



PROJET DE RECHERCHE PERSONNEL

2022-2024

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

Présentée par
William GAUCI

Sous la Direction de
Mr Hervé GLOTIN

UFR Sciences et Techniques - Licence Physique-Chimie



Table des Matières

- 1** Introduction
- 2** Prise de Données
- 3** Traitement et Analyse
- 4** Conclusion et Perspectives

Introduction



Figure 1.1 : Le Cachalot, Île Maurice 2016, **François Sarano** et al.

OBJECTIF : Trajectographie d'un individu à partir d'un enregistrement sonore.

Prise de Données

2.1 Le Cachalot

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

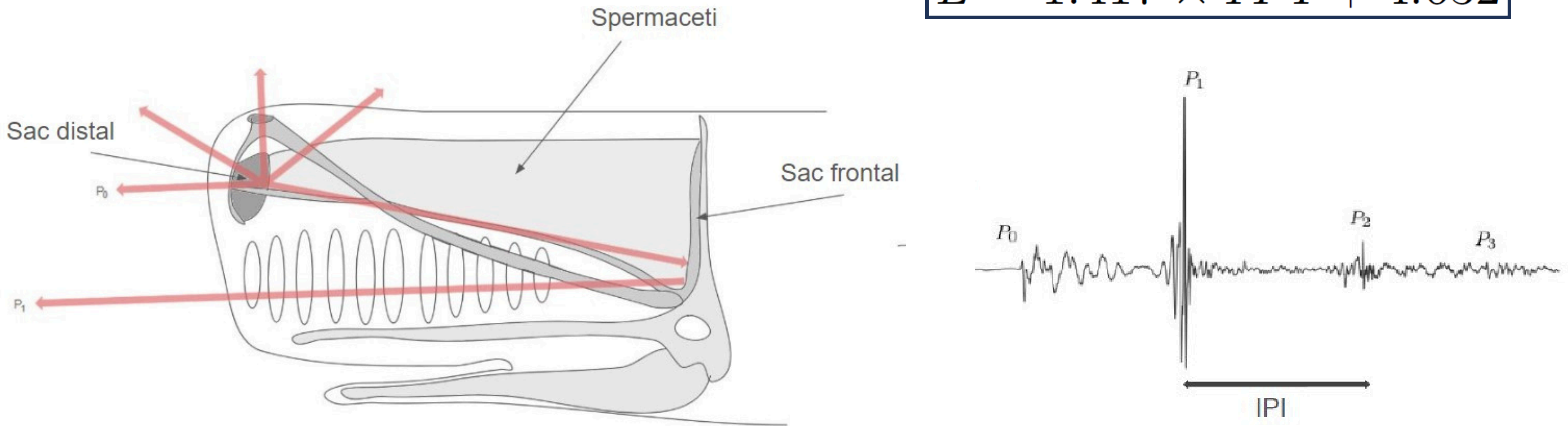


Figure 2.1 : Coupe de la tête du cachalot (≈ 3 mètres) et trajets issus de la vibration initiale P_0 ainsi que la structure d'un clic. $IPI \approx 3ms$, Sebastian Marzetti et al.

Prise de Données

Réception des signaux



Figure 2.2 : La Croix Du Sud V, Sortie organisée par l'UFR Science et Technique de l'UTLN rassemblant plus de 200 étudiants.

<https://croixdusud5.com>

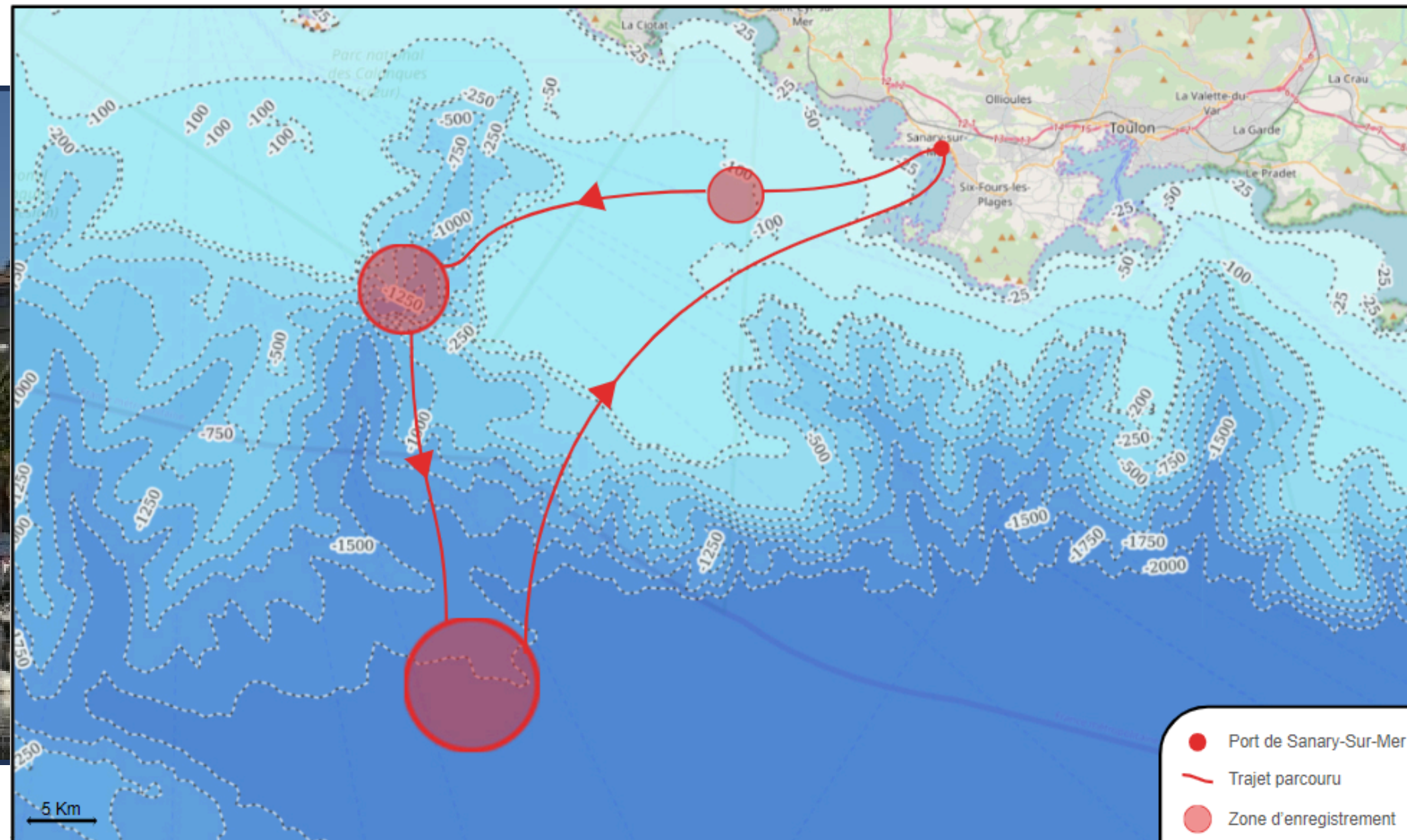


Figure 2.3 : Carte de notre itinéraire avec la Croix Du Sud V et points d'écoutes

Prise de Données

Réception des signaux



Figure 2.4 : Antenne constituée de deux hydrophones. Le dispositif est troué, ce qui permet à l'eau d'entrer dans l'antenne et une chaussette permet de casser le flux, ce qui réduit le bruit généré par ces trous.

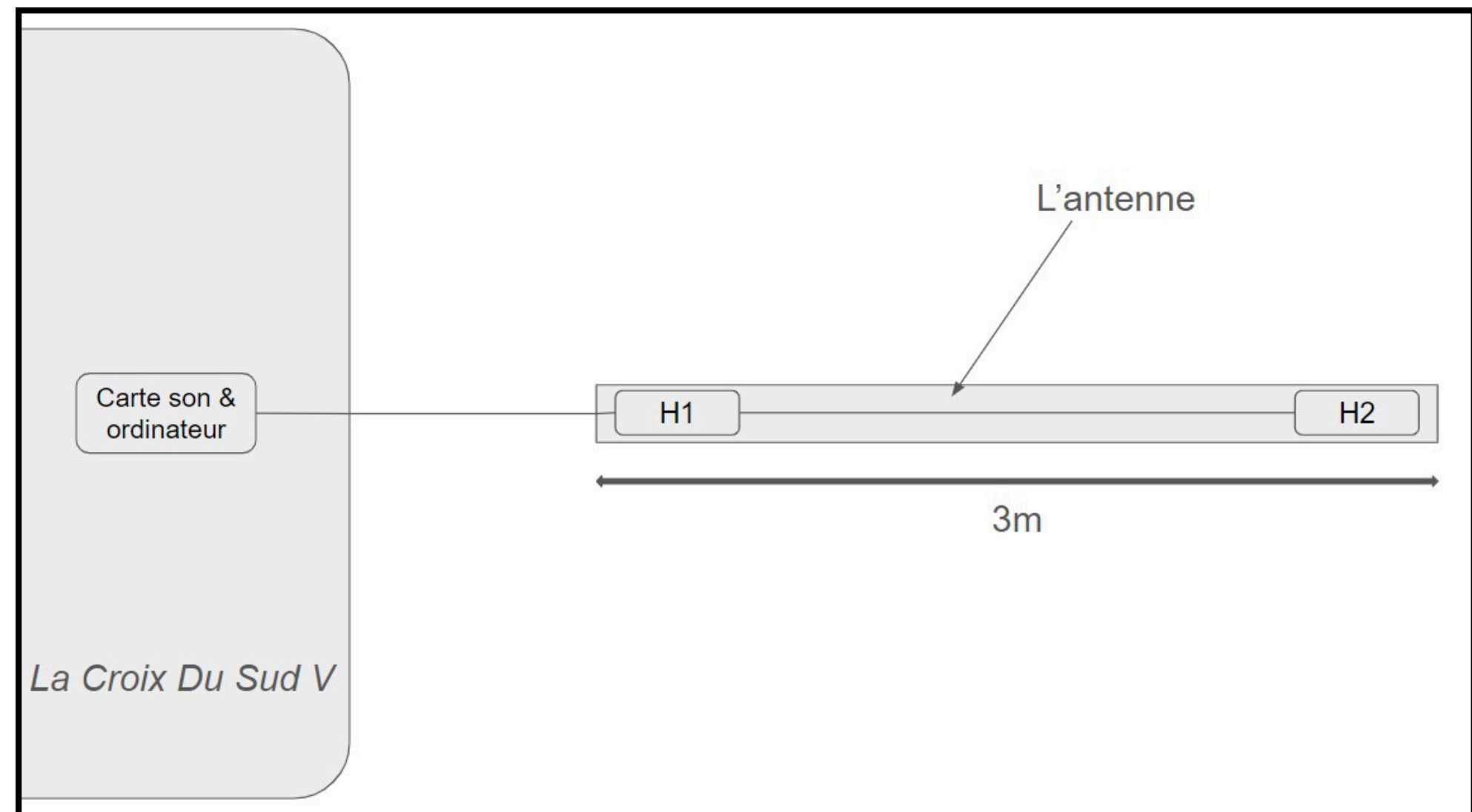


Figure 2.5 : Vue aérienne du dispositif mis à l'eau. Fréquence d'échantillonnage 512KHz, 24 Bits.

Prise de Données

Mission WhaleWay : L'enregistreur Bagheera

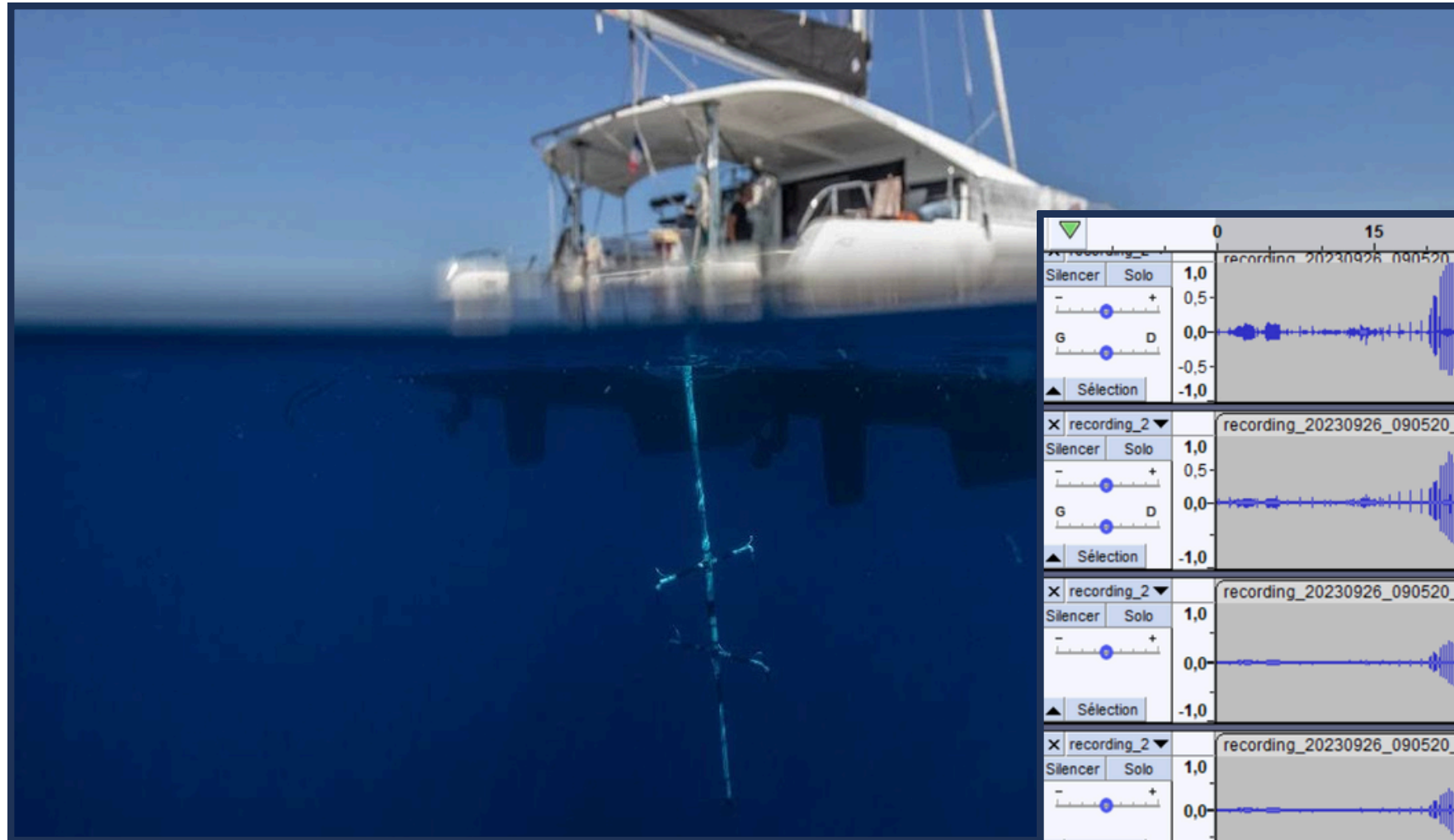


Figure 2.6 : Bagherra piste le cachalot septembre 2023, Mission CIAN WhaleWay.

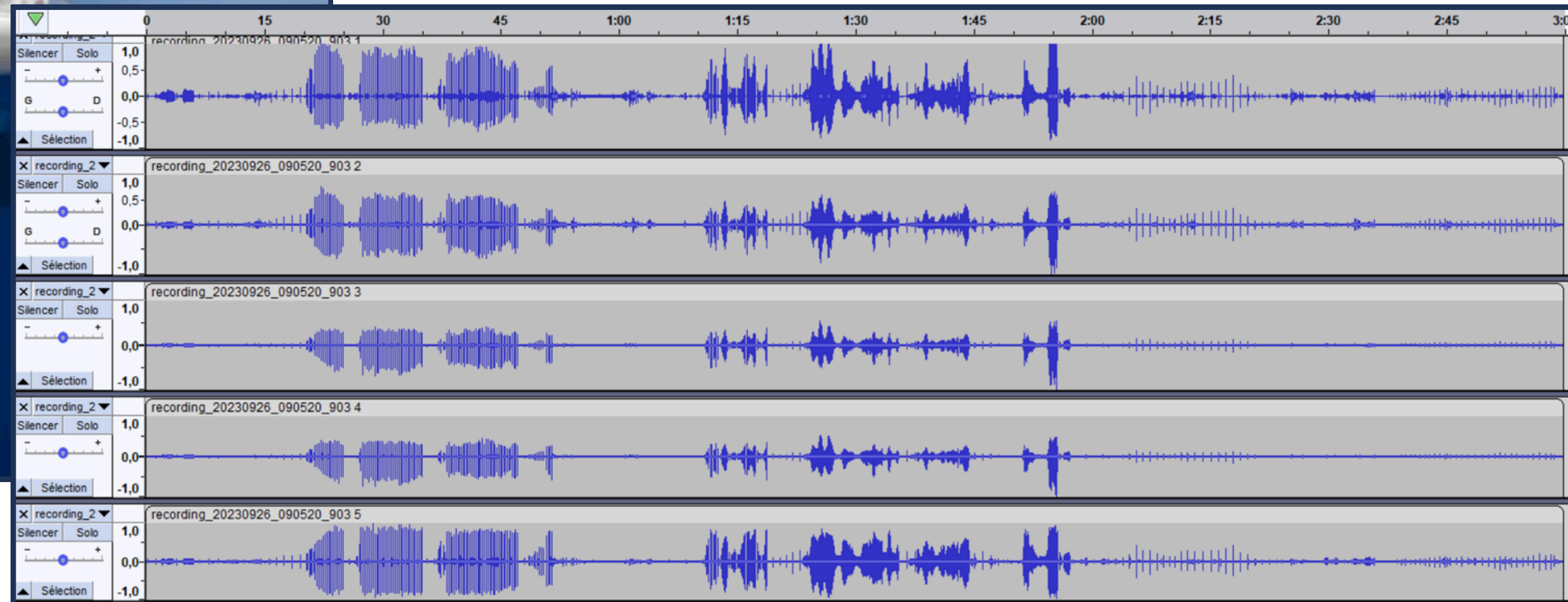


Figure 2.7 : Enregistrement complet filtré et amplifié analysé lors de l'étude, amplitude illustrative. Un cachalot et un dauphin sont superposés sur cet enregistrement (Dauphin : ensemble de clic très rapproché, entre 20sec et 50sec puis 1'10 et 1'50). Enregistrement de 3min, ce qui représente un dixième d'une période de chasse (30min).

Traitement et Analyse

Audacity

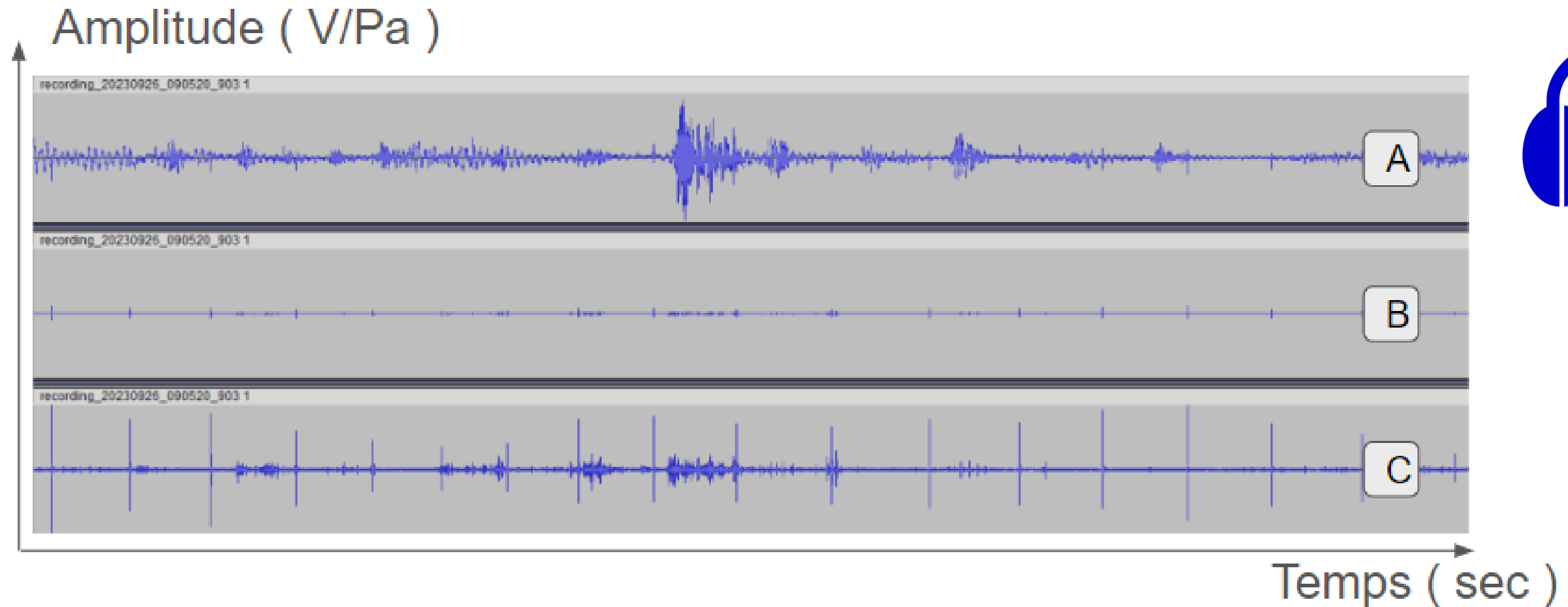


Figure 3.1 : Piste H1 bruité (A), Piste H1 filtré (B), Piste H1 amplifié (C), Bagheera 26/09/2023 (Audacity).
Durée de la sélection : 18.5s

Traitement et Analyse

Audacity

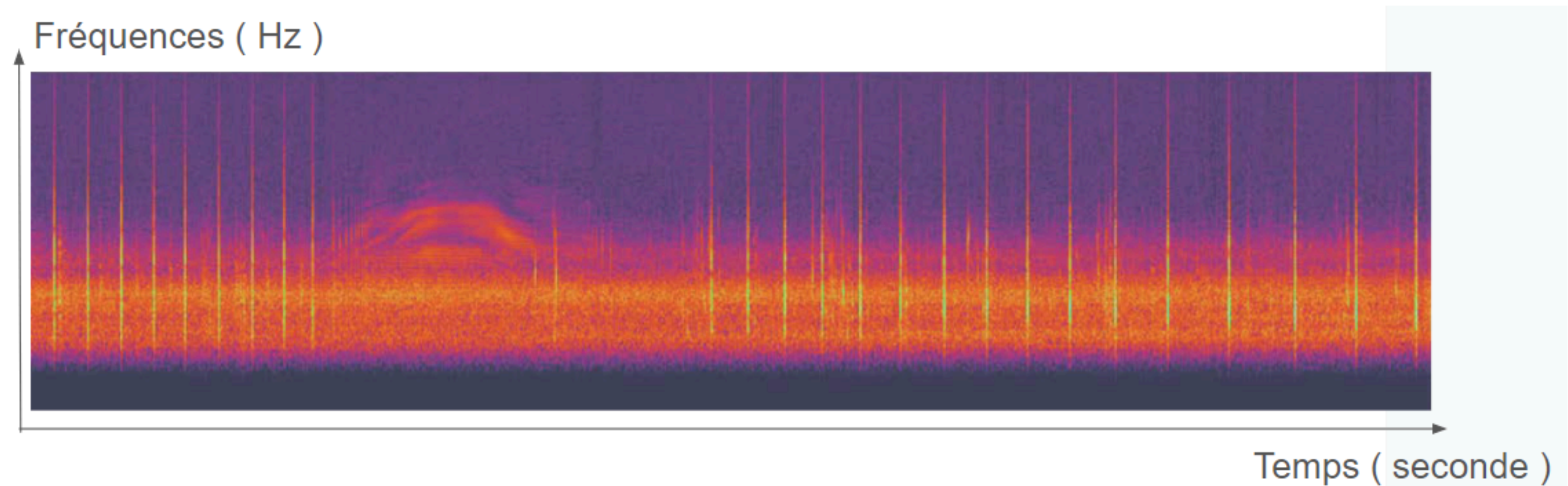


Figure 3.2 : Spectrogramme de 30 secondes environ soit un sixième de l'enregistrement que nous avons traité, de 0 à 13KHz. Train de clics de cachalot en chasse, **WhaleWay septembre 2023**

Traitement et Analyse

Les TDoA

$$\begin{array}{l} H1 \\ H2 \\ H3 \\ H4 \\ H5 \end{array} \begin{bmatrix} 54.25 & 0 & -183.34 \\ -54.25 & 0 & -183.34 \\ 0 & 53.75 & -112.85 \\ 0 & -53.75 & -112.85 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

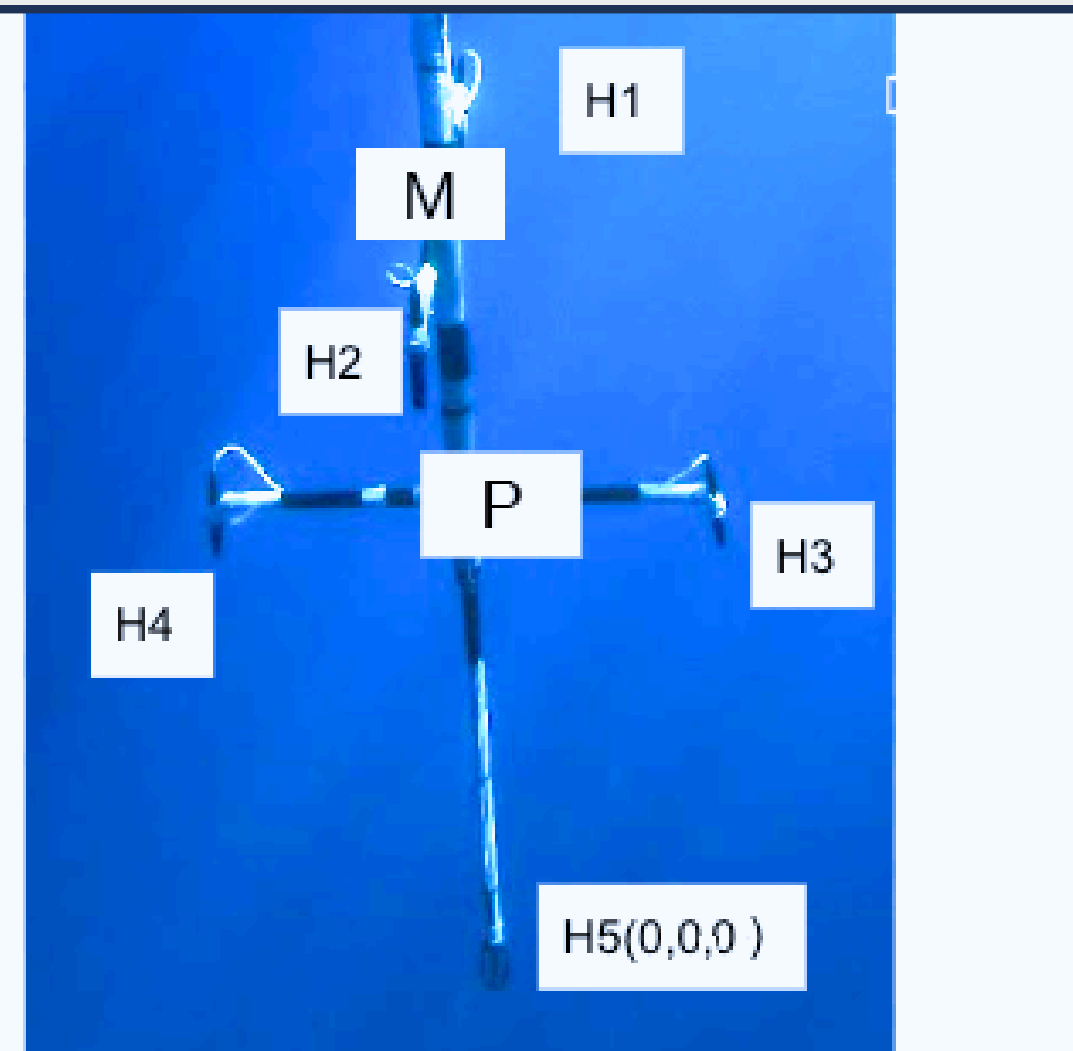


Figure 3.3 : Bagheera (orientation des axes illustrative) et coordonnées cartésiennes des hydrophones en cm.

Traitement et Analyse

Les TDoA

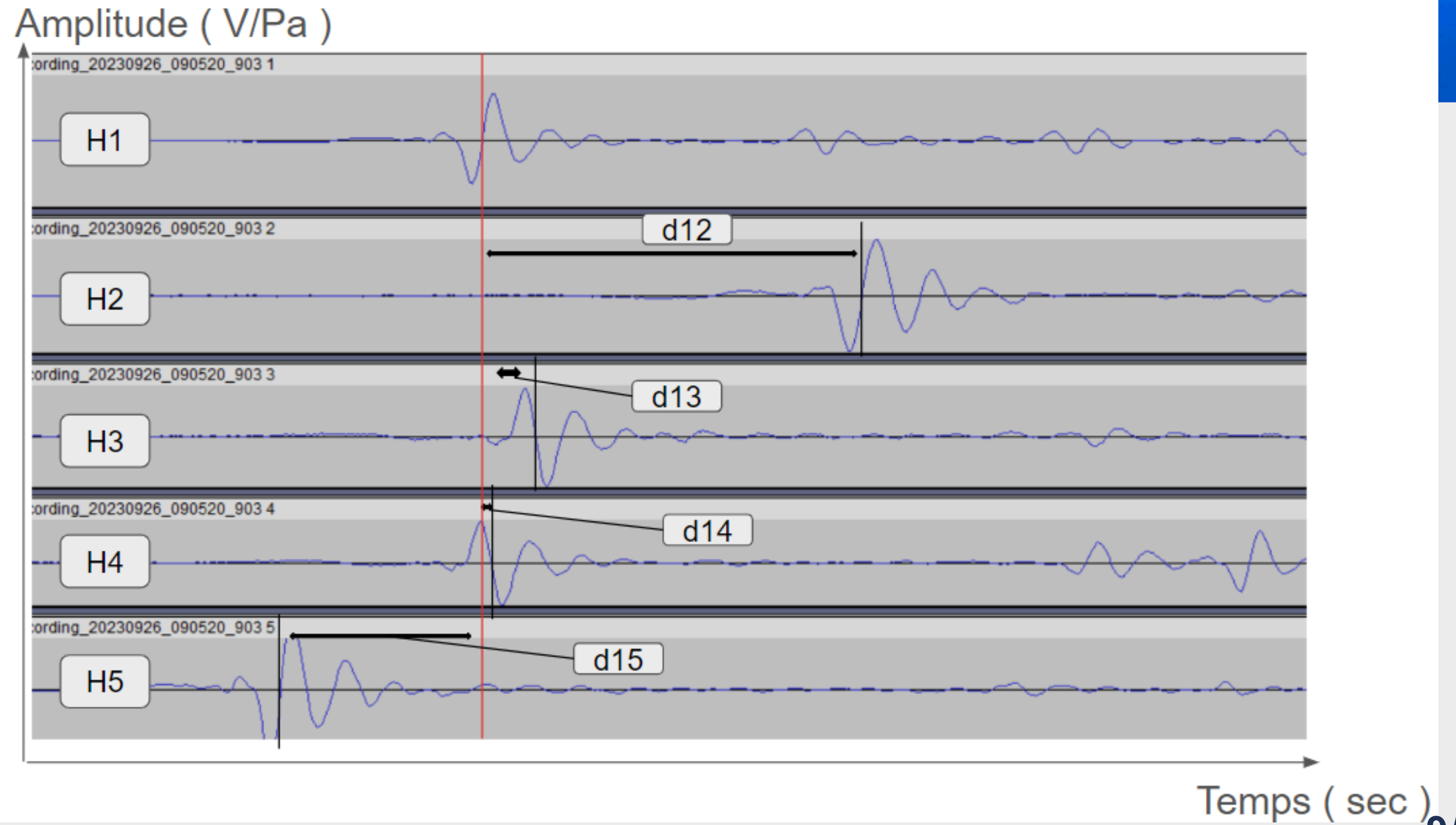
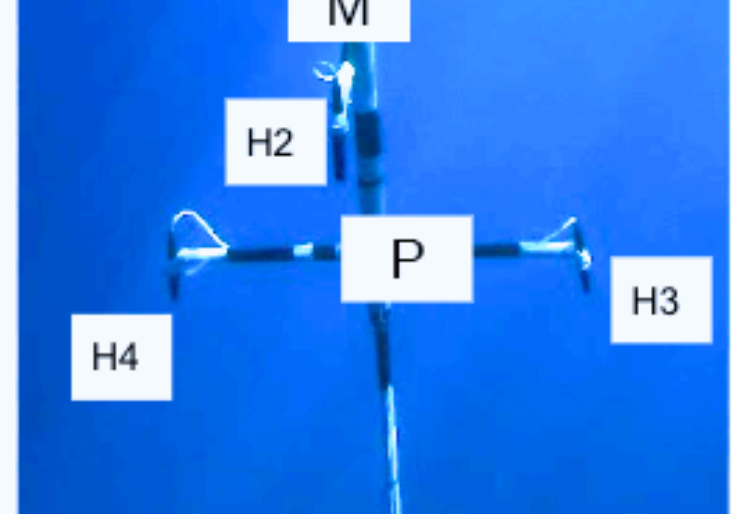
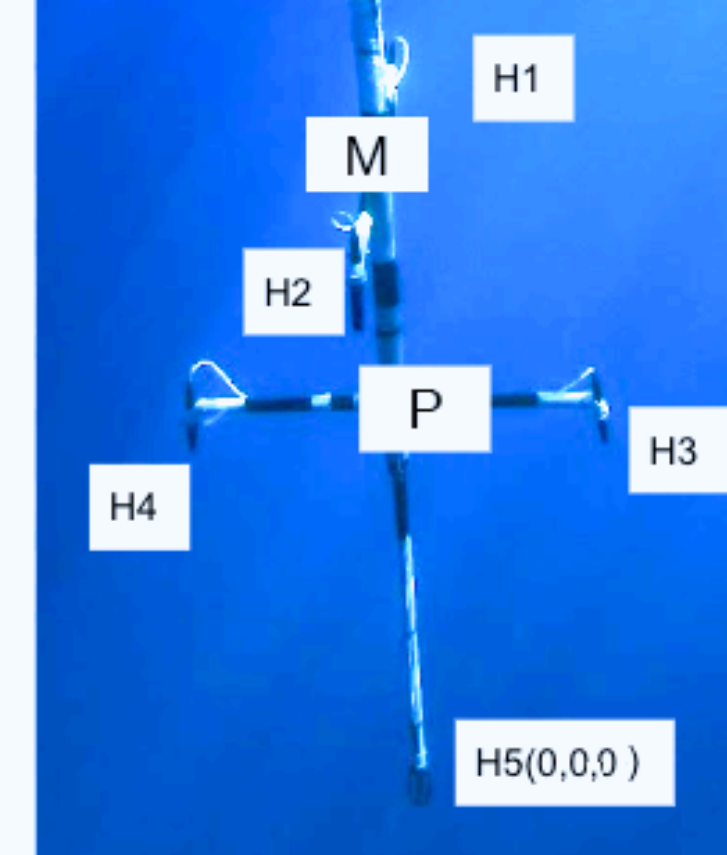
$$\begin{matrix} H1 \\ H2 \\ H3 \\ H4 \\ H5 \end{matrix} \begin{bmatrix} 54.25 & 0 & -183.34 \\ -54.25 & 0 & -183.34 \\ 0 & 53.75 & -112.85 \\ 0 & -53.75 & -112.85 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$


Figure 3.4 : 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.

Traitement et Analyse

Les TDoA

$$\begin{matrix} H1 \\ H2 \\ H3 \\ H4 \\ H5 \end{matrix} \begin{bmatrix} 54.25 & 0 & -183.34 \\ -54.25 & 0 & -183.34 \\ 0 & 53.75 & -112.85 \\ 0 & -53.75 & -112.85 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$



| 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 3.5 : TDoA mesurés en échantillons sur enregistrement Bagheera 26/09/2023 9h05, avec H1 comme référence (Audacity) avec temps de détection du clic dans l'enregistrement en secondes.

Traitement et Analyse

Détermination équations positions

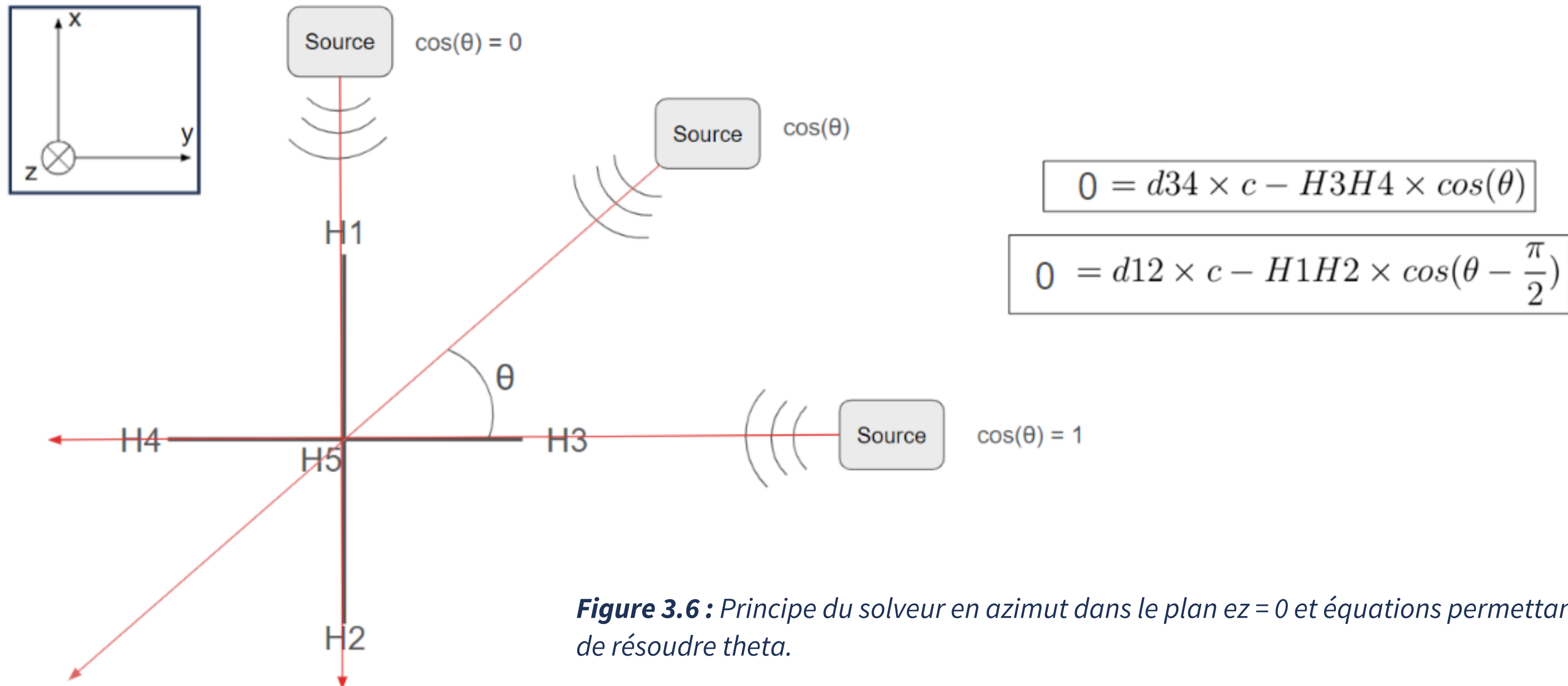


Figure 3.6 : Principe du solveur en azimuth dans le plan $ez = 0$ et équations permettant de résoudre θ .

Traitement et Analyse

Détermination équations positions

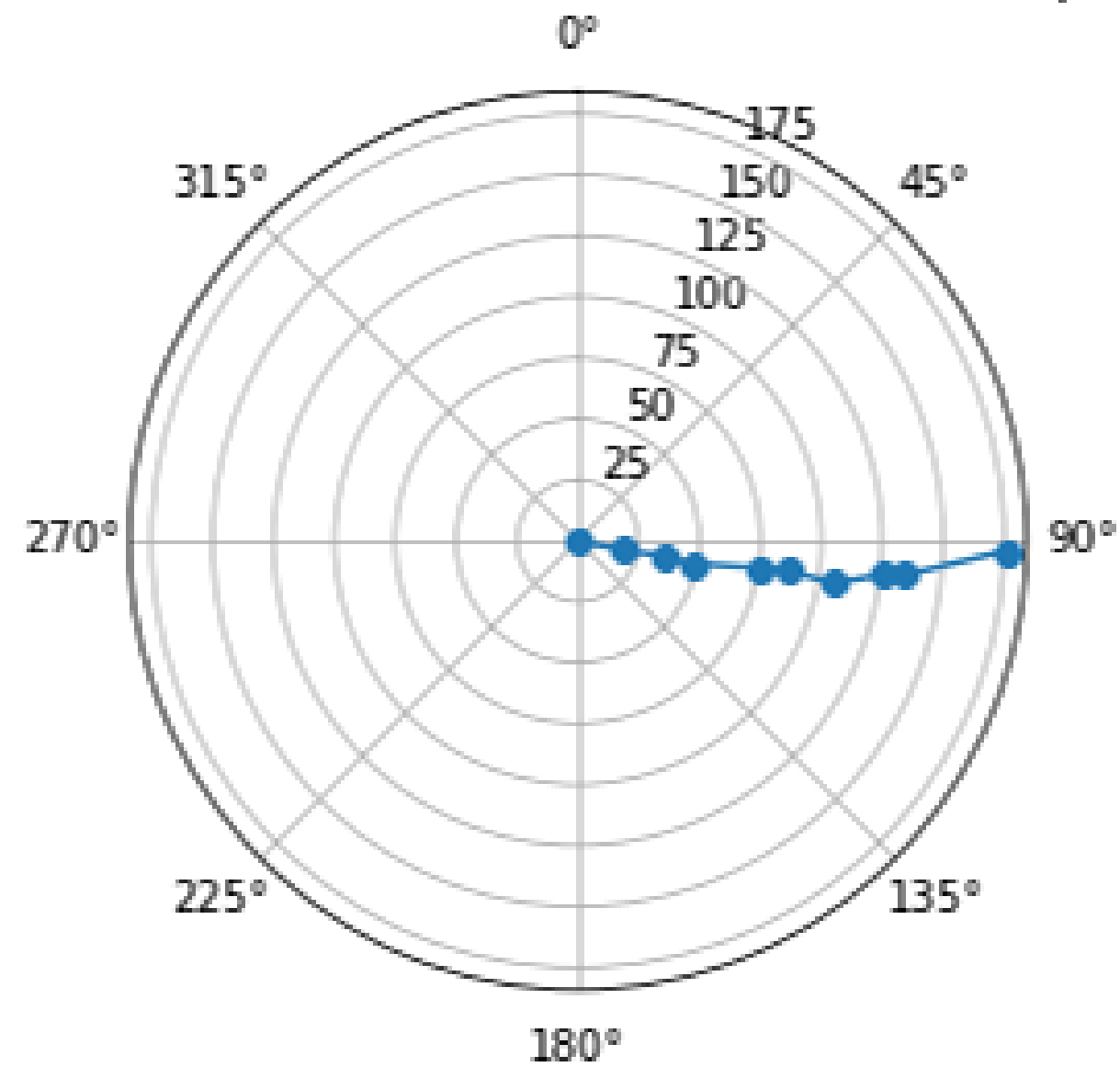


Figure 3.7 : Évolution de l'azimut (degré) en fonction du temps en radar, 0° correspondant à la direction portée par H3 dans le repère de l'antenne, c'est-à-dire l'axe y

Traitement et Analyse

Détermination équations positions

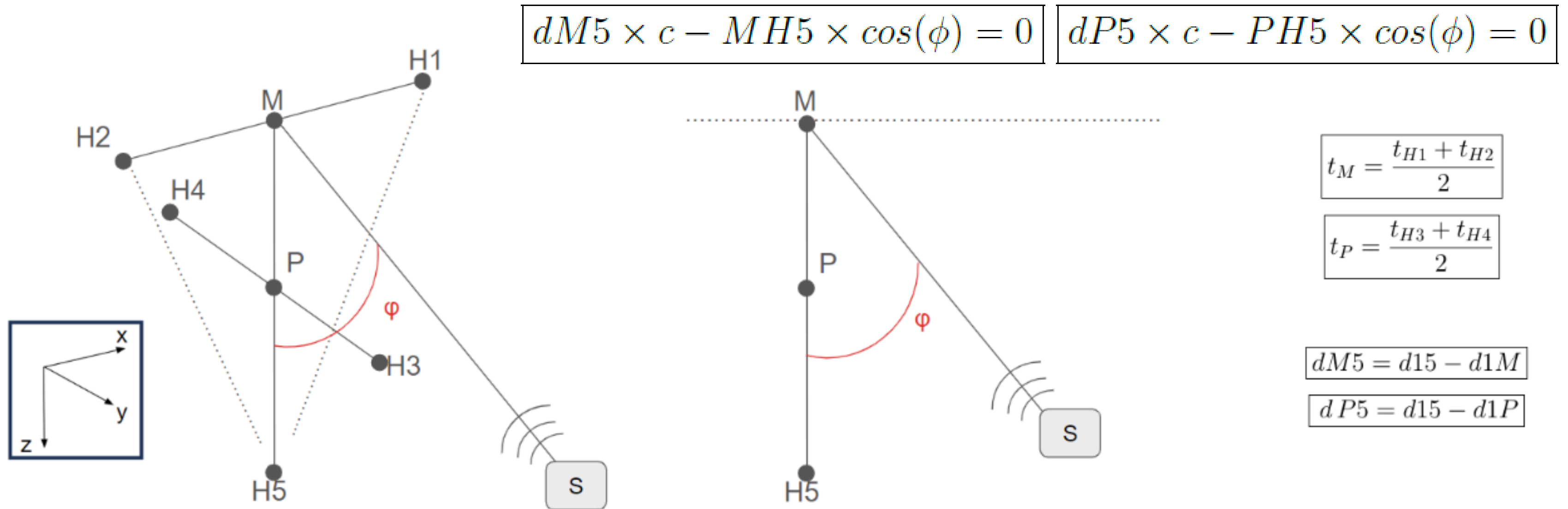


Figure 3.8 : Principe du solveur en élévation et équations permettant de résoudre phi

Traitement et Analyse

Détermination équations positions

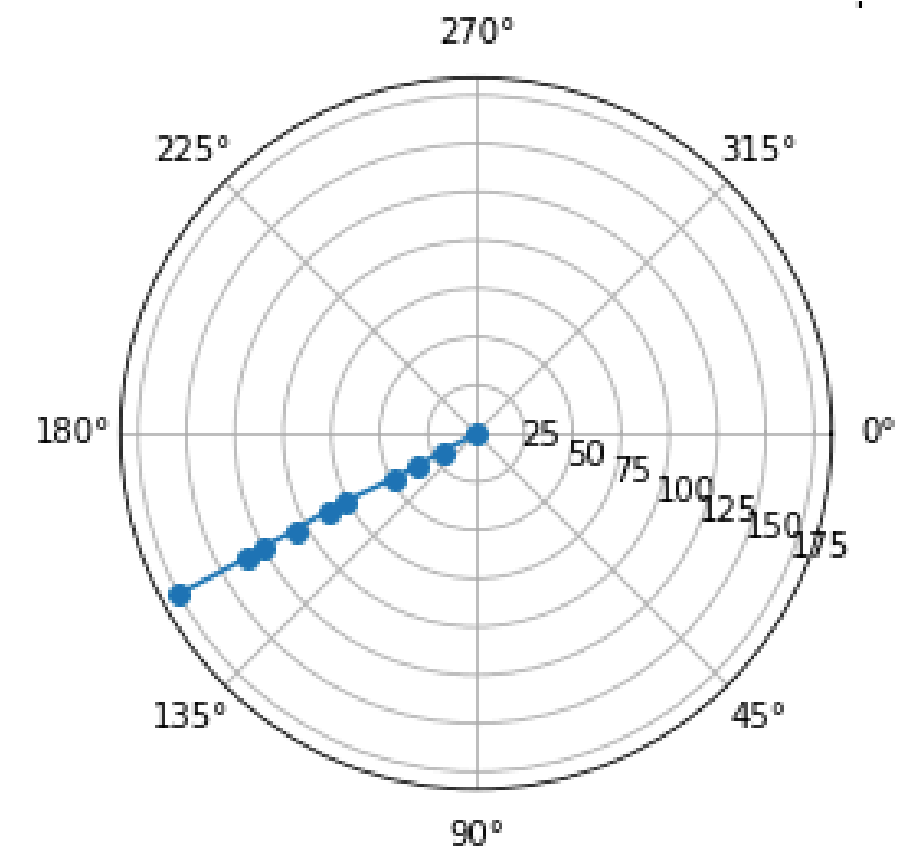
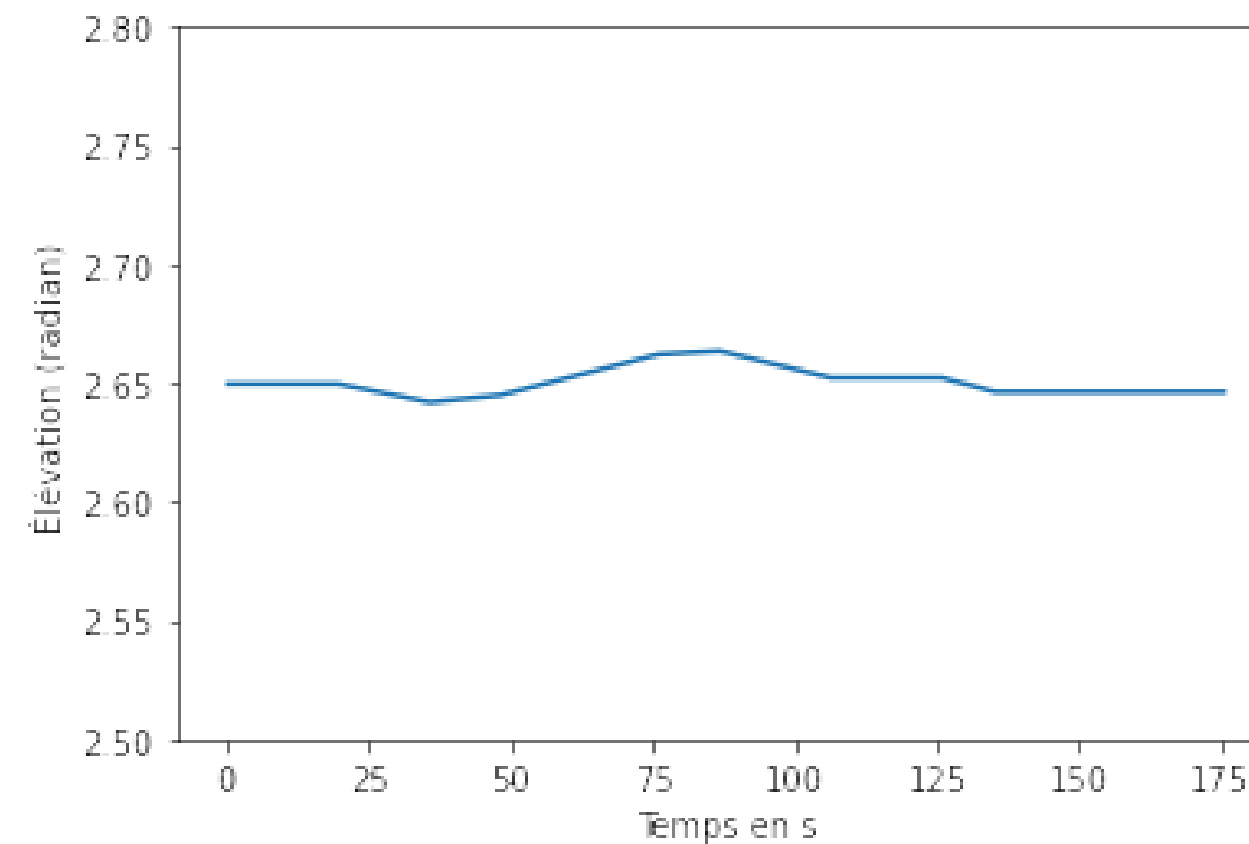
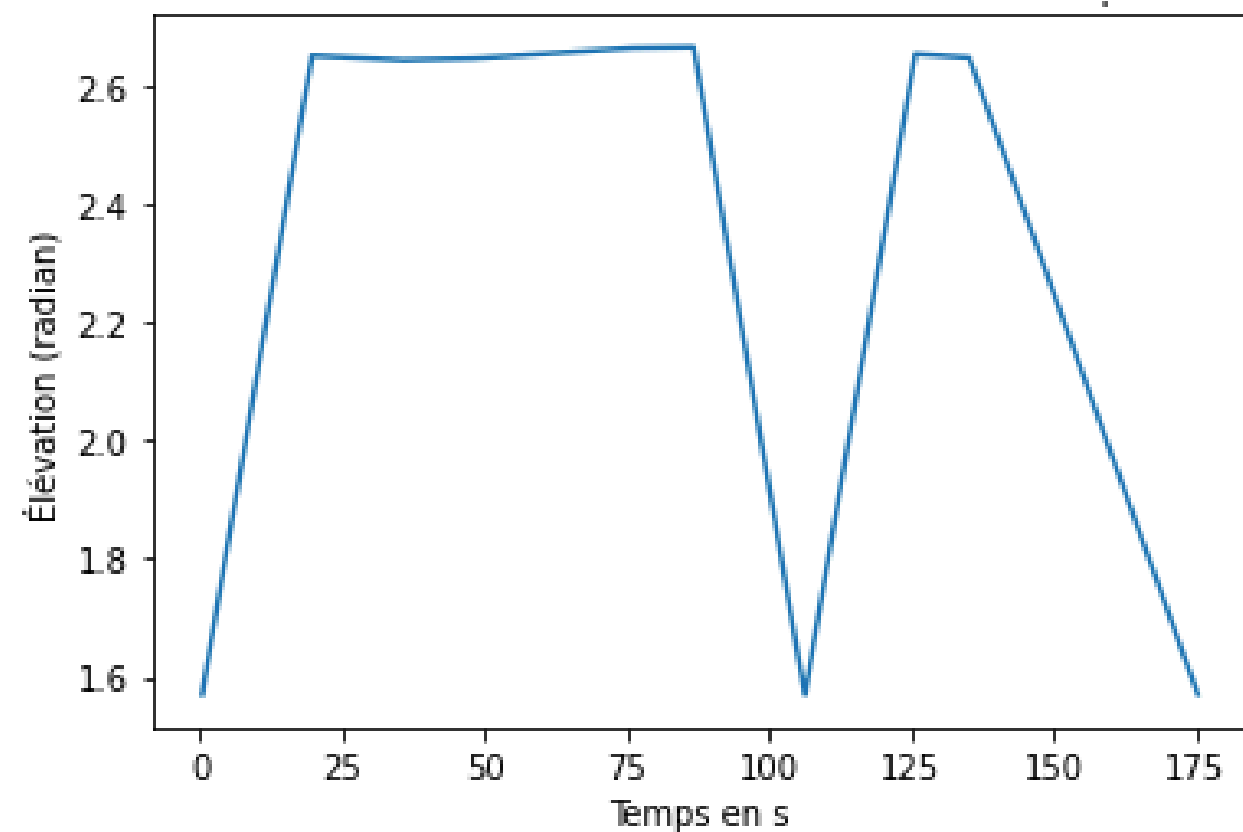
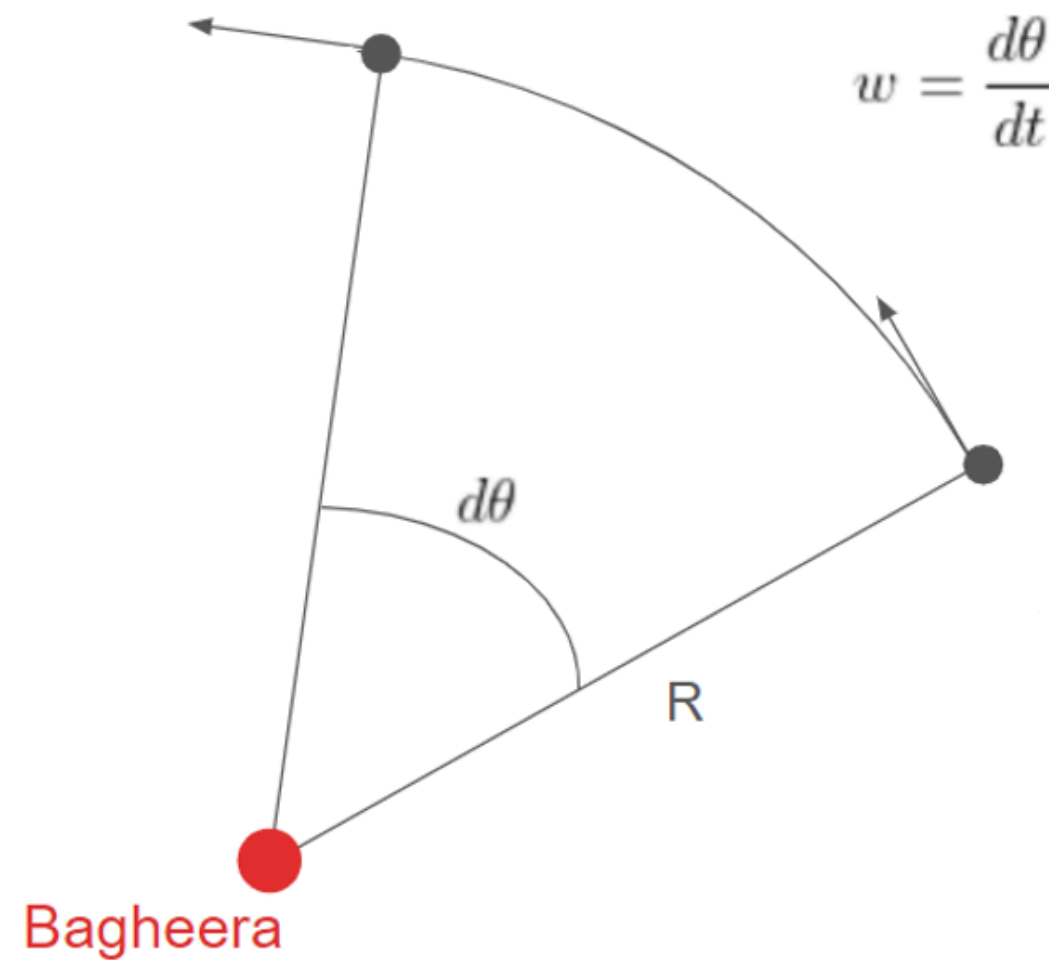


Figure 3.9 : De Gauche à Droite : Évolution de l'élévation en fonction du temps, Élévation après correction, Évolution de l'élévation (degré) en fonction du temps en radar, l'axe 180°-0° correspondant au niveau approximatif de la mer

Traitement et Analyse

Estimation de la distance et trajectoire 3D



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

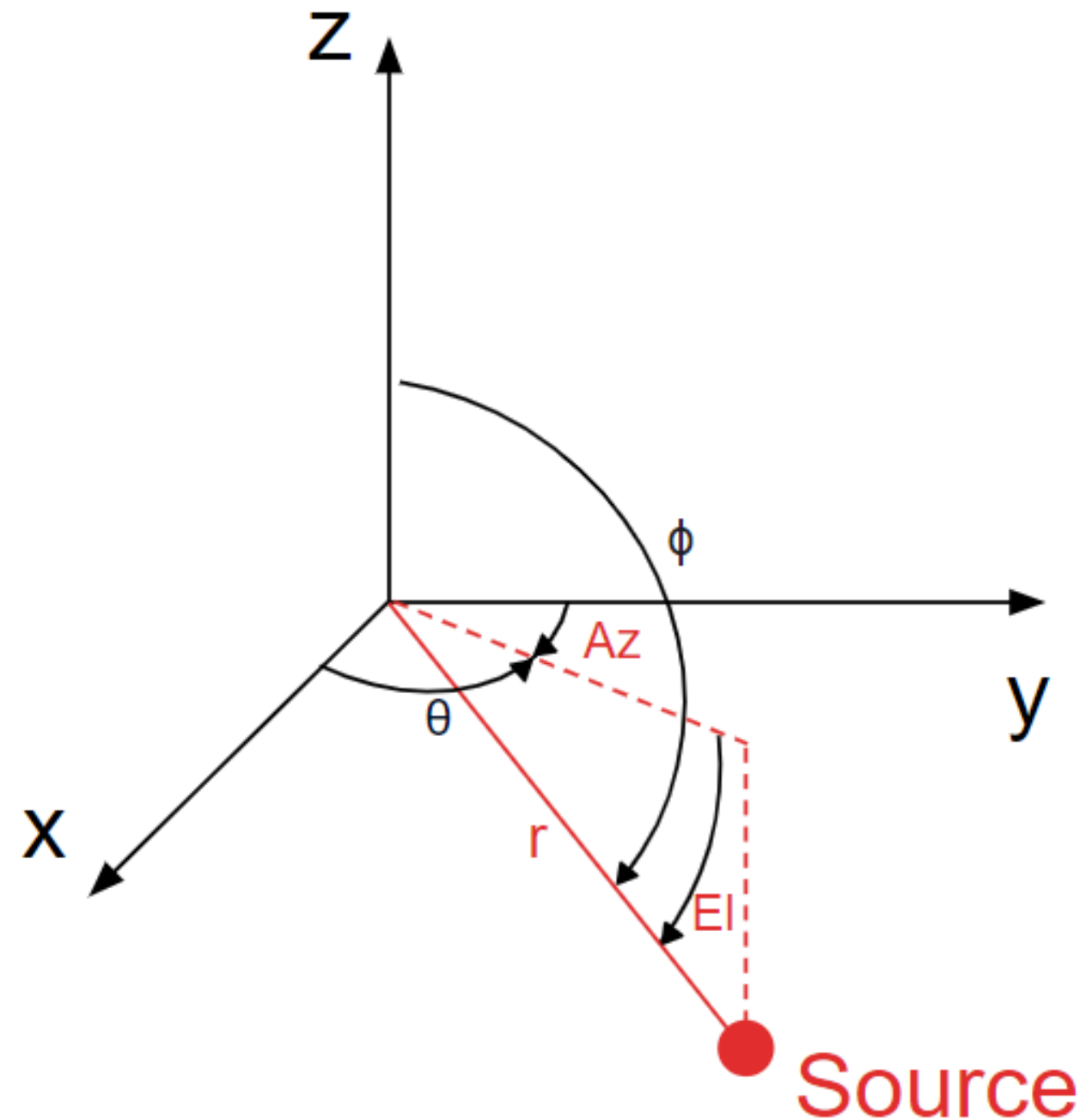
$$R = \frac{v}{\omega}$$

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

Figure 3.10 : Principe vitesse angulaire ω . Calcul de cette vitesse et estimation distance

Traitement et Analyse

Estimation de la distance et trajectoire 3D



$$\theta = \frac{5\pi}{2} - Azimut$$
$$\phi = Elevation + \frac{\pi}{2}$$

$$x = r \times \sin(\theta) \times \cos(\phi)$$
$$y = r \times \sin(\theta) \times \sin(\phi)$$
$$z = r \times \cos(\theta)$$

Figure 3.11 : Conversion coordonnées sphériques en cartésien. Et conversion Az et El en theta et phi

Traitement et Analyse

Estimation de la distance et trajectoire 3D

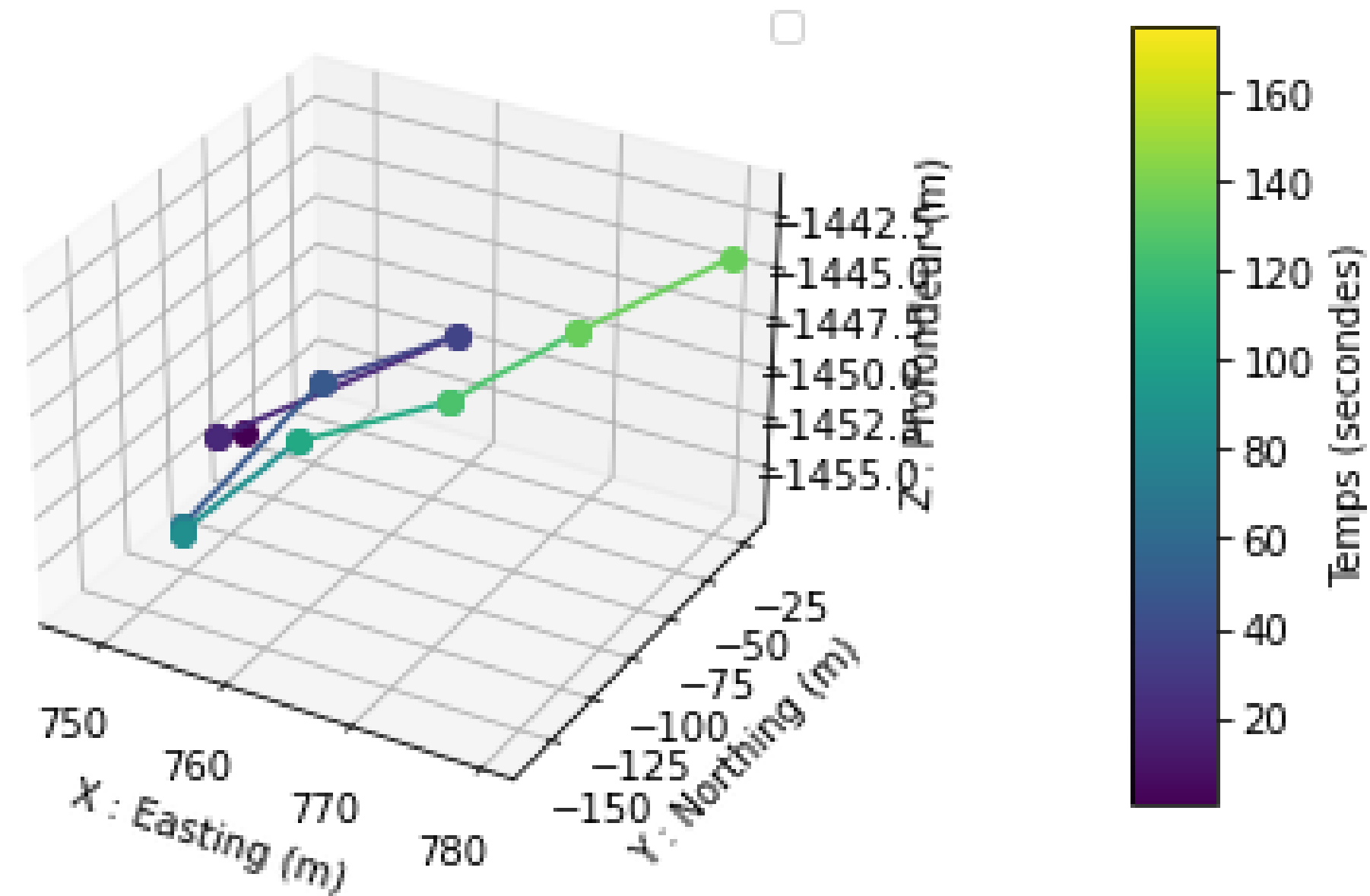


Figure 3.11 : Trajectoire 3D du cachalot en fonction du temps ($dt=175\text{sec}$). Projection sur une sphère de rayon 1641m, comme le rayon est assez grand, l'impact de cette courbure est négligeable sur notre tracé.

Traitement et Analyse

Observabilité et estimation de la distance par Machine Learning

$$f(x_1, x_2, \dots, x_n) = r'$$

$$(r' - r^*)^2$$

Figure 3.12 : Principe machine learning illustré par une fonction f , r' 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.

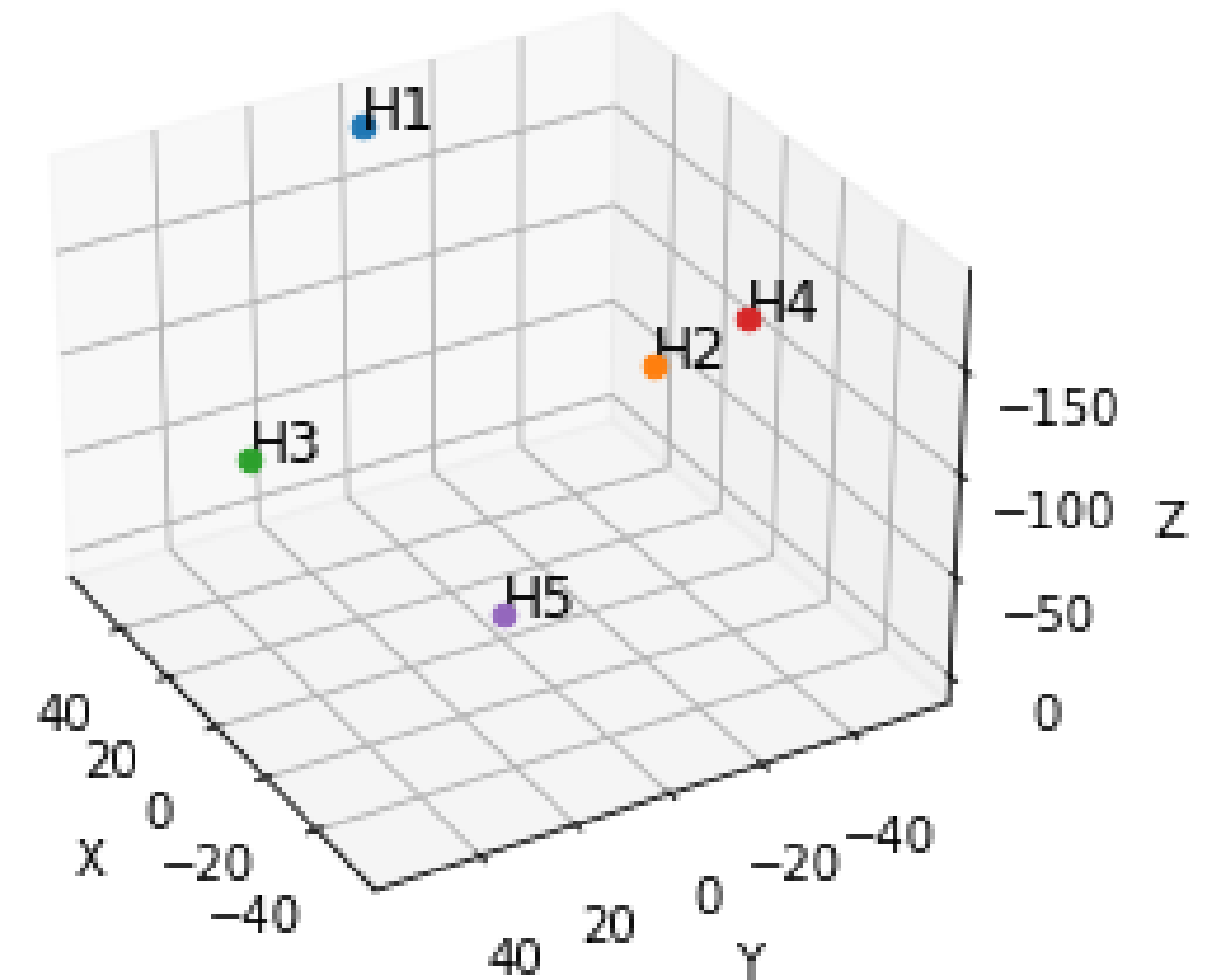


Figure 3.13 : Positions des capteurs dans l'espace, identiques à ceux de Bagheera

Traitement et Analyse

Observabilité et estimation de la distance par Machine Learning

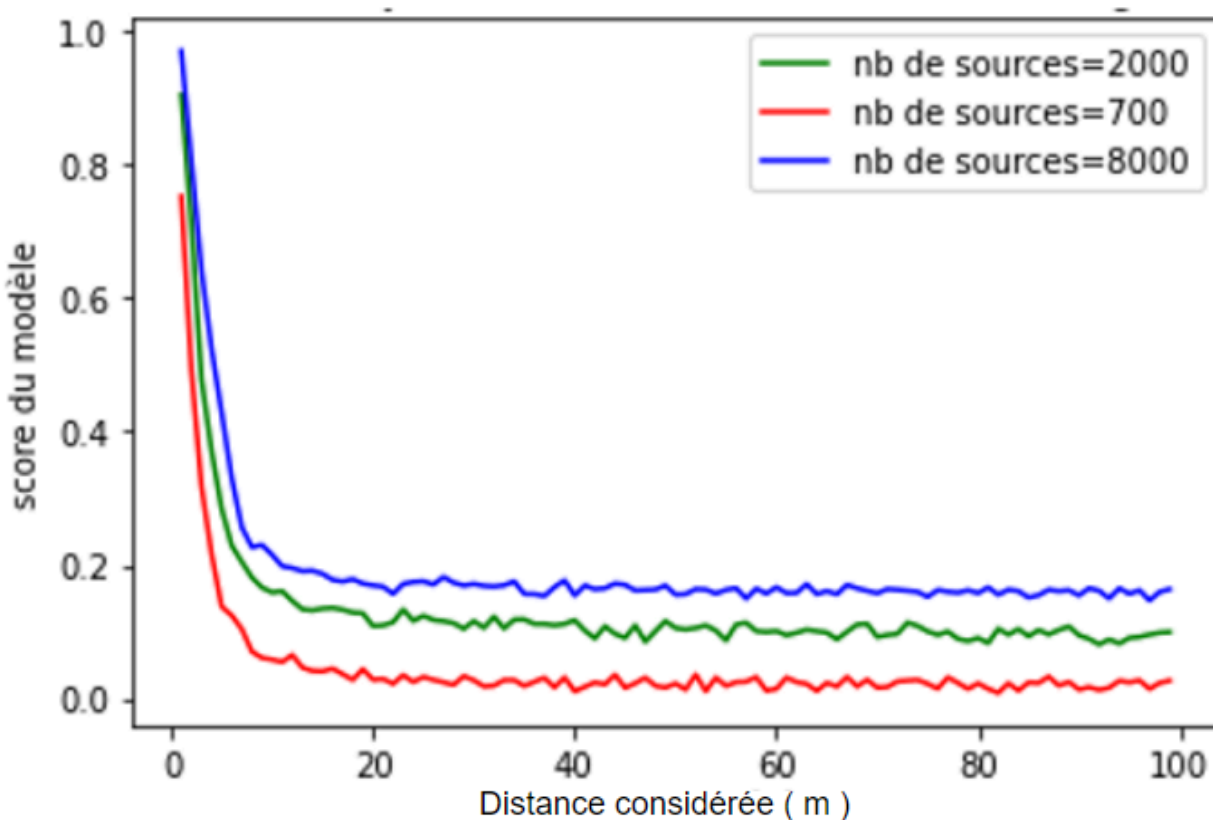


Figure 3.14 : Variation du score (R2) moyen en fonction de la distance considéré et du nombre de sources sonores (**Maurin PIRE**)

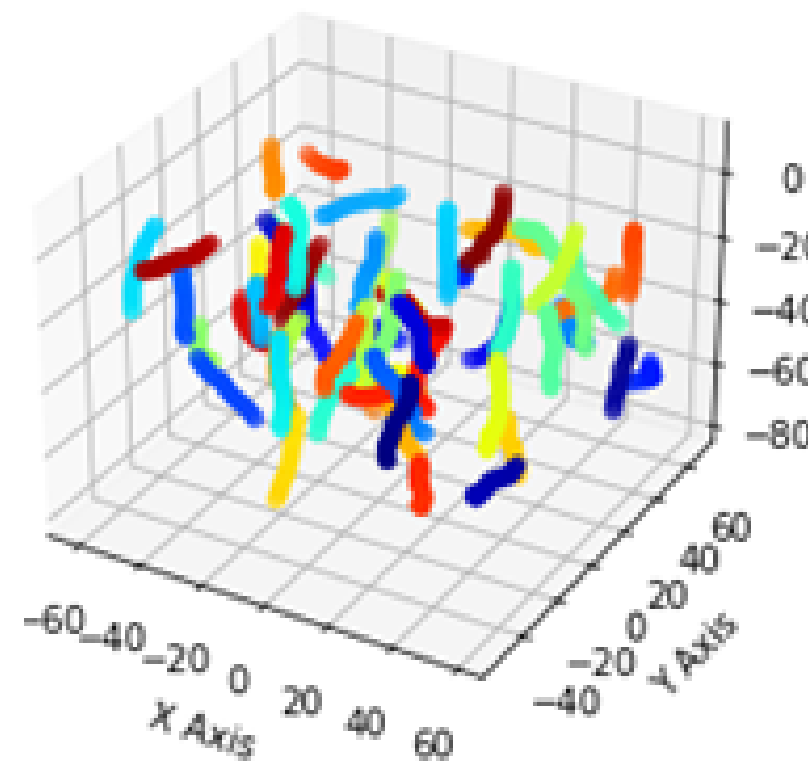


Figure 3.15 : Sources effectuant des jambes (**Maurin PIRE**)

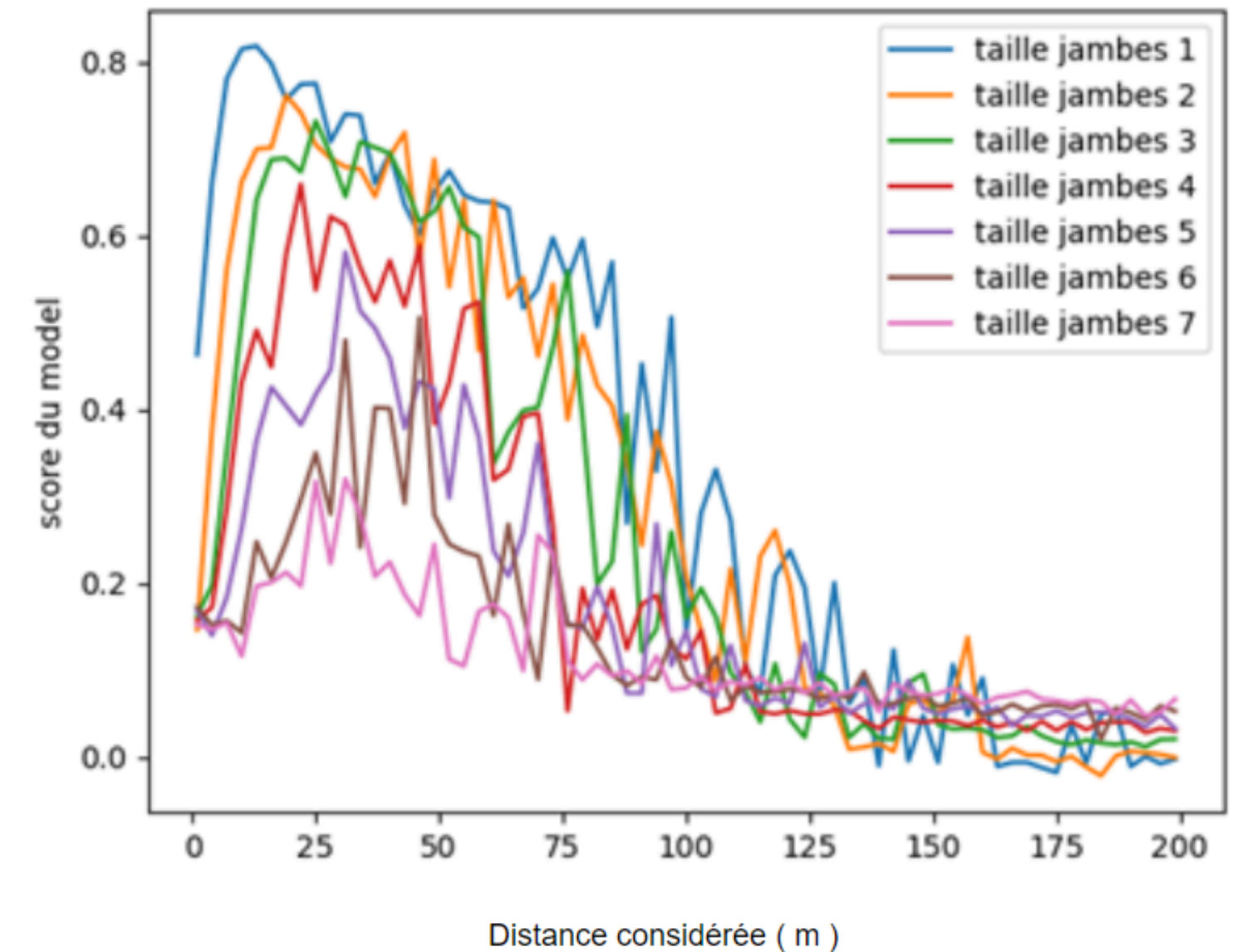


Figure 3.16 : Variation du score (R2) moyen pour 4500 sources sonores et 2 jambes en fonction de la distance considéré et de la taille des jambes (**Maurin PIRE**)

Traitement et Analyse

Observabilité et estimation de la distance par Machine Learning

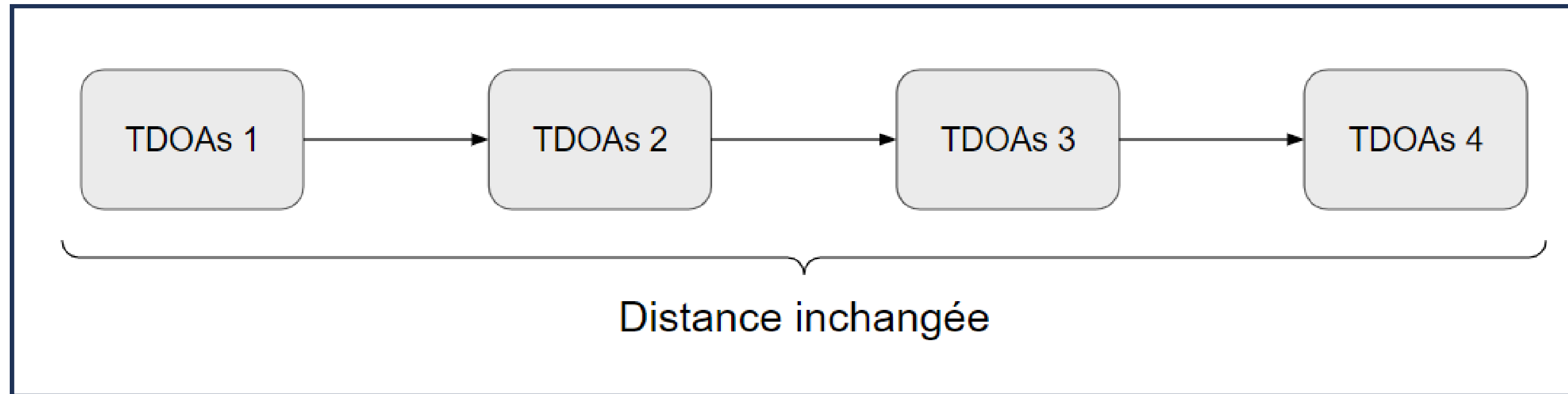


Figure 3.17 : Exemple, si une source effectue 3 jambes alors nous obtenons 4 TDoAs différents pour une distance moyenne inchangée.

Entraînement : Région de l'espace où se trouve potentiellement l'animal, 10 000 sources sonores effectuant 5 jambes de 1 sec. Résultat moyenné sur 15 tirages.

Résultat :

$$R \approx 4500m$$

Conclusion et Perspectives

Intelligence Artificielle avec Missions Sphyrna Odyssey



Conclusion: Résultats et méthodes satisfaisantes pour l'enregistrement que j'ai traité. Mais obsolète pour traiter des heures de données.

Perspectives : Suivi acoustique passif par le biais de l'intelligence artificielle. Exemple : Mission Sphyrna Odyssey



Figure 4.1 : Un Sphyrna, SOM 2020

Conclusion et Perspectives

Intelligence Artificielle avec Missions Sphyrna Odyssey

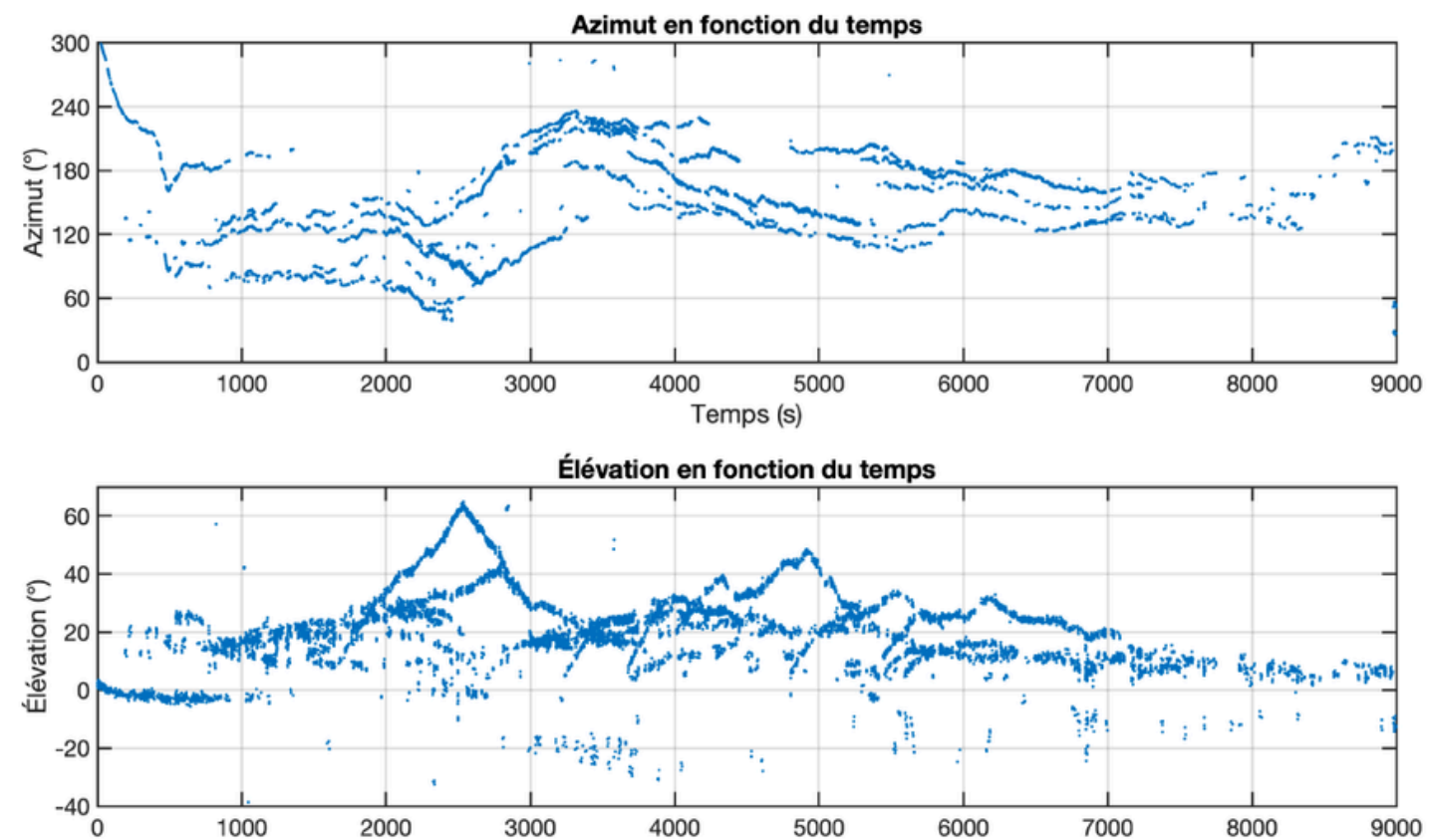


Figure 4.2 : Azimut et Élévation, toutes pistes confondues, en fonction du temps pour deux heures d'enregistrement **SOM 2020**.

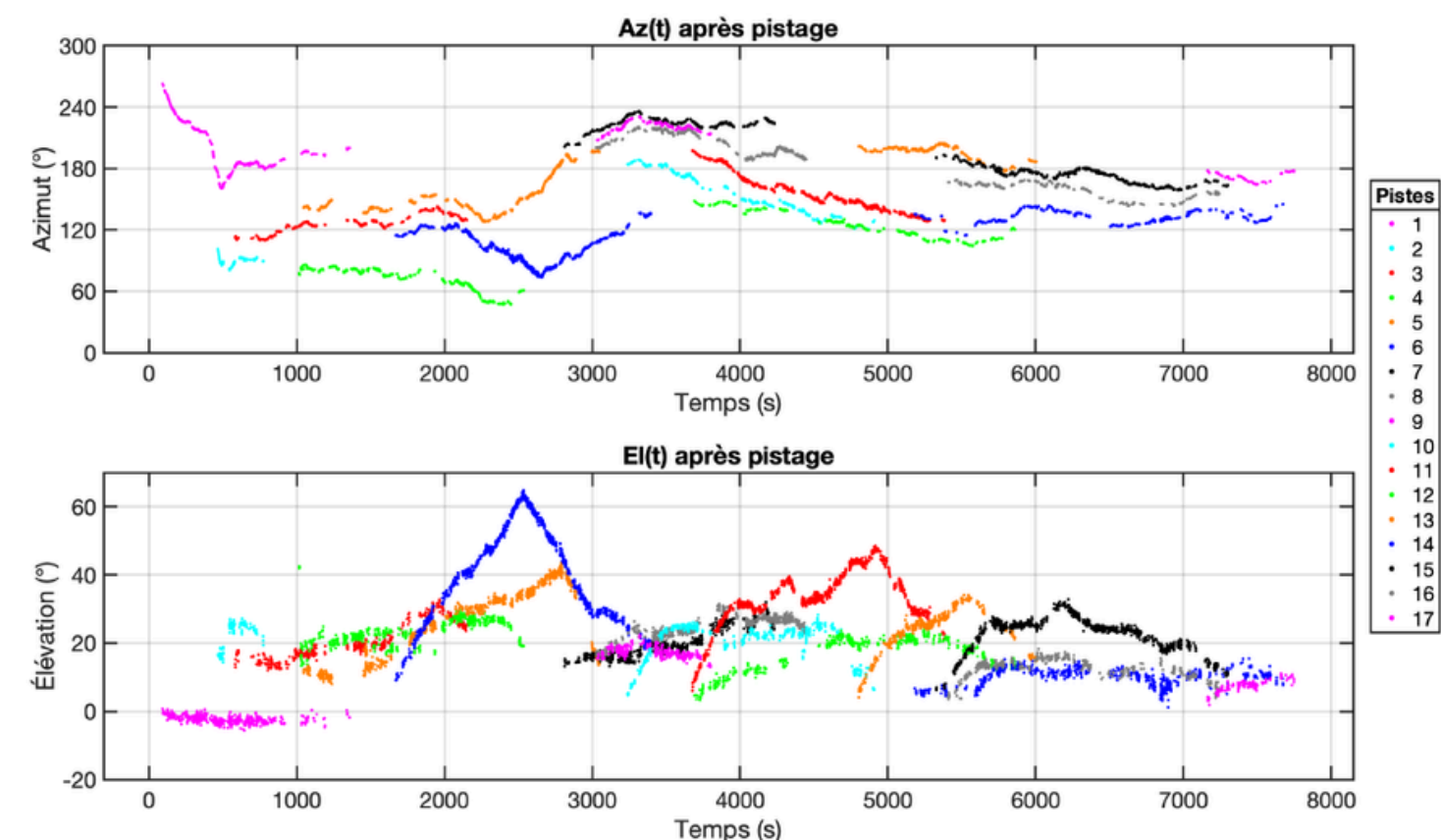


Figure 4.3 : Azimut et Élévation en fonction du temps avec clics classifiés par individus, **SOM 2020**.

Conclusion et Perspectives

Intelligence Artificielle avec Missions Sphyrna Odyssey

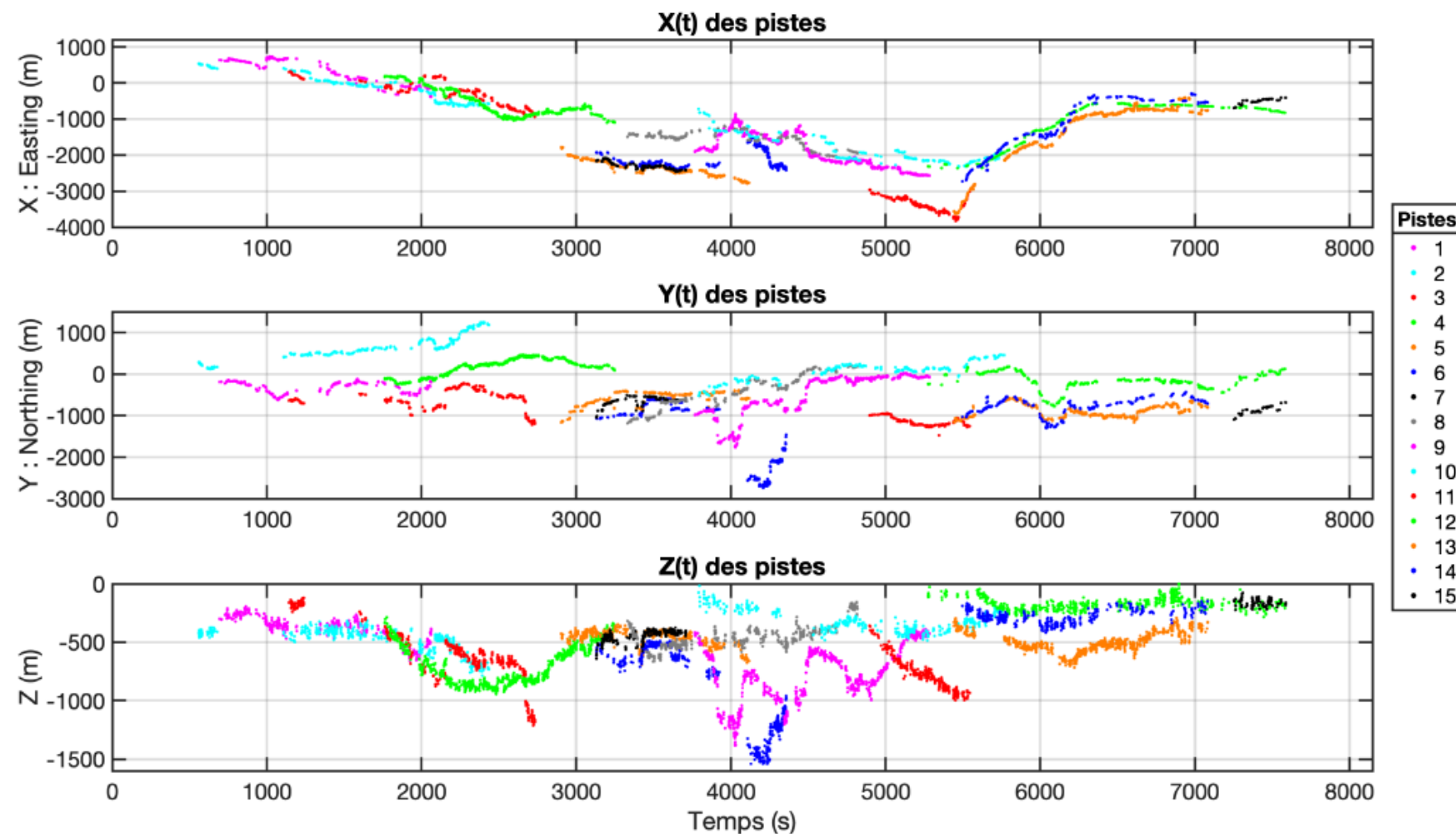


Figure 4.4 : Coordonnées cartésiennes corrigées des pistes en fonction du temps dans le repère absolu, **SOM 2020**.

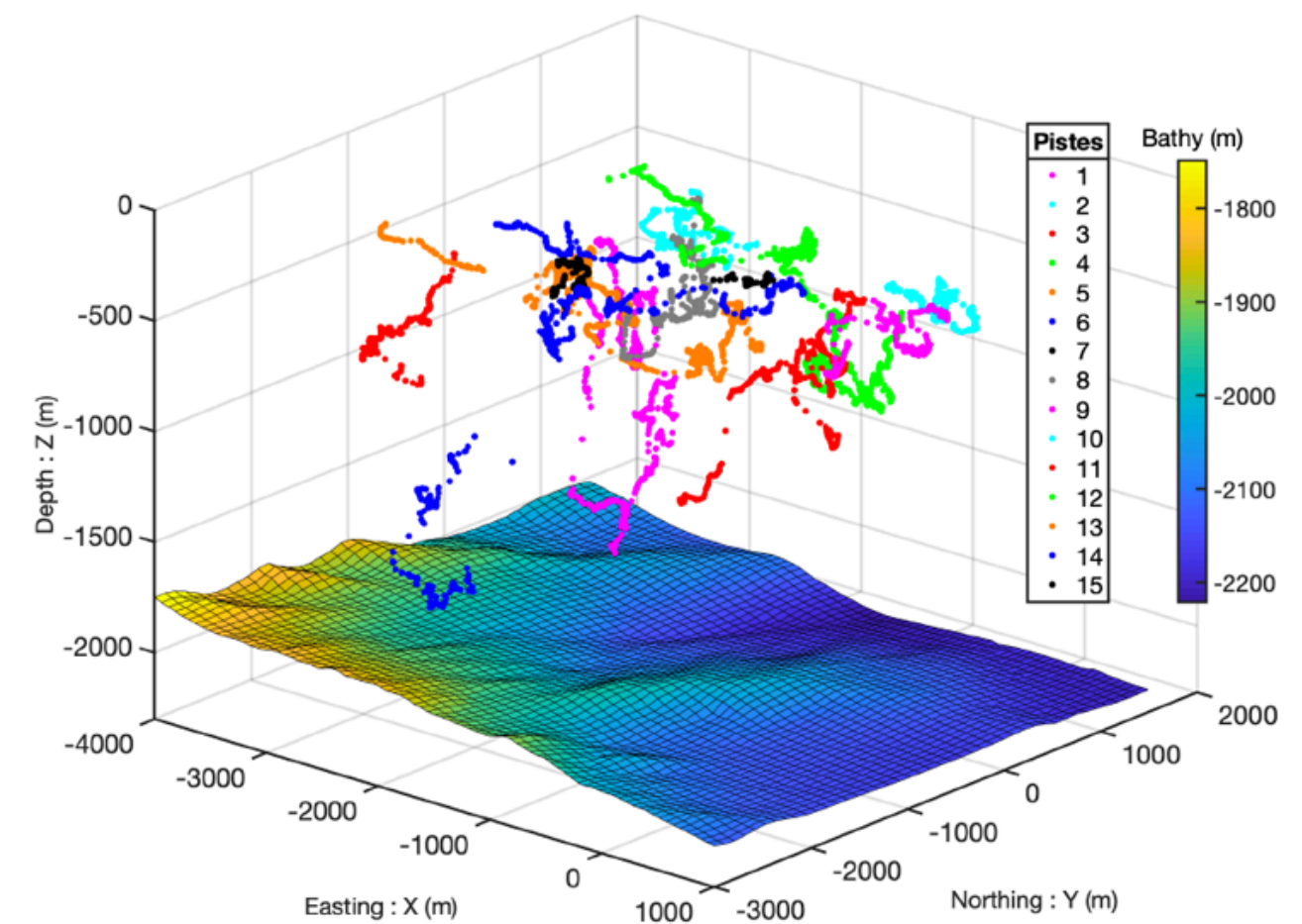


Figure 4.5 : Représentation 3D des 15 pistes, qui ne représente en réalité que 6 cachalots. **SOM 2020**

Perspective : Pouvoir piloter et contrôler les drones à distance en fonction, permettant ainsi un suivi passif sur plusieurs dizaines de kilomètres.



Merci de votre attention



Bibliographie

- **WhaleWay** : https://www.longitude181.org/pdf/cachalots/Rapport_missions_WhaleWay1_2_3-Longitude181_LIS_CIAN.pdf
- **3D diarization of a sperm whale click cocktail party by an ultra high samplingrate 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>
- **Mission Sphyrna Odissey (SOM)** : "Découvertes Ethoacoustiques de Chasses Collaboratives de Cachalots en Abysses & Impacts en Mer du Confinement COVID19". Hervé Glotin , Nicolas Thellier , Paul Best , Marion Poupard , Maxence Ferrari , Sara Viera , Valentin Giés, Marina Oger , Pascale Giraudet, Maxence Mercier , Garance Donzé , Marina Campana , Jessica Chevallier , Franck Malige , Julie Patris , Jean Marc Prévot, Philippe Cosentino , Nathalie Prévot Alvisé , Yann Ourmières , Valentin Barchasz , Alice Lehir , Sebastian Marzetti , François Sarano , Jérôme Benveniste, Sandrine Gaillard, Fabien de Varenne. Rapport Scientifique I, 2019 2020
http://sabiody.lislab.fr/pub/SPHYRNA/Sphyrna_Odissey_Report_v1_1.pdf
- **Machine Learning** : Maurin PIRE, Master Sciences de l'Océan de l'Atmosphère et du Climat (SOAC)
- **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
- **International Center of Artificial Intelligence in Natural Acoustics (CIAN)**, <https://cian.lis-lab.fr/>

Annexe

Annexe 1 : code estimation azimuth/élévation et code affichage az/el en fonction du temps.

```
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()
```

Annexe

Annexe 2 : code passage de coordonnées sphériques en cartésiennes et affichage 3D de l'objet.

```
# 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')

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

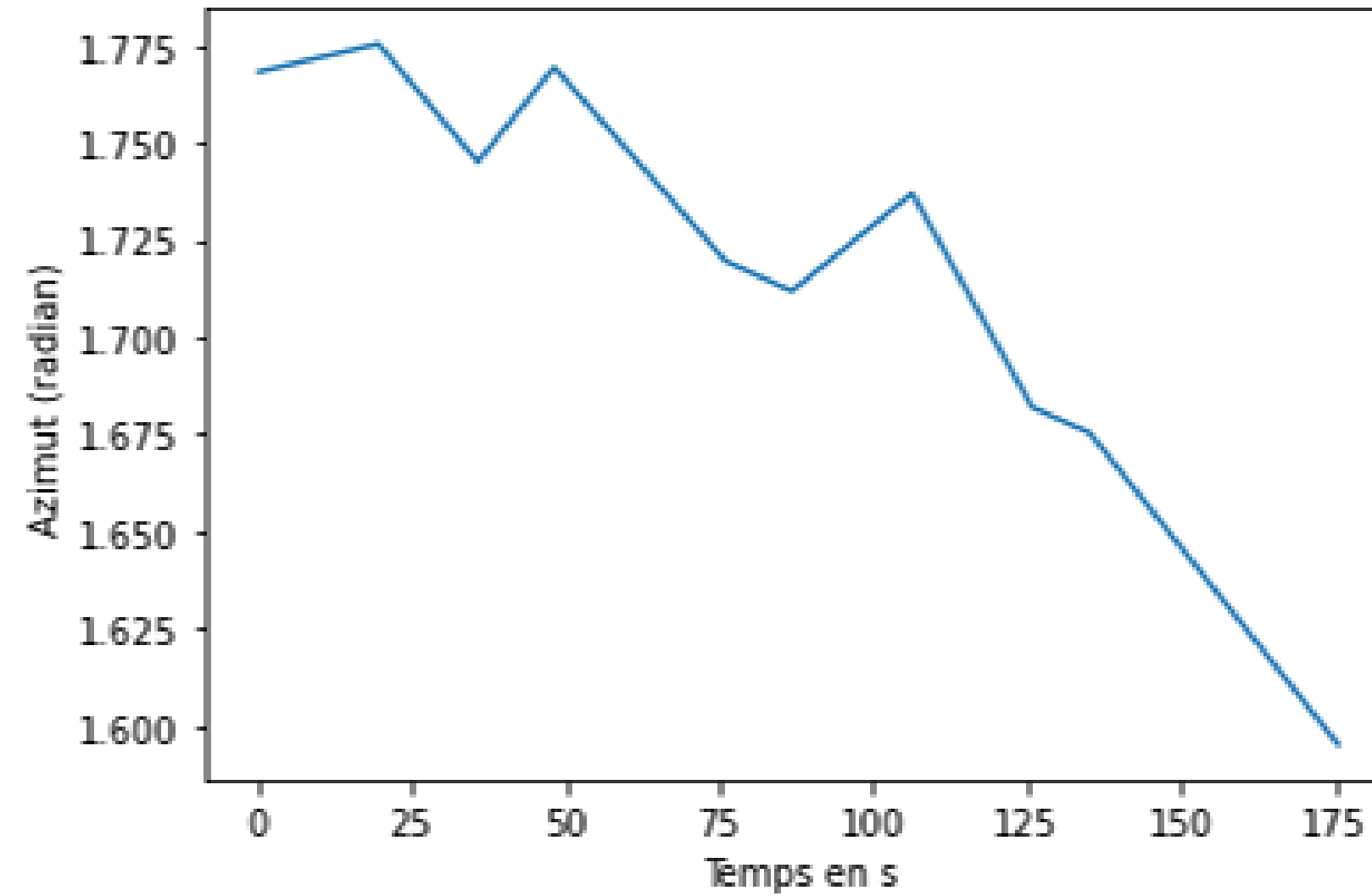
# Ajout de la barre de couleur
sm = plt.cm.ScalarMappable(cmap=cm.viridis, norm=norm)
sm.set_array([])

# 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()
```

Annexe

Annexe 3 : Azimut en fonction du temps en degrés radian.



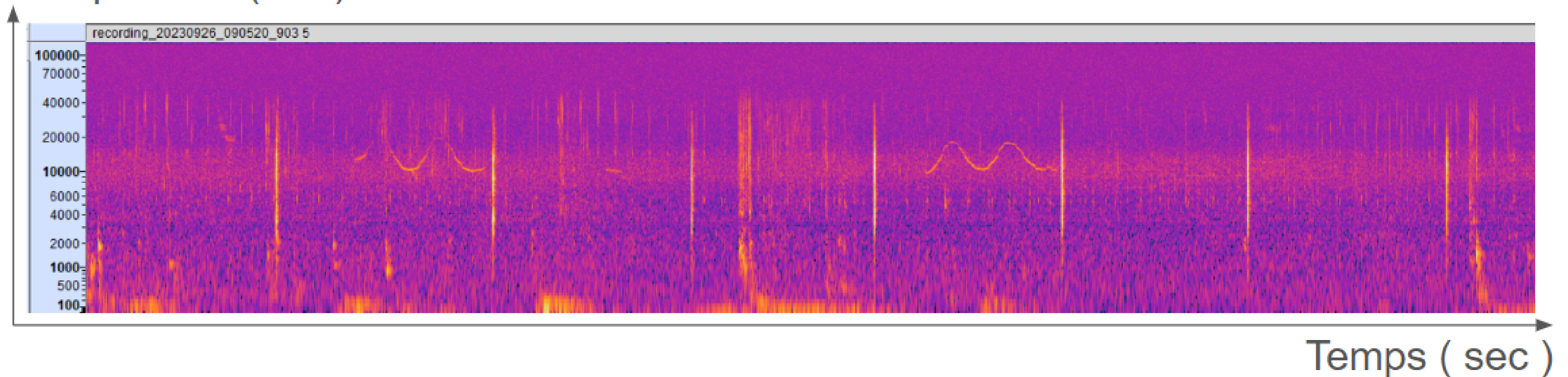
Annexe

Annexe 4: Tableau récapitulatif des valeurs numériques mesurées et calculées.

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

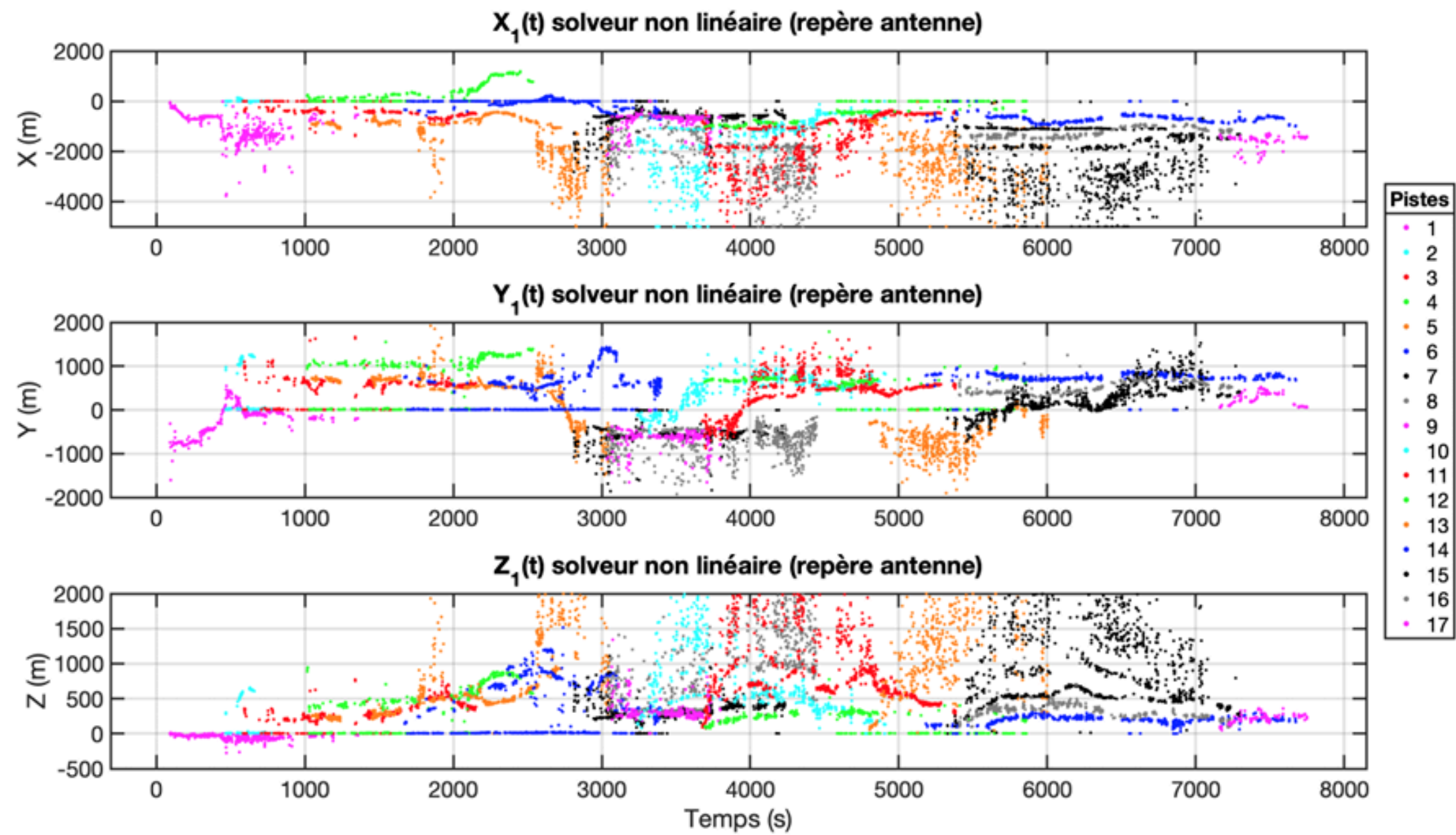
Annexe

Fréquences (Hz)



Annexe 5 : Spectrogramme de l'enregistrement effectué par Bagheera le 26/09/2023 9h05. Clics de cachalot et vocalises de dauphin. Durée de la sélection : 7.5 sec.

Annexe



Annexe 6 : Coordonnées 3D des piste non corrigé et dans le repère de l'antenne en fonction du temps. **SOM 2020**