mètres. Ainsi le cachalot chasse et se repère par écholocalisation en émettant des clics, ces signaux sonores sont ensuite réfléchis par l'environnement et sont analysés par le cortex auditif de l'animal.

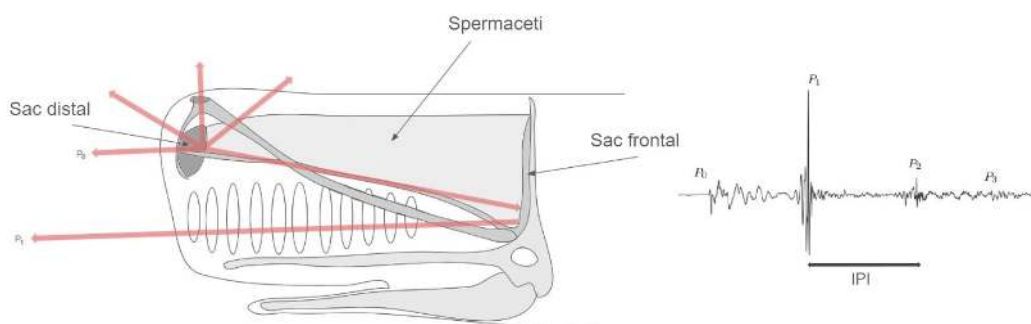


FIGURE 2.1 – Coupe de la tête du cachalot ( $\approx 3$  mètres ) et trajets issus de la vibration initiale  $P_0$  ainsi que la structure d'un clic.  $IPI \approx 3ms$

Les clics du cachalot présentent une structure multi pulsée. L'impulsion est initialement émise par le sac distal (  $P_0$  ) puis est réfléchi, et amplifié, par le sac frontal (  $P_1, P_2$ , etc). (**Figure 2.1**). L'intervalle de temps entre  $P_1$  et  $P_2$  est ce que l'on appelle *l'Inter Pulse Interval* (  $IPI$  ). L' $IPI$  correspond donc au temps mis par le son pour parcourir un aller-retour dans la tête, et dépend ainsi de la taille de cette dernière. Une formule simple permet de relier  $IPI$  à la taille de l'animal :

$$L = 1.417 \times IPI + 4.632$$

m                      ms

## 2.2 Réception des signaux

Le 5 octobre 2023, nous nous sommes rendues *in situ* au port de Sanary-Sur-Mer afin de récolter des enregistrements de cachalots pour les traiter et les analyser par la suite. Nous avons ainsi embarqué, avec près de 200 étudiants de l'UFR de Sciences et Techniques de l'UTLN, sur un navire de tourisme destiné à l'observation des cétacés et qui a été privatisé pour la matinée : la Croix Du Sud V. L'itinéraire n'est pas choisi au hasard (**Figure 2.2**), nous passons par trois points stratégiques. Une première mise à l'eau des dispositif au large de Sanary à une position où la profondeur est de -200m, puis une seconde au dessus du canyon de Cassis ( -200 et -1800m ), et enfin une dernière au dessus du plateau abyssal ( -2000m)

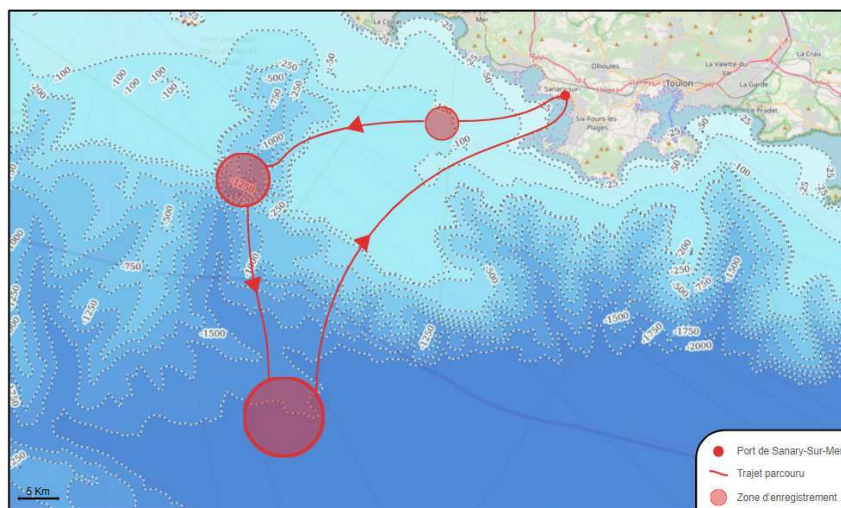


FIGURE 2.2 – Carte de notre itinéraire avec la Croix Du Sud V et points d'écoutes

Notre dispositif d'écoute est une antenne composée de deux hydrophones reliés à une carte son et un ordinateur. Ce dispositif nous indique en temps réel la présence d'individus via un spectrogramme. Son caractère double permet une détection spatiale du son reçu, en effet nous laissons traîner notre système à la poupe du bateau (**Figure 2.3**), ce dernier s'aligne alors avec l'axe du navire et nous pouvons déduire grâce au décalage temporel d'arrivée du signal (  $TDoA$ , cf (3.1)) entre l'hydrophone 1 (H1) et l'hydrophone 2 (H2) la direction du son enregistré. Cependant, comme nous ne disposons que de deux hydrophones, nous pouvons uniquement savoir si l'animal est devant ou derrière nous par rapport au bateau.

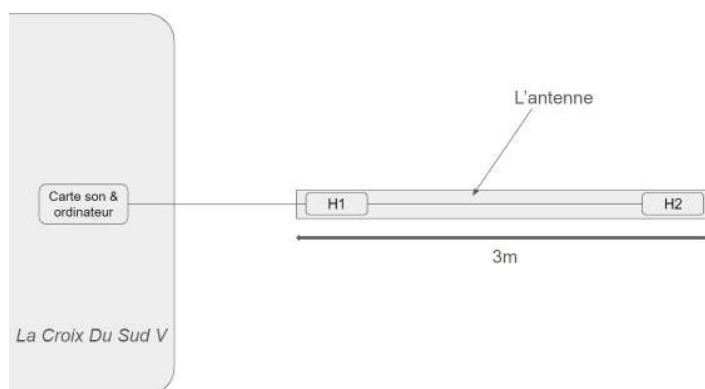


FIGURE 2.3 – Vue aérienne du dispositif mis à l'eau. Fréquence d'échantillonnage de 512 KHz, 24 Bits

Malheureusement nous sommes confrontés à différents problèmes. Beaucoup de bruit parasite nos enregistrements ( bruit de vagues, le moteur du bateau, etc). Le système est peu immergé, il reste en surface et est difficile à orienter malgré la corde prévue à cet effet. Ce système avait initialement été fabriqué pour un petit bateau à voile se déplaçant lentement. De plus, et sans surprise, nos enregistrements à -200 ne donnent aucun résultat. Et de même au-dessus du canyon de Cassis, à notre grande surprise. Finalement vers la fin de notre excursion, nous avons observé et enregistré des dauphins. Malheureusement aucun cachalot ce jour-là, nous rentrons donc sans données intéressantes à traiter.

## 2.3 Mission WhaleWay : L'enregistreur Bagheera

Mené par l'association *Longitude 181*, WhaleWay fait partie du programme de recherche "La Voix des Cachalots". En collaboration avec le CIAN ( Centre international d'Intelligence Artificielle en Acoustique Naturelle ) et l'université de Toulon, cette mission en Méditerranée a pour but d'étudier le comportement sociales des jeunes mâles mais aussi de la trajectographie et du suivi des cachalots en eau profondes afin de rechercher l'existence d'une coopération entre ces animaux lors de leurs chasses. L'objectif est avant tout d'obtenir de nouvelles informations sur le cachalot, espèce menacée par l'activité anthropique.

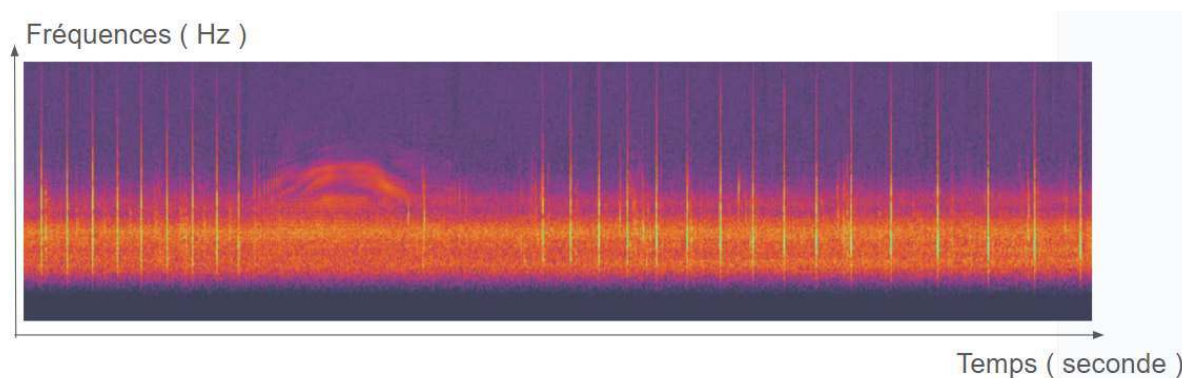


FIGURE 2.4 – *Spectrogramme de 30 secondes environ soit un sixième de l'enregistrement que nous avons traité. Train de clics de cachalot en chasse, WhaleWay septembre 2023*

En 2022-2023, WhaleWay a réalisé plusieurs missions en Méditerranée avec deux enregistreurs différents. Tétra, un système à quatre hydrophones, dispositif mobile utilisable depuis un zodiac. Sa carte mémoire lui permet une certaine autonomie.

Le second est l'antenne Bagheera (**Annexe 1**), cette dernière est un enregistreur à cinq hydrophones de fréquence d'échantillonnage de 256KHz. Elle permet la pentagulation des cachalots et donc une meilleure estimation 3D des clics. L'antenne est fixée sous le bateau, et reliée à l'ordinateur de bord il rend possible le suivi en direct des cachalots. Les enregistrements de Bagheera permettent de trajectographier ces animaux lors de leurs plongées et cela avec une très grande précision grâce au enregistreurs Jason (SMIOT) qui travaille au millionième de seconde.

C'est grâce à des enregistrements effectués par l'antenne Bagheera en septembre 2023 que notre étude à était réalisée. Ces derniers nous on servit de matières pour étudier les TDoA ( expliqué en 3.1 ) mais aussi de s'initier à la trajectographie.

# Chapitre 3

## Traitement et Analyse

L'analyse des enregistrements de l'antenne Bagheera a été effectuée par le biais d'un logiciel d'édition de sources audio numériques : Audacity. Ce logiciel indispensable permet traiter nos données sur plusieurs pistes mais aussi de retoucher et améliorer nos enregistrements. En effet, plusieurs outils d'Audacity seront essentiels pour notre étude.

Sur chacun de nos enregistrements que nous traitons, nous procédons toujours dans un premier temps à l'application d'un filtre passe-haut à 10 000 Hz. En effet, le cachalot "clic" à de hautes fréquences, l'application de ce filtre permet de supprimer tout le bruit et laisser place au clics (**Figure 3.1**). Puis si cela est nécessaire, nous amplifions le signal lorsque ce dernier est trop faible pour pouvoir l'analyser correctement. Cette étape d'amplification est nécessaire pour la lecture des TDoA sur les différents hydrophones.

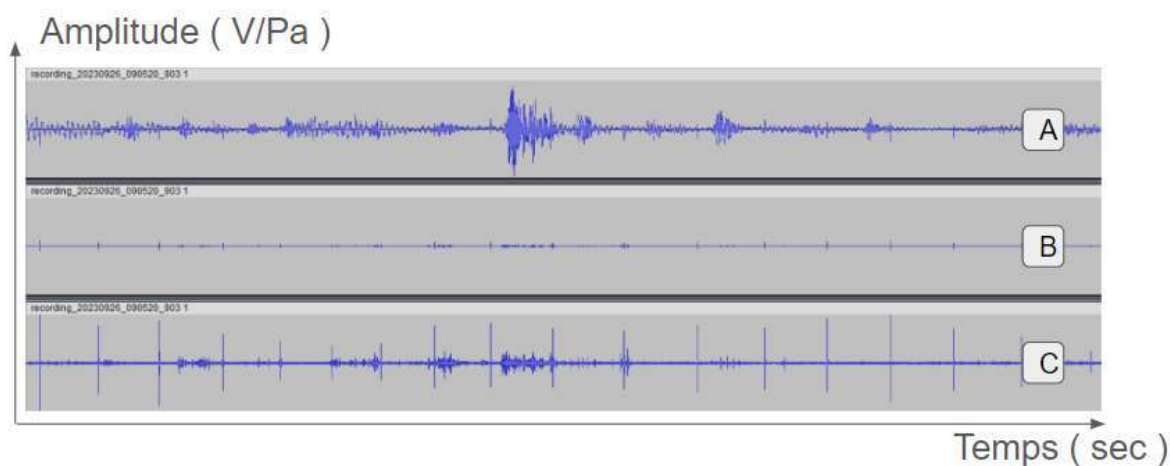


FIGURE 3.1 – *Piste H1 bruité (A), Piste H1 filtré (B), Piste H1 amplifié (C), Bagheera 26/09/2023 ( Audacity ). Durée de la sélection : 18.5s*

Une autre fonctionnalité essentielle de Audacity est la possibilité d'afficher le spectrogramme (**Figure 2.4**), fréquence en fonction du temps, du signal par transformé de Fourier. L'analyse fréquentiel est incontournable en acoustique, toutefois elle nous ne sera pas utile lors de cette étude.

### 3.1 Temps de Delais d'Arrivée du Signal (TDoA)

Comme évoqué précédemment, nous étudions l'antenne Bagheera. La **Figure 3.2** permet de visualiser et mieux comprendre l'antenne et l'agencement de ces 5 hydrophones dans l'espace. Sa forme particulière permet d'obtenir pour chaque capteur l'écart de temps d'arrivée du signal (**Figure 3.3**), c'est ce qu'on appelle les "Time Difference Of Arrival" (TDoA) qui sont la base du suivi par trajectographie.

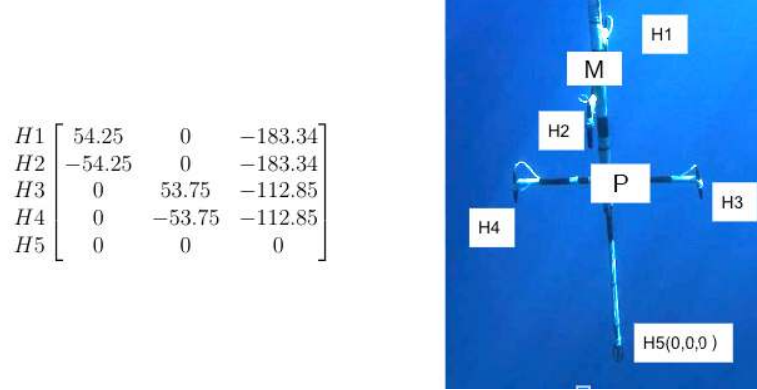


FIGURE 3.2 – *Bagheera (orientation des axes illustrative) et coordonnées cartésiennes des hydrophones en cm.*

En effet, ces écarts de temps sont fondamentaux pour positionner un cachalot dans une masse d'eau. Une analyse combinatoire entre chaque couple d'hydrophone en prenant la période de l'hydrophone 1 (H1) comme référence ( $t_{H1} = 0$ ) permet d'obtenir les délais d'arrivée du signal entre H1 et les capteurs 2,3,4 et 5. Ces délais permettent par pentagulation de positionner le clic dans le volume d'eau, puis en répétant l'opération on obtient une suite de position et ainsi une trajectoire.

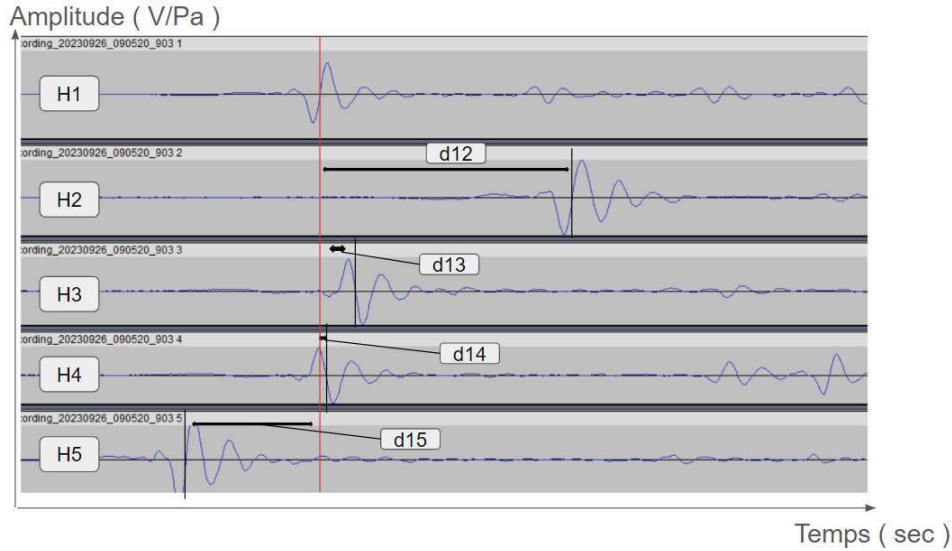


FIGURE 3.3 – *Détermination TDoA sur enregistrement Bagheera 26/09/2023 9h05, avec H1 comme référence ( Audacity ). Durée de la sélection : 140ms, amplitude en fonction du temps. Piste H3 et H4 inversé car capteur monté à l'envers ou piezo inversé dans la fabrication du capteur.*

C'est ce que nous avons effectué sur un enregistrement de Bagheera du 26/09/2023 à 9h05. L'enregistrement dure 180 secondes et a été enregistré avec une fréquence d'échantillonnage de 256KHz, c'est-à-dire 256000 échantillons par seconde. Nous avons donc

mesuré les TDoA sur une dizaine de clics pris aléatoirement dans tout l'enregistrement. Nos résultats sont présentés sous la forme d'un tableau, (**Figure 3.4**). Les délais sont exprimés en échantillons, pour les avoirs en secondes il suffit de diviser par la fréquence d'échantillonnage. Chaque clic est associé à un temps afin de pouvoir trajectographier par la suite, ces données nous seront indispensable pour la suite de notre étude.

| Clic | d12 | d13 | d14 | d15 | Temps       |
|------|-----|-----|-----|-----|-------------|
| 1    | 157 | 29  | -4  | -82 | 0,299359375 |
| 2    | 156 | 28  | -5  | -88 | 19,64626171 |
| 3    | 156 | 27  | -4  | -89 | 35,77331640 |
| 4    | 156 | 26  | -4  | -89 | 48,19830468 |
| 5    | 157 | 24  | 3   | -83 | 75,98459765 |
| 6    | 159 | 24  | 2   | -82 | 86,77380078 |
| 7    | 158 | 27  | 2   | -80 | 106,3017070 |
| 8    | 158 | 21  | 3   | -84 | 125,7753554 |
| 9    | 159 | 20  | 5   | -85 | 135,2191835 |
| 10   | 159 | 17  | 14  | -78 | 175,4291875 |

FIGURE 3.4 – TDoA mesuré en échantillons sur enregistrement Bagheera 26/09/2023 9h05, avec H1 comme référence ( Audacity )

## 3.2 Détermination équations positions : Azimut & Élévation

Afin de construire la trajectoire du cachalot pisté, nous avons besoin de déterminer l'azimut et l'élévation entre la source et l'antenne. Pour ce faire nous avons créé un code, dont nous ne ferons pas l'explication (**Annexe 2**), permettant de résoudre l'angle  $\theta$  et l'angle  $\phi$  à partir de deux équations. Une projection dans le plan  $z=0$  (**Figure 3.5**) permet de déterminer deux équations sur l'angle  $\theta$  (rotation autour de l'axe  $z$  de l'antenne).

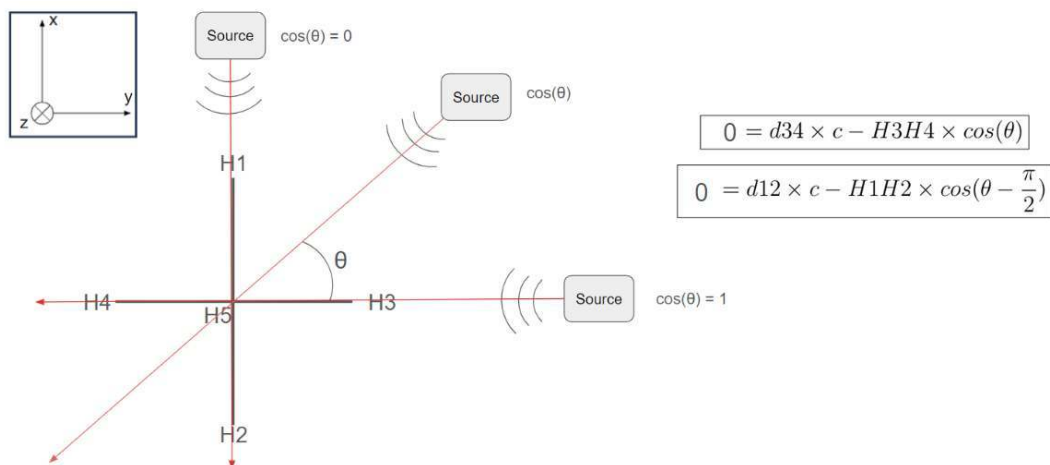


FIGURE 3.5 – Principe du solveur en azimut dans le plan  $e_z = 0$

"d34" (resp. "d12") correspond au TDoA entre H3 et H4 (resp. H1 et H2), "c" est la vitesse du son dans l'eau et "H3H4" (resp. "H1H2") la distance entre les deux hydrophones que nous obtenons grâce aux coordonnées des capteurs de l'antenne. La distance parcourue par une onde lors du délai entre deux capteurs est égale à la distance séparant

ces deux derniers multiplié par le cosinus de l'azimut. L'azimut étant l'angle formé par H3,H5,H1 dans le plan  $e_z = 0$ , c'est-à-dire l'angle formé par la source et le segment H4H3, qui n'est autre que l'axe y. C'est ainsi que nous obtenons nos deux équations, qui nous permettront de déterminer pour chaque délais l'azimut associé.

Un second code, très simple, nous permet d'afficher l'évolution de l'azimut calculer en fonction du temps (**Figure 3.6**). On peut déduire du diagramme radar que la source est situé sur l'axe x positif avec une faible composante en y négatif, ce qui coïncide avec nos enregistrements puisque le signal arrive en premier ( après le capteur le plus bas H5 ) sur l'hydrophone H1 (+x) puis H4 (-y). Cette trajectoire permet de visualiser les changements de direction de l'animal mais aussi nous permettra de faire une estimation sur la distance source-antenne (cf 3.3).

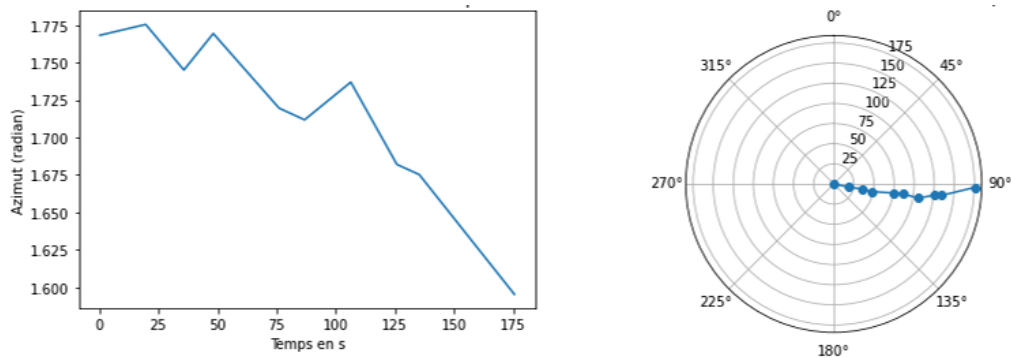


FIGURE 3.6 – Gauche : Évolution de l'Azimut en fonction du temps  
Droite : Évolution de l'azimut (degré) en fonction du temps en radar, 0° correspondant à la direction porté par H3 dans le repère de l'antenne, c'est-à-dire l'axe y

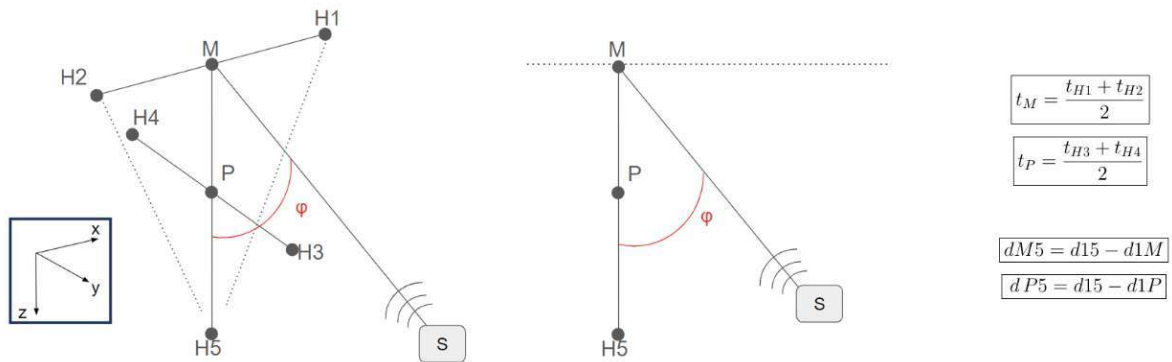


FIGURE 3.7 – Principe du solveur en élévation

Une seconde projection de l'antenne (**Figure 3.7**) nous permet cette fois de déterminer l'angle de l'élévation. Pour se faire nous exprimons l'angle  $\phi$  formé par le segment source-M ( point imaginaire équidistant de H1 et H2) et le segment M-H5. De la même manière que pour l'azimut nous déterminons deux équations (**Figure 3.8**) basé sur l'égalité entre la distance parcourue par l'onde lors du délai inter-capteur et la distance capteur-capteur multiplié par le cosinus de l'angle d'élévation. Nous avons besoin pour cela de définir deux points imaginaires sur l'antenne : M et P. Le temps d'arrivée du signal en ces points est calculé en faisant la moyenne du temps d'arrivée des deux hydrophones qui l'entoure. Par exemple pour le temps au point M est la moyenne des temps en H1 et H2, puis on en déduit le TDoA avec le capteur H5.

$$dM5 \times c - MH5 \times \cos(\phi) = 0 \quad dP5 \times c - PH5 \times \cos(\phi) = 0$$

Nous obtenons donc deux équations qui nous permettent de calculer  $\phi$  grâce à un solveur identique à celui de l'azimut. Enfin, pour obtenir l'élévation par rapport au niveau de la mer ( en positif ), on effectue l'opération suivante qui ne change rien au résultat mais donne plus de sens à notre donnée :  $El = \phi - \frac{\pi}{2}$

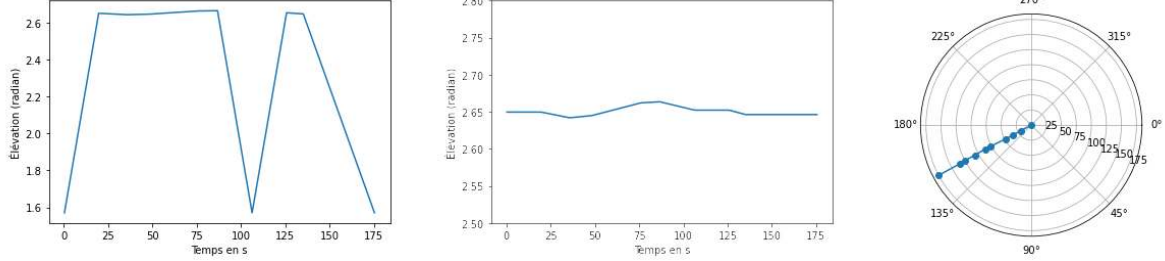


FIGURE 3.8 – De Gauche à Droite : Évolution de l'élévation en fonction du temps, Élévation après correction, Évolution de l'élévation (degré) en fonction du temps en radar, l'axe  $180^\circ-0^\circ$  correspondant au niveau de la mer

L'évolution de l'élévation en fonction du temps (**Figure 3.8**) permet de mettre en évidence trois discontinuité dans cette dernière. Ces erreurs sont engendrées par les possibles mouvements du bateau liés à l'agitation de la mer. Effectivement, nous avons fait l'approximation de négliger les mouvements de l'antenne dans nos calculs, il faut donc garder à l'esprit que nos mesures de TDoA et calculs d'azimut/élévation en sont fortement impactés. Comme nous n'avons pas d'information sur les mouvements de Bagheera, nous ne pouvons que corriger ces erreurs en les supprimant et en les remplaçant par la donnée calculer au clic+1 (**Figure 3.8**).

### 3.3 Estimation de la distance et trajectoire 3D

La dernière information dont nous avons besoin pour achever le suivi de l'animal est la distance. Cette dernière n'est, d'un point de vue mathématique, impossible à obtenir précisément juste à partir des mesures de TDoA qui nous avons. C'est pourquoi nous ne pouvons qu'obtenir uniquement une estimation sur la distance moyenne de l'animal.

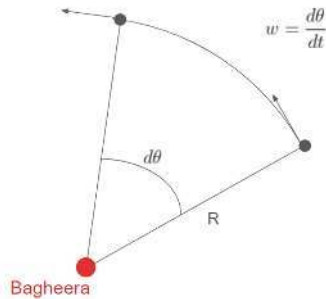


FIGURE 3.9 – Principe vitesse angulaire  $\omega$

Nous avons calculé ultérieurement l'azimut ( $\theta$ ) de la source, or nous savons que la vitesse angulaire d'un objet est égale à la dérivé  $d\theta$  par rapport au temps (**Figure 3.9**). Dans notre cas, cela veut dire que la vitesse angulaire du cachalot à chaque instant est égale à la dérivée de l'azimut par rapport au temps. Cependant, cela implique l'approximation que l'animal se déplace à une distance constante de l'antenne en formant un arc de cercle autour de cette dernière. Pour obtenir une vitesse angulaire la plus proche de la réalité, nous faisons le calcul sur la durée de l'enregistrement,  $dt=175$  secondes. La variation d'azimut durant cette période est donc  $1.59653 - 1.7743 = -0.1778\text{rad}$ , soit  $d\theta=0.1778$  rad en valeur absolue. On obtient ainsi :

$$\omega = \frac{d\theta}{dt} = \frac{0.1778}{175,13} = 0.00101525\text{rad/s}$$

De plus, en gardant toujours l'hypothèse d'un déplacement en arc de cercle à une distance constante des capteurs, nous savons exprimer la vitesse du cachalot en fonction du rayon et de la vitesse angulaire :

$$R = \frac{v}{\omega}$$

Sachant que la vitesse moyenne d'un cachalot est de 6km/h soit 1.6666... mètres par seconde, nous pouvons estimer le rayon source-antenne. La distance moyenne séparant ainsi Bagheera du cachalot étudié est donc de :

$$R = \frac{1.6666...}{0.00101525} = 1641m$$

Nous sommes maintenant en capacité d'afficher une trajectoire 3D de notre cachalot. En effet, nous avons désormais l'azimut, l'élévation et la distance. En utilisant une simple conversion de coordonnées sphérique en coordonnées cartésiennes, en veillant bien sûr à convertir nos angles comme ils le sont définis normalement dans le repère sphérique (**Figure 3.10**). La trajectoire obtenue est alors une projection sur une sphère de rayon 1641m, comme le rayon est assez grand, l'impact de cette courbure est négligeable sur notre tracé.

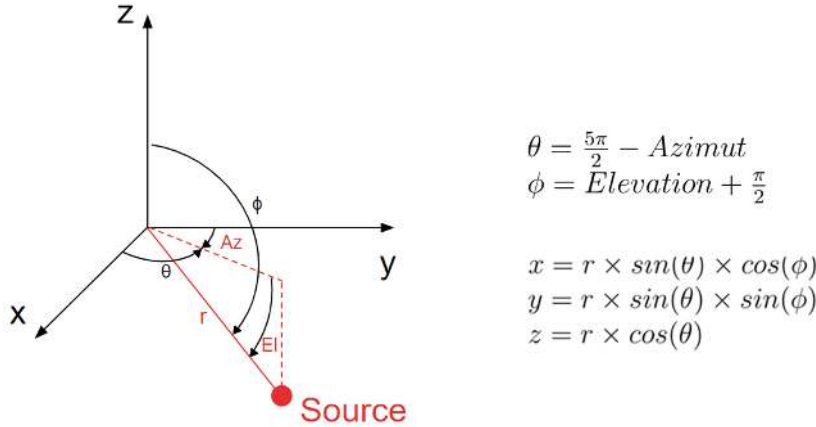


FIGURE 3.10 – Conversion coordonnées sphériques en cartésien. Et conversion Az et El en theta et phi

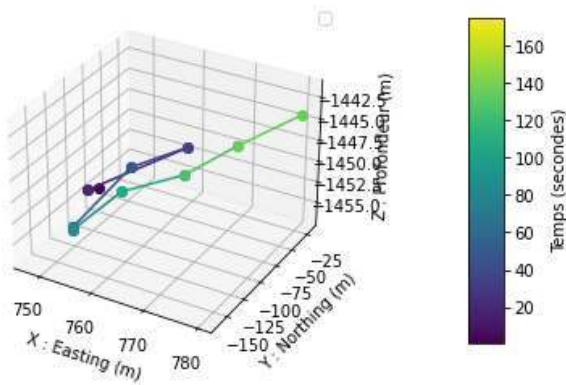


FIGURE 3.11 – Trajectoire 3D du cachalot en fonction du temps ( $dt=175sec$ )

Cette trajectoire 3D est cohérente, l'animal ne se déplace pas plus vite que 1.67m/s et est positionné à une profondeur de 1450 m environ, ce qui est possible lors d'une chasse. De plus on retrouve bien une source positionnée en x positif et en y négatif, ce qui est cohérent car nous avons précédemment vu lors des TDoA que le signal arrivé en premier sur H1 ( x positif ) puis H4 ( y négatif ). Il est essentiel de garder à l'esprit que cette trajectoire est le fruit de nombreuses approximations, et est donc à considérer avec précaution. Toutefois elle permet bien une estimation de la position du cachalot dans le volume d'eau par rapport à Bagheera.

### 3.4 Observabilité et estimation de la distance par Machine Learning [7]

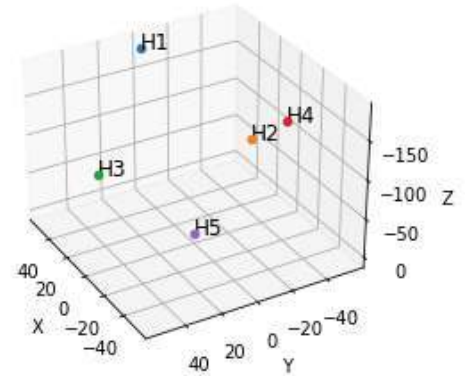
Une seconde méthode pour remonter à l'information sur la distance source-capteurs à partir des TDoA est d'utiliser un modèle basé sur du machine learning.

Le principe du machine learning est théoriquement simple. En possédant deux matrices, l'une étant les entrées et l'autre les sorties, on apprend au modèle à répondre  $y$  lorsqu'on lui donne  $x$  en entrée. Comme nous n'avons pour l'instant pas de données réelles de distance-TDoA, nous sommes obligé d'utiliser des données artificielles pour entraîner le modèle afin de l'utiliser ensuite sur les TDoA mesuré précédemment.

$$\boxed{f(x_1, x_2, \dots, x_n) = r'} \quad \boxed{(r' - r^*)^2}$$

FIGURE 3.12 – Principe machine learning illustré par une fonction  $f$ ,  $f'$  le rayon estimé,  $x_i$  les délais simulés ou non d'un clic, et  $f$  un réseau de neurone appris sur un ensemble tel que  $f$  minimise  $(r' - r^*)^2$ ,  $r^*$  étant le vrai rayon.

Pour se faire, nous avons (*Maurin PIRE*) créé un code permettant de générer  $n$  sources sonores autour d'une antenne à 5 hydrophones identique à Bagheera (**Figure 3.13**). Le modèle connaît les coordonnées de l'antenne ainsi que celles des  $n$  sources. En ayant toutes ces informations nous calculons à l'aide d'une simple équation les délais source-capteur :  $dt = dz/v$ , avec  $v=1500\text{m/s}$  et de la distance entre une source et un capteur. Puis les TDoA entre les capteurs ainsi que la distance antenne-source.



On obtient donc deux matrices, l'une avec les TDoA entre les capteurs (d12, d13, d14, d15) et une autre avec les distances associées. Soit pour les  $n$  sources sonores, nous avons une matrice de  $n \times 4$  TDoA et une autre de  $n \times 1$  distances correspondantes. Ces échantillons servent à hauteur de 80% à entraîner le modèle et les 20% restant à le tester.

FIGURE 3.13 – Positions des capteurs dans l'espace, identiques à ceux de Bagheera

Cependant, le modèle connaît des difficultés puisque à partir d'une dizaine de mètres le score de celui-ci est proche de 10% (**Annexe 4**), ce qui est clairement insuffisant pour pouvoir l'utiliser. Ce faible score s'explique par le fait que plus la distance considérée est grande, moins il y a de source entraînant le modèle dans l'espace. Une solution pour l'améliorer est d'augmenter le nombre de sources, mais cela à ses limites. Ainsi une solution plus juste (**Annexe 5**) est de faire bouger la source. Nous ajoutons ainsi des jambes aux  $n$  sources (**Figure 3.14**), c'est-à-dire des déplacements durant un intervalle de temps précis et à la vitesse d'un cachalot (6km/h). La source artificielle se déplace alors à une distance que nous moyennons sur l'ensemble de ses jambes en faisant l'approximation qu'elle est assez loin des capteurs, et elle ne peut pas faire de jambes dans n'importe quelle direction. Comme l'objet se déplace nous obtenons des délais source-capteur différents pour une même distance moyenne  $R$ , ce qui permet d'entraîner le modèle à assimiler différents TDoA pour une même distance.

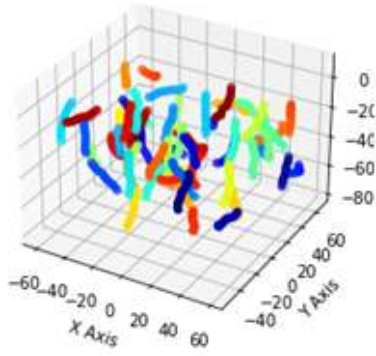


FIGURE 3.14 – Sources effectuant des jambes (Maurin PIRE)

Dans l'espoir de peut-être augmenter nos chances d'obtenir un résultats concluant avec nos données de TDoA réels, et connaissant déjà la direction de la source dans le volume d'eau grâce à nos précédant calculs d'azimut et d'élévation, nous avons entraîné le modèle dans une région de l'espace où se situe potentiellement l'animal, dans un rayon compris entre 500 et 5000 mètres.

Nous avons donc paramétré l'entraînement avec  $n=10\ 000$  sources effectuant 5 jambes d'intervalle de temps  $dt=1\text{sec}$ . Le modèle est entraîné avec des données fictives puis est testé avec des données artificielles et nos TDoA. Le système renvoie un score moyen de 0.76 (Score en  $R^2$ ), ce qui reste convenable mais à nuancer. Nous obtenons le résultat suivant, moyenné sur 15 tirages :

$$R \approx 4500m$$

Ce résultat est à considérer avec précaution, nous n'avons aucun moyen pour vérifier s'il est proche de la réalité mais il nous donne une information sur l'ordre de grandeur. Le principal problème de cette estimation repose sur la forte dispersion des résultats de chacun des tirages, allant de 1700m à 5000m.

En conclusion, nous ne pouvons pas discuter sur la véracité du modèle sachant que nous n'avons aucune information sur la distance réelle et nous ne pouvons pas non plus nous appuyer sur le calcul précédent de 1641.56m car lui aussi n'est qu'une estimation. Ces résultats soulignent le manque de précision du modèle actuel, et la nécessité de trouver de nouvelles solutions pour pouvoir l'améliorer. Toutefois, l'ordre de grandeur de la distance estimée reste convenable. Ce modèle aura pour usage d'un estimateur universel qui permet la fusion d'observable, les délais de clics, dans un modèle de régression non-linéaire qu'est un réseau de neurones.

## Chapitre 4

# Conclusion et Perspectives : Intelligence Artificielle avec Missions Sphyrna Odyssey

Les travaux réalisés jusqu'à présent lors de cette étude sont satisfaisants pour l'échantillon que nous avons traité. Cependant, lors de missions *insitu*, ce ne sont pas trois minutes d'enregistrements mais plutôt des heures voire des jours de données à analyser. Ainsi les méthodes précédemment présentées sont obsolètes pour traiter de plus grande quantité de données. D'autant plus que nous n'avons pas traité le cas où plusieurs individus seraient présents sur la scène acoustique. Il est donc impossible de traiter manuellement comme nous l'avons fait des heures de séquences audio, cela reste possible mais il faudrait plusieurs semaines pour tout étudier.



FIGURE 4.1 – *Un Sphyrna*

Depuis quelques années, des méthodes de suivi acoustique passive facilitant l'analyse des enregistrements sont en développement notamment grâce au développements des intelligences artificielles. Lors de la Mission Sphyrna Odyssey qui s'est déroulée dans le sanctuaire du Pelagos entre 2019 et 2020, la trajectographie d'un essaim de cachalots a été effectué par ce procédé. Contrairement à WhaleWay qui se sert d'une antenne fixe sous un bateau ( Bagheera ), SOM utilise des drones appelés sphyrna (**Figure 4.1**) qui sont en fait des pirogues de 17 à 20 mètres de long et qui, sur le même principe de pentagulation à l'aide de 5 hydrophones, enregistre de façon autonome et automatique avec une fréquence d'échantillonnage de 384 kHz grâce aux enregistreurs Qualiflife JASON de la plateforme technologique SMIoT UTLN. Les drones sont évidemment équipés de récepteur GPS ce qui permet par la suite de passer de la trajectographie dans le repère du sphyrna au repère absolu et offre aussi des perspectives de construction de super antennes qui pourraient permettre le suivi d'individus sur de longues distances grâce à un ensemble de drones.

Basé sur le même principe de délais d'arrivée du signal sur chaque capteur, SOM a réalisé la trajectographie sur un enregistrement de deux heures d'un essaim de cachalots en chasse au sud de Monaco. L'équipe a donc mesuré de façon totalement automatique les TDoA pour chaque clic de la séquence, puis à l'aide d'un solveur linéaire constitué d'un système d'équations paramétrées par la vitesse du son dans l'eau, la fréquence d'échantillonnage et la position des hydrophones on obtient la direction vers la source du son : l'angle azimut et l'élévation. SOM utilise ensuite un clustering "DBSCAN" pré-établi lors

de la mission sur les TDoA permettant la classifications des clics par individus avec un score très élevé. Un pistage manuel puis automatique par algorithme et un filtrage est ensuite effectué, et nous obtenons la direction du son en fonction du temps pour chaque individu .

Il faut ensuite associer une distance, un second solveur à été utilisé. Cette fois ci basé sur la méthode des moindre carré, il consiste à minimiser une fonction de coût pour approximer la solution recherchée. Le solveur est initialisé avec 4 positions et les résultats sont limités à un cube de 5000m de côté, le solveur donne une solution pour chaque position initiale. Les coordonnées ainsi obtenues sont dans le repère du drone. La centrale inertielle ( MPU) équipée sur le sphyrna permet de déduire les coordonnées dans le repère absolu. Ce qui permet d'obtenir la trajectoire 3D de chaque individu. Puis les artefacts sont retirés (vitesse ou Z incohérents), et un clustering permet un lissage par piste cohérente pour estimer (X,Y,Z). (*Figure 4.2*)

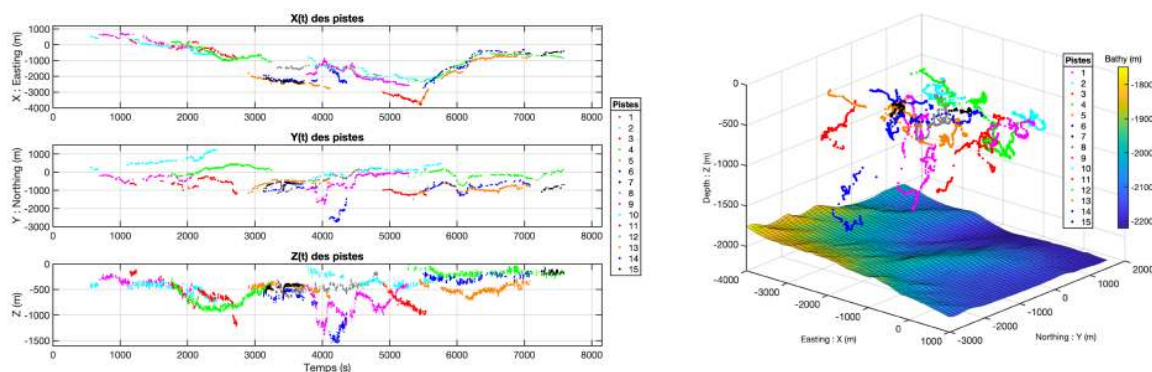


FIGURE 4.2 – Coordonnées 3D des pistes corrigés en fonction du temps dans le repère absolue et représentation 3D des 15 pistes

Une des nombreuses perspectives de la mission serait de pouvoir piloter et contrôler les drones à distance en fonction, et ainsi permettre un suivi passif sur plusieurs dizaines de kilomètres. Pour ce qui est de WhaleWay et l'enregistreur Bagheera, les résultats de trajectoire des cachalots en chasse profonde sont encore en études. Leurs analyses, commentaires, et peut-être nouvelles méthodes de trajectographie seront publiés prochainement.

La perpétuelle évolution de l'intelligence artificielle et ses applications permettent de jour en jour à améliorer et perfectionner nos études. Ce qui permet aux ingénieurs plus de précisions dans leur calculs, et au biologistes une meilleure compréhension du monde qui nous entoure. Évidemment, ces avancées technologiques en suivi acoustique ne servent pas exclusivement au suivi des animaux marins. Elles le sont aussi pour d'autres études scientifiques ou encore pour la sécurité maritime et la défense.

# Chapitre 5

## Références

[1] 3D diarization of a sperm whale click cocktail party by an ultra high sampling rate portable hydrophone array for assessing individual cetacean growth curves, 2021. *Maxence Ferrari, Hervé Glotin, Marina Oger, Ricard Marxer, Mark Asch, et al.* <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03078655/document>

[2] Sphyrna-Odyssey 2019-2020, Rapport I : Découvertes Ethoacoustiques de Chasses Collaboratives de Cachalots en Abysses & Impacts en Mer du Confinement COVID19, 2020. *Glutin, H. and Thellier, N. and Best, P. and Poupard, M. and Ferrari, M. and Viera, S. and Giés, V. and Oger, M. and Giraudet, P. and Mercier, M. and Donzé, G. and Campana, M. and Chevallier, J. and Malige, F. and Patris, J. and Prévot, J.M. and Cosentino, P. and Prévot d'Alvise, N. and Ourmières, Y. and Barchasz, V. and Lehir, A. and Marzetti, S. and Sarano, F. and Benveniste, J. and Gaillard, S. and de Varenne, F.* <http://sabiiod.org/pub/S01.pdf>

[3] Etude acoustique, génétique et éthologique des cachalots de méditerranée, mission WhaleWay, Longitude 181, 2023[https://www.longitude181.org/pdf/cachalots/Rapport\\_missions\\_WhaleWay1\\_2\\_3-Longitude181\\_LIS\\_CIAN.pdf](https://www.longitude181.org/pdf/cachalots/Rapport_missions_WhaleWay1_2_3-Longitude181_LIS_CIAN.pdf)

[4] Matplotlib, [https://koor.fr/Python/Tutoriel\\_Scipy\\_Stack/matplotlib\\_plot\\_3d.wp](https://koor.fr/Python/Tutoriel_Scipy_Stack/matplotlib_plot_3d.wp)

[5] Association Longitude 181, <https://www.longitude181.org/>

[6] International Center of Artificial Intelligence in Natural Acoustics ( CIAN ), <https://cian.lis-lab.fr/>

[7] Machine Learning, Maurin PIRE, Master Sciences de l'Océan de l'Atmosphère et du Climat ( SOAC ) encadré par Mr GLOTIN dans équipe du CIAN

[8] A 30 W Embedded Real-Time Cetacean Smart Detector *Sebastián Marzetti, Valentin Gies, Paul Best, Valentin Barchasz, Sébastien Paris, Hervé Barthélémy and Hervé Glotin* [https://www.researchgate.net/publication/350499634\\_A\\_30\\_W\\_Embedded\\_Real-Time\\_Cetacean\\_Smart-Detector](https://www.researchgate.net/publication/350499634_A_30_W_Embedded_Real-Time_Cetacean_Smart-Detector)

# Chapitre 6

## Résumé

During this research project focused on underwater bioacoustic tracking elements for monitoring sperm whales, we initiated ourselves into the scientific methodology of trajectory mapping. We worked in parallel on two aspects : how to retrieve data and what we can do to facilitate their acquisition. Most importantly, we focused on how to process and analyze these recordings, which carry a wealth of information. In this study, we mathematically determined the spherical coordinates of a sperm whale over 3 minutes using TDoAs, which corresponds to one-tenth of the period of a whale's hunting cycle. We also examined two methods to estimate distance, one based on angular velocity and another based on the principle of a universal estimator using machine learning. However, the presented methods are only satisfactory for a sample of a few minutes, which is why we ultimately present passive tracking techniques employing artificial intelligence.

Lors de ce projet de recherche portant sur des éléments de suivi en bioacoustique sous-marine pour le suivi de cachalot nous nous sommes initié à la méthodologie scientifique de la trajectographie. Nous avons ainsi travaillé en parallèle sur deux aspects. Comment récupérer des données et que faisons nous pour faciliter leur obtention. Mais surtout comment traiter et analyser ces enregistrements qui sont vecteurs de nombreuses informations. Nous avons donc lors de cette étude déterminé mathématiquement grâce aux TDoAs les coordonnées sphériques d'un cachalot sur 3 minutes, soit 1 dixième de la période d'une chasse d'un tel cétacé. Nous avons aussi vu deux méthodes afin d'estimer la distance, une basée sur la vitesse angulaire et une seconde basée sur le principe d'un estimateur universelle basé sur le machine learning. Toutefois les méthodes présentées sont uniquement satisfaisantes pour un échantillon de l'ordre de quelques minutes, c'est pour cela que nous présentons finalement des techniques de suivi passif faisant appel à l'intelligence artificielle.

## Annexe 1



FIGURE 6.1 – *Mission CIAN WhaleWay, Bagherra piste le cachalot, septembre 2023*

## Annexe 2

```
import numpy as np
from scipy.optimize import minimize
import math
import matplotlib.pyplot as plt

# Define the equation system and error function
def equations(vars):
    theta = vars

# -----
# Azimut/Elevation solver

#Délais :

dt12 =159/ 256000 # en sec
dt34 =-4/ 256000 # en sec
c= 1490 # en m/s
H1H2= 1.085 # en m
H3H4= 1.075 # en m

#Équations :
eq1 = dt34*c -H3H4*np.cos(theta)
eq2 = dt12*c -H1H2*np.cos(theta-(3.14/2))
return [eq1, eq2]

def error(vars):
    eqs = equations(vars)
    return eqs[0]**2 + eqs[1]**2
initial_guess = [1]

bnds = ((None, None))
result = minimize(error, initial_guess, method='SLSQP')

# Extraire valeur optimisé
theta_optimized = result.x

print("Optimized values:")
print("theta =", theta_optimized)

# %%Azimut en 2D

plt.plot([76636/256000, 5029443/256000, 9157969/256000, 12
plt.xlabel('Temps en s')
plt.ylabel('Azimut (radian)')
plt.show()
```

FIGURE 6.2 – code estimation azimuth/élévation et code affichage azimuth/élévation en fonction du temps

## Annexe 3

```
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
from mpl_toolkits.mplot3d import Axes3D
import matplotlib.cm as cm
import matplotlib.colors as mcolors

# Données fournies
time =
azimuth =
elevation =
distance =

# Conversion des coordonnées sphériques en coordonnées cartésiennes
x = []
y = []
z = []

for i in range(len(time)):
    r = distance[i]
    theta = elevation[i]
    phi = azimuth[i]
    x.append(r * np.sin(theta) * np.cos(phi))
    y.append(r * np.sin(theta) * np.sin(phi))
    z.append(r * np.cos(theta))

# Normalisation des valeurs de temps pour qu'elles soient comprises entre 0 et 1
norm = mcolors.Normalize(min(time), max(time))
colors = cm.viridis(norm(time))

# Tracé de la trajectoire en 3D avec dégradé de couleur
fig = plt.figure()
ax = fig.add_subplot(111, projection='3d')

for i in range(len(time) - 1):
    ax.plot(x[i:i+2], y[i:i+2], z[i:i+2], color=colors[i], marker='o')

# Ajouter le point rouge aux coordonnées (0, 0, 0) et le nommer "Bagheera"
ax.scatter(0, 0, 0, color='red', s=100)
ax.text(0, 0, 0, 'Bagheera', color='red')

# Nomme des axes
ax.set_xlabel('X : Easting (m)')
ax.set_ylabel('Y : Northing (m)')
ax.set_zlabel('Z : Profondeur (m)')

# Ajout de la barre de couleur
sm = plt.cm.ScalarMappable(cmap=cm.viridis, norm=norm)
sm.set_array([])

# Ajuster les marges pour faire de la place à la colorbar
fig.subplots_adjust(right=0.8)
cbar_ax = fig.add_axes([0.85, 0.15, 0.05, 0.7]) # [left, bottom, width, height]
cbar = fig.colorbar(sm, cax=cbar_ax)
cbar.set_label('Temps (secondes)')

# Ajouter la légende
ax.legend()
plt.show()
```

FIGURE 6.3 – code pour passer des coordonnées sphériques à cartésiennes et affiche 3D ( $x, y, z$ ) de l'objet

## Annexe 4

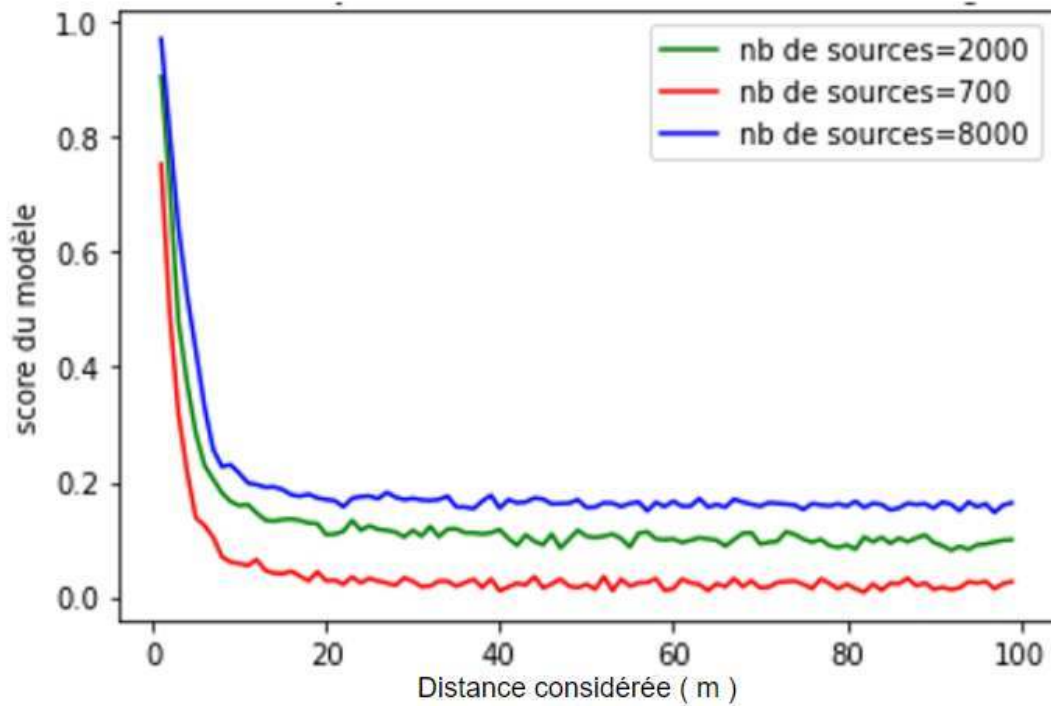


FIGURE 6.4 – Variation du score ( $R^2$ ) moyen en fonction de la distance considéré et du nombre de sources sonores ( Maurin PIRE )

## Annexe 5

Score en fonction de la distance, nb de sources sonores = 4500, nb de jambes = 2

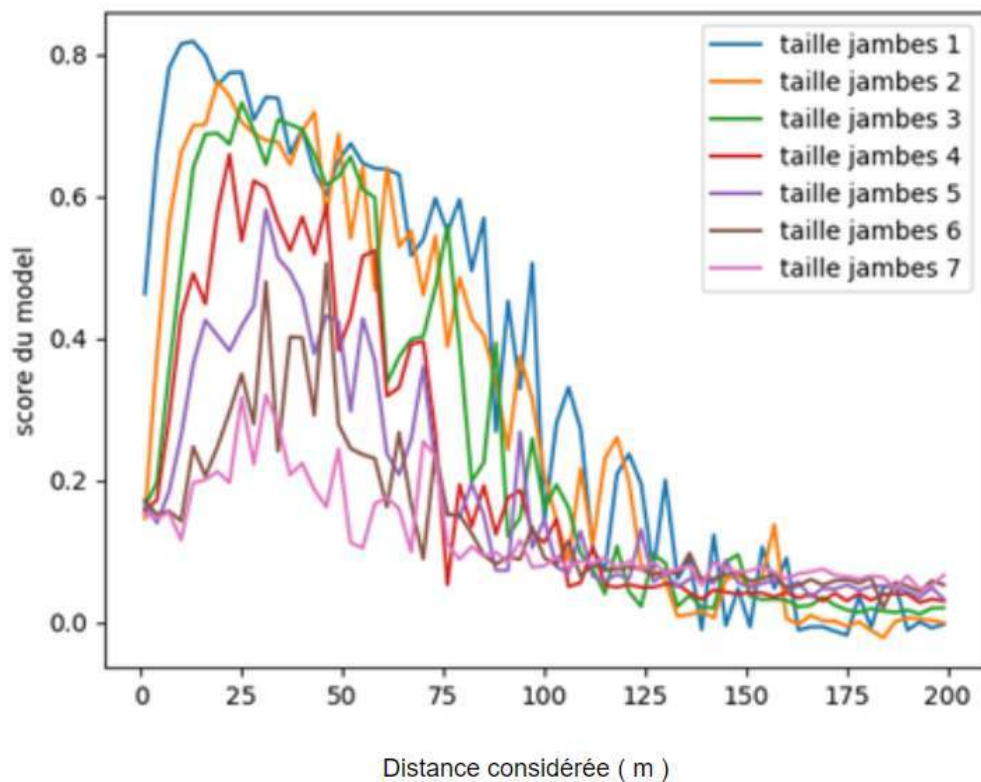


FIGURE 6.5 – Variation du score ( $R^2$ ) moyen pour 4500 sources sonores et 2 jambes en fonction de la distance considéré et de la taille des jambes ( Maurin PIRE )

## Annexe 6

| clic n° | d12 | d13 | d14 | d15 | Az (rad) | El (rad)          | R (m)    | temps (s)           |
|---------|-----|-----|-----|-----|----------|-------------------|----------|---------------------|
| 1       | 157 | 29  | -4  | -82 | 1.774378 | 1,570901          | 1641.559 | 0,299359<br>375     |
| 2       | 156 | 28  | -5  | -88 | 1.774378 | 2,649562          | 1641.559 | 19,64626<br>171875  |
| 3       | 156 | 27  | -4  | -89 | 1.750695 | 2,641877          | 1641.559 | 35,77331<br>640625  |
| 4       | 156 | 26  | -4  | -89 | 1.775677 | 2,644804<br>39321 | 1641.559 | 48,19830<br>46875   |
| 5       | 157 | 24  | 3   | -83 | 1.725091 | 2,662008<br>49321 | 1641.559 | 75,98459<br>765625  |
| 6       | 159 | 24  | 2   | -82 | 1.716559 | 2,663463<br>20321 | 1641.559 | 86,77380<br>078125  |
| 7       | 158 | 27  | 2   | -80 | 1.742652 | 1,570847<br>82321 | 1641.559 | 106,3017<br>0703125 |
| 8       | 158 | 21  | 3   | -84 | 1.686109 | 2,652187<br>98321 | 1641.559 | 125,7753<br>5546875 |
| 9       | 159 | 20  | 5   | -85 | 1.678954 | 2,646211<br>39321 | 1641.559 | 135,2191<br>8359375 |
| 10      | 159 | 17  | 14  | -78 | 1.678954 | 1,571127<br>21321 | 1641.559 | 175,4291<br>875     |

FIGURE 6.6 – Tableau récapitulatif des valeurs numériques mesurées et calculées dans le chapitre 3.2 et 3.3

## Annexe 7

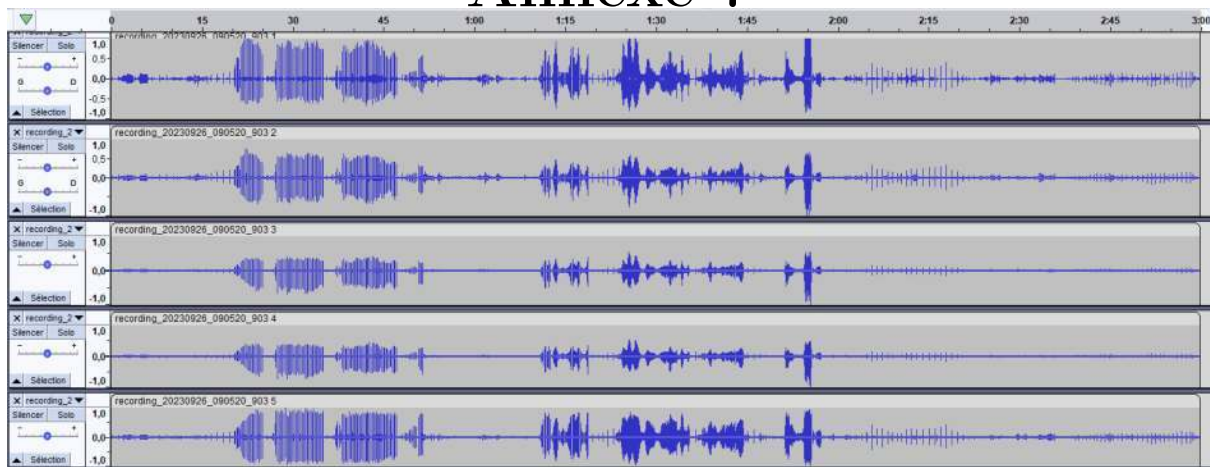


FIGURE 6.7 – Enregistrement complet filtré et amplifié analysé lors de l'étude, amplitude illustrative car amplifié. Un cachalot et un dauphin sont superposé sur cette enregistrement ( Dauphin : ensemble de clic très rapproché, entre 20sec et 50sec puis 1'10 et 1'50 )