

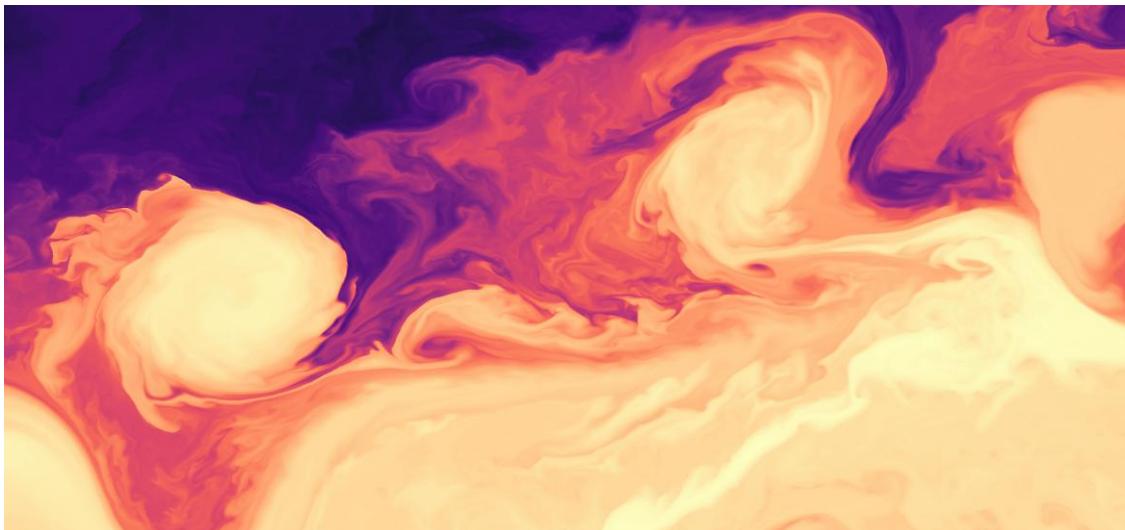


ENSTA
Bretagne



UV 6.1 – PROJET DE FIN D’ÉTUDES

Mesure de la Circulation Océanique fine échelle par GéolocalisatioN ACoustique de flotteurs dérivants autonomes (COGNAC) : ébauche d'un budget d'erreur sur la géolocalisation



Marie PONCHART

CI 2018 - Option Hydrographie & Océanographie - Master Géophysique Marine

Tuteurs : Aurélien PONTE (LOPS - Ifremer), Delphine MATHIAS (SOMME), Xavier LURTON (NSE - Ifremer) & Yann STÉPHAN (SHOM)

Tuteur école : Michel LEGRIS (ENSTA Bretagne)

Août 2018

Image de la page de garde : Célérité du son à la surface de l'océan issue d'une simulation numérique dans une zone proche du courant du Gulf Stream, zone dans laquelle les flotteurs du projet COGNAC seront déployés. Les célérités sont réparties entre 1450 m/s (en violet) et 1530 m/s (en jaune).

Résumé

Les mécanismes complexes de l'océan à fine échelle (moins de 100 km) restent, aujourd'hui encore, peu connus. Or, c'est à cette échelle que des échanges importants ont lieu entre l'océan profond et les couches superficielles. Le projet COGNAC (mesure de la Circulation Océanique fine échelle par GéolocalisatioN ACoustique de flotteurs dérivants autonomes) a ainsi pour objectif de développer une stratégie expérimentale *in situ* de mesure de la dynamique océanique fine échelle grâce au positionnement, par acoustique, d'une nuée de flotteurs dérivants autonomes. La précision de localisation recherchée pour ces flotteurs est de l'ordre de la dizaine de mètres.

Ce document, synthèse du travail de recherche de mon stage de fin d'études, a pour objectif de présenter une ébauche du budget d'erreur sur la localisation des flotteurs. Pour cela, un algorithme de géolocalisation a été élaboré, permettant de prendre en compte différentes sources d'erreurs liées à l'instrumentation et la propagation acoustique dans l'environnement sous-marin. Cet algorithme permet d'obtenir un budget d'erreur pour différentes configurations de déploiement : l'impact du nombre et de la nature des sources acoustiques (dérivantes ou tractées) a été étudié.

Dans un premier temps, les différentes sources d'erreurs liées à l'instrumentation ont été identifiées et les incertitudes associées ont été estimées. Mise à part la dérive d'horloge des flotteurs, ces erreurs instrumentales ne s'avèrent pas limitantes. L'optimisation du système se porte alors sur la compréhension physique des phénomènes de propagation et sur leur impact sur la localisation des flotteurs. Des calculs de propagation acoustique nous permettent de modéliser les caractéristiques des signaux et de constater que la propagation du signal sur des distances importantes (environ 100 km) constitue une source d'erreur prédominante. L'amplitude de l'incertitude varie notamment selon la résolution de notre connaissance du champ de célérité. Ainsi, il s'agit de déterminer si l'estimation est pratiquement possible d'obtenir une résolution du champ de célérité suffisante pour répondre à nos attentes. Dans le cas contraire, on se heurterait aux limitations des performances de la localisation par acoustique, incompatibles avec les attentes du projet en terme d'échelle spatiale et/ou de précision de positionnement.

Abstract

Fine scale complex mechanisms (less than 100 km) of the ocean are still little known today. However, important exchanges take place at this scale between deep ocean and surface layers. Thus, COGNAC project (measurement of fine scale Oceanic Circulation by ACoustic GeolocalizatioN of autonomous drifting floats) aims to develop an experimental *in situ* strategy for measuring fine scale ocean dynamics thanks to the acoustic positioning of a swarm of autonomous drifting floats. The accuracy of location required for floats is about ten meters.

This document, synthesis of my internship research work, aims to present a draft of the error budget on floats location. For this purpose, a geolocation algorithm has been developed taking into account different sources of errors related to instrumentation and acoustic propagation in the underwater environment. This algorithm makes it possible to obtain an error budget for different deployment configurations : the impact of the number and nature of acoustic sources (drifting or towed) has been examined.

As a first step, sources of errors due to instrumentation have been identified and the associated uncertainties estimated. Apart from clock drift, these instrumental errors are not limiting. System optimization is then focused on the physical understanding of propagation phenomena and their impact on float localization. Acoustic propagation calculations allow us to model signal characteristics and to notice that signal propagation over large distances (about 100 km) is a predominant source of error. The magnitude of the uncertainty varies according to the resolution of our knowledge of the velocity field. Thus, is it possible to obtain a sufficient resolution of the velocity field to meet our expectations ? Otherwise, performance limitations of the acoustic localization would be encountered and incompatible with the project's expectations in terms of spatial scale and/or location precision.

Remerciements

Tout d'abord, je tiens à remercier Aurélien PONTE pour m'avoir fait confiance et m'avoir permis de travailler au LOPS sur le projet Cognac. Merci pour le temps qu'il m'a accordé, pour son aide précieuse et ses conseils avisés qui m'ont permis de réaliser ce stage dans les meilleures conditions possibles.

Un grand merci à Delphine MATHIAS, Xavier LURTON et Yann STEPHAN pour avoir suivi de près mon avancement durant ce stage et pour m'avoir guidée à travers leur regard d'experts en acoustique sous-marine.

Merci à Michel LEGRIS pour son suivi en tant que tuteur école.

Je tiens également à remercier Eric MENUT pour ses conseils concernant le choix des horloges du flotteur. Merci aussi à Jonathan GULA pour m'avoir fourni ses sorties de simulations numériques de circulation océanique. Merci à Sylvie LE GENTIL pour sa grande disponibilité concernant le support informatique. Je remercie également l'IFREMER pour m'avoir autorisé l'accès au supercalculateur Datarmor.

Enfin, je tiens à remercier toutes les personnes ayant contribué à l'élaboration et la relecture de ce rapport.

Table des matières

1 Présentation du projet COGNAC	7
1.1 Description et objectifs	7
1.2 Cahier des charges et choix technologiques existants	8
1.2.1 Les sources	8
1.2.2 Les flotteurs	8
2 Principe de géolocalisation	9
2.1 État de l'art	9
2.2 La localisation acoustique "base longue"	10
2.3 Sources d'erreurs	11
2.4 Formulation théorique de la méthode de géolocalisation	12
3 Estimation des erreurs dans le cas idéal du milieu isocélère	14
3.1 Les erreurs instrumentales	14
3.1.1 Estimation de la dérive d'horloge	14
3.1.2 Position du transducteur	15
3.1.3 Précision sur le profil de célérité	18
3.2 Performances	18
3.2.1 Portée maximale de détection	18
3.2.2 Précision de mesure du temps d'arrivée	20
3.3 Localisation	20
3.3.1 Résultats avec 3 sources	21
3.3.2 Impact du nombre de sources	23
4 Impact de la bathycélémétrie	24
4.1 Le modèle de propagation Bellhop	24
4.2 Zones d'étude	25
4.3 Analyse des tracés de rayons	26
4.4 Structures des séquences de trajets multiples	29
4.5 Concept de célérité équivalente	30
4.5.1 La méthode	31
4.5.2 Les résultats	31
4.6 Impact de la connaissance imparfaite du champ de célérité	32
4.7 Localisation	36
4.7.1 Erreur constante sur le temps de propagation	36
4.7.2 Erreur variable selon la distance source-récepteur	38
4.7.3 Utilisation d'une source mobile	39
5 Synthèse générale et perspectives	42

A Impact environnemental	44
B Bruit ambiant : Modèle de Wenz	46
C Paramètres des modélisations Bellhop	47
C.1 Paramétrage de la source et des récepteurs	47
C.2 Interfaces air et fond	47
C.3 Hypothèses de calculs	47
C.4 Eviter les instabilités numériques	48
D Cartes des zones d'études en Atlantique	49
E Analyses des séquences reçues pour l'ensemble des profils étudiés	51
E.1 Profil n°1 : thermocline à 60 m	51
E.2 Profil n°2 : profil d'hiver	52
E.3 Profil n°3 : thermocline à 20 m	52
E.4 Profil n°4 : profil de fin d'été	53
F Choix de la méthode de détection pour les différents profils	54

Table des figures

1.1	Schéma de déploiement du projet Cognac	7
1.2	Flotteur en développement - Essais dans le bassin Ifremer	8
2.1	Principe de localisation acoustique "base longue"	10
2.2	Schémas des différentes variables	12
3.1	Position du transducteur par rapport à la bouée	16
3.2	Bilans de forces sur la bouée et sur le transducteur	16
3.3	Impact de la longueur de câble sur la position du transducteur	17
3.4	Impact du cisaillement du courant et de la masse sur la position	17
3.5	Portée maximale de détection suivant la fréquence utilisée	19
3.6	Exemple de déploiement source - récepteur selon une dimension	21
3.7	RMS et biais sur la position du flotteur sans dérive d'horloge	22
3.8	RMS et biais sur la position du flotteur avec une dérive de 26 ms	22
3.9	RMS et biais sur la position du flotteur avec une dérive de 0.6 s	22
3.10	Schéma explicatif de la compensation ou non de la dérive d'horloge	23
3.11	Impact du nombre de sources sur la RMS de la position du flotteur	23
4.1	Tracé de rayons - Profil n°1 de Méditerranée (cf. figure 4.4) - Source à 100 m de profondeur // Rouge : direct, Bleu : réfléchi surface, Noir : réfléchi fond.	25
4.2	Pertes par propagation - Profil n°1 de Méditerranée (cf. figure 4.4) - Source à 100 m de profondeur	25
4.3	Réponse impulsionale pour un récepteur donné (étoile verte sur la figure 4.1 : 200 m de profondeur et 60 km de la source)	25
4.4	Profils de célérité de Méditerranée	26
4.5	Carte situant les deux zones d'étude : en rouge au niveau du courant du Gulf Stream ; en orange en Atlantique Nord	26
4.6	Tracé de rayons pour une source à 10 m - Profil n°3 Méditerranée	27
4.7	Tracé de rayons pour une source à 30 m	27
4.8	Tracé de rayons pour une source à 100 m	27
4.9	Profil de célérité et tracé de rayons pour un point au Sud du Gulf Stream	28
4.10	Profil de célérité et tracé de rayons pour un point au Nord du Gulf Stream	28
4.11	Les deux méthodes de détection considérées	29
4.12	Réponses impulsionales pour différentes positions du flotteur - source à 100 m	30
4.13	Calcul de la célérité équivalente	31
4.14	Erreur sur la distance source-récepteur - profil n°1 Méditerranée	32
4.15	Tracé de rayons et erreur sur la distance source-récepteur - Profil n°4 Méditerranée	32
4.16	Exemple de table de temps d'arrivée correspondant à un champ de célérité au Sud du Gulf Stream	33
4.17	Champ de célérité réel versus résolution de 50 km (en rouge)	34

4.18	Erreur sur la distance due à une mauvaise connaissance de la célérité	34
4.19	Erreur sur la distance sur les 150 premiers mètres de profondeur	34
4.20	Comparaison des tracés de rayons entre référence et résolution de 50 km	34
4.21	Erreur sur la distance en fonction de la densité de profils mesurés - Gulf Stream	35
4.22	Erreur sur la distance en fonction de la densité de profils mesurés - Atlantique Est	35
4.23	Erreur e_{tp} variable en fonction de la distance source-récepteur	38
4.24	Erreur finale sur la distance source récepteur avec une erreur e_{tp} variable	38
4.25	Schéma explicatif des ambiguïtés de positionnement autour des sources	38
4.26	Schéma des deux positions et vitesses estimées du flotteur pour une source mobile	40
4.27	Histogrammes des positions du flotteur estimées par l'algorithme de géolocalisation	41
B.1	Spectres de bruit ambiant [5]	46
C.1	Tracés de rayons avec deux pas de calcul différents	48
C.2	Impact des instabilités numériques sur le temps d'arrivée du signal	48
D.1	Zone d'étude au niveau du Gulf Stream	49
D.2	Zone d'étude d'Atlantique Nord	50
E.1	Tracés de rayons et pertes par propagation pour le profil n°1 - source à 20 m . .	51
E.2	Tracés de rayons et pertes par propagation pour le profil n°1 - source à 70 m . .	52
E.3	Tracés de rayons et pertes par propagation pour le profil n°2 - source à 50 m . .	52
E.4	Tracés de rayons et pertes par propagation pour le profil n°4 - source à 20 m . .	53
E.5	Tracés de rayons et pertes par propagation pour le profil n°4 - source à 60 m . .	53
F.1	Profils de Méditerranée	54
F.2	Profils - Zone du Gulf Stream	54
F.3	Réponses impulsionales - Profil n°1 Méditerranée	55
F.4	Réponses impulsionales - Profil n°2 Méditerranée	56
F.5	Réponses impulsionales - Profil n°3 Méditerranée	57
F.6	Réponses impulsionales - Profil n°4 Méditerranée	58
F.7	Réponses impulsionales - Profil n°1 Gulf Stream	59
F.8	Réponses impulsionales - Profil n°2 Gulf Stream	60

Liste des tableaux

3.1	Modèles d'horloges et leurs caractéristiques	15
3.2	Valeurs numériques choisies pour le calcul de dx	17
3.3	Paramètres de l'équation du sonar variables selon la fréquence	19
4.1	Erreurs moyennes et maximales - Gulf Stream	35
4.2	Erreurs moyennes et maximales - Atlantique Est	36
4.3	Erreurs sur la localisation du flotteur en configurations réalistes	37
4.4	Nombre de sources nécessaire suivant l'erreur acceptée	37
A.1	Seuils d'émissions induisant des pertes temporaires d'audition et des réponses comportementales chez les mammifères marins. D'après [3]. Seuils issus de [26] et [17].	45

Introduction

Il reste encore beaucoup à découvrir sur les mécanismes complexes liés à l'océan, notamment à fine échelle, pour des phénomènes inférieurs à la centaine de kilomètres. C'est à ces échelles que des échanges importants se produisent entre l'océan profond (>100 m) et les couches superficielles. Ces échanges conditionnent le développement de la vie dans les couches superficielles, en contrôlant notamment les apports en nutriments et les exports de carbones organiques. Ces processus contrôlent également le stockage de chaleur et de sel dans l'océan profond et influent donc sur les fluctuations de l'océan aux échelles climatiques. Mieux observer, modéliser et comprendre les processus océaniques de fine échelle est aujourd'hui, pour toutes ces raisons, une question scientifique de premier plan [8, 19].

Le LOPS (Laboratoire d'Océanographie Physique et Spatiale) s'intéresse justement à cette question. Il s'agit d'une Unité Mixte de Recherche (UMR) développant des programmes de recherche dans le but de comprendre les mouvements de l'océan, ainsi que ses interactions avec l'atmosphère ou encore les impacts côtiers [13]. Ce laboratoire regroupe l'Université de Bretagne Occidentale (UBO), l'Ifremer, le CNRS et l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD).

Le projet COGNAC (mesure de la Circulation Océanique fine échelle par GéolocalisatioN ACoustique de flotteurs dérivants autonomes) du LOPS, a ainsi pour objectif de développer une stratégie expérimentale *in situ* innovante de mesure de la dynamique océanique fine échelle. L'idée est de suivre une nuée de flotteurs dérivants autonomes pouvant être régulés, dans la verticale, en pression (suivre des isobares) ou en température (suivre des isothermes). Leur positionnement précis et régulier, par acoustique, permettrait de retracer leur parcours et d'en déduire la dynamique océanique de la zone d'étude.

Il s'agit, durant ce stage de 5 mois, de valider, d'un point de vue acoustique, le concept expérimental du projet COGNAC. Pour cela, nous décrirons dans un premier temps le cahier des charges à respecter et les objectifs à atteindre. Nous établirons ensuite une méthode de géolocalisation adaptée à nos besoins et, enfin, nous répertorierons et quantifierons les différentes sources d'erreurs de localisation des flotteurs afin d'établir une ébauche de budget d'erreur.

Chapitre 1

Présentation du projet COGNAC

1.1 Description et objectifs

Afin de retracer le parcours des flotteurs pour en déduire la dynamique de la zone étudiée, il faut être capable de les localiser régulièrement. Pour cela, nous disposons de sources acoustiques dérivantes en surface emettant des signaux à destination des flotteurs situés en profondeur (figure 1.1). La zone d'étude est d'environ 100 km^2 .

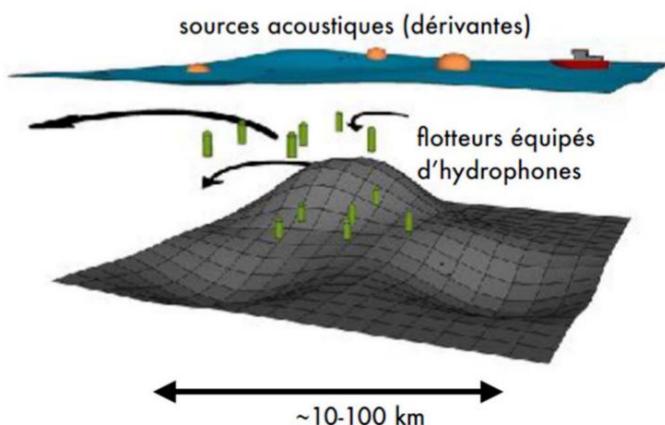


FIGURE 1.1 – Schéma de déploiement du projet Cognac

La propagation des ondes acoustiques est dépendante de la célérité dans le milieu. Or, les zones d'intérêt pour ce projet sont des zones potentiellement énergétiques dans lesquelles les champs de célérité varient fortement. Cela va engendrer des erreurs sur la localisation des flotteurs dont il sera nécessaire de déterminer l'amplitude.

L'objectif principal du stage est d'évaluer les sources d'erreurs agissant sur la géolocalisation des flotteurs pour différentes configurations de déploiement. Les erreurs instrumentales, ainsi que les erreurs liées aux variations de célérité seront évaluées. Pour cela, nous utiliserons des simulations numériques de l'écoulement océanique déjà existantes afin de s'appuyer sur des profils de célérité réalistes. De plus, des calculs de propagation acoustique seront effectués afin de modéliser les caractéristiques des signaux transmis entre sources et flotteurs et de déterminer l'impact des champs de célérité sur cette propagation et donc, finalement, sur l'erreur de localisation.

1.2 Cahier des charges et choix technologiques existants

1.2.1 Les sources

Concernant les sources acoustiques, une étude préalable de l’Ifremer [11] a mené au premier dimensionnement suivant :

- Le niveau d’émission est de 185 dB (ref 1 μPa à 1 m), et la fréquence d’émission est de 3 kHz afin d’avoir une portée correspondant à nos besoins (cf. partie 3.2.1).
- La durée d’émission du signal est de 1 à 2 s toutes les minutes.
- La bande passante est fixée à 200 Hz.
- Le transducteur doit pouvoir être immergé de 5 à 100 m de profondeur.
- La source doit être autonome 30 jours.

Dans un soucis de protection de la faune marine, une brève étude sur l’impact environnemental du bruit généré par les sources, lors du projet Cognac, est proposée en annexe A. Elle montre qu’il n’y aura pas d’impact significatif sur les populations présentes dans les zones d’étude.

1.2.2 Les flotteurs

Afin de pouvoir produire un grand nombre de flotteurs, des exigences sur leur coût ont été fixées : maximum 3000 € par flotteur. Cela constraint donc la qualité et la précision des équipements présents sur le flotteur comme les capteurs (pression, température,...), l’hydrophone ou encore l’horloge. De plus, le flotteur doit pouvoir plonger jusqu’à 500 m et être autonome durant 30 jours. Ainsi, deux autres projets de fin d’études ont été effectués, respectivement sur le développement mécanique du flotteur [29] et sur la partie électronique [1].

Finalement, le flotteur doit pouvoir être localisé à 10m près. Ainsi, nos principales interrogations pour la suite sont les suivantes : Les exigences sur la précision de la localisation pourront-elles être respectées ? Et si oui, dans quelles conditions expérimentales et pour quelles configurations de déploiement (notamment le nombre de sources requises) ?



FIGURE 1.2 – Flotteur en développement - Essais dans le bassin Ifremer

Chapitre 2

Principe de géolocalisation

Dans ce chapitre, un bref état de l'art des différentes méthodes de localisation sous-marine est présenté. Le principe de localisation acoustique en mode "base longue", utilisé pour le projet Cognac, est ensuite décrit. Plusieurs sources d'erreurs, principalement liées à la propagation acoustique dans l'environnement marin, seront prises en compte afin d'implémenter une méthode de géolocalisation robuste.

2.1 État de l'art

Il existe actuellement de nombreuses techniques de localisation sous-marine des réseaux de capteurs mobiles (*Underwater Wireless Sensor Networks*). Ces méthodes peuvent être différencierées selon plusieurs critères [27] :

- **Références fixes ou mobiles** : pour la grande majorité des méthodes, des références, dont la position géographique est connue, doivent obligatoirement être déployées. Il peut alors s'agir de références fixes (ancrées sur le fond ou en surface), ou de références mobiles comme des AUV (*Autonomous Underwater Vehicles*) capables de se déplacer autour des objets à localiser (*AUV-aided localization* [6]). Néanmoins, une méthode récente [18], basée sur des sources d'opportunité (comme le claquement des pinces des crevettes-pistolet) ne nécessite pas le déploiement de ces noeuds de référence. Dans le cas du projet Cognac, les références sont les sources en surface dont la position géographique est connue.
- **Localisation en une ou plusieurs phases** : dans le cas d'une localisation en une seule phase, seuls les noeuds de référence sont utilisés pour localiser les noeuds ordinaires (objets dont la position est recherchée). Dans une localisation à plusieurs phases, les noeuds ordinaires, une fois localisés, deviennent à leur tour des noeuds de référence permettant de localiser d'autres noeuds ordinaires (*GPS-less localization protocol* [20]). La localisation à plusieurs phases nécessite une communication à double-sens entre les différents noeuds. Or, dans notre cas, pour une question énergétique et budgétaire, les flotteurs ne sont pas équipés d'émetteurs acoustiques. Ainsi, les flotteurs ne communiquent pas entre eux et la localisation se fait en une unique phase.
- **Localisation *range-based* ou *range-free*** : la localisation peut être *range-based*, basée sur un calcul de distance entre les différents noeuds (*Underwater positionning system UPS* [4]), ou bien *range-free*, basée sur d'autres schémas comme par exemple la localisation approximative au sein d'une surface (*Area Localization Scheme ALS* [2]), ou encore

l'émission directionnelle grâce à un AUV (méthode *UDB* [14]). Les méthodes *range-free* donnent généralement des résultats de localisation moins précis que les méthodes *range-based*. Ainsi, la localisation reste bien souvent basée sur des mesures de distance, réalisées selon 3 techniques [27] :

- Received Signal Strength Indicator (RSSI) : la distance entre la source et le récepteur est déterminée à partir de l'amplitude du signal reçu, en se basant sur des modèles de propagation. Du fait de la variabilité des pertes par propagation et de la présence éventuelle de trajets multiples, cette méthode est peu précise et donc peu utilisée.
- Time of Arrival (ToA) : il s'agit ici de mesurer le temps de parcours du signal entre la source et le récepteur. La conversion en une distance se fait simplement en utilisant la célérité du son dans le milieu. Une synchronisation des horloges du réseau est nécessaire afin de réduire l'incertitude sur le temps de parcours.
- Time Difference of Arrival (TDoA) : il s'agit ici de mesurer les différences de temps d'arrivée des signaux venant des noeuds de référence. La synchronisation des horloges n'est pas nécessaire.

2.2 La localisation acoustique "base longue"

Pour le projet Cognac, la localisation acoustique des flotteurs est réalisée en mode "base longue" [27], comme schématisé sur la figure 2.1. Les repères (ou noeuds de référence) sont des sources acoustiques proches de la surface, localisées géographiquement par GPS (*Global Positioning System*). Elles sont équipées de transducteurs acoustiques permettant l'émission de signaux destinés aux flotteurs, qui eux enregistrent les données et les retransmettent uniquement lors de leur retour en surface.

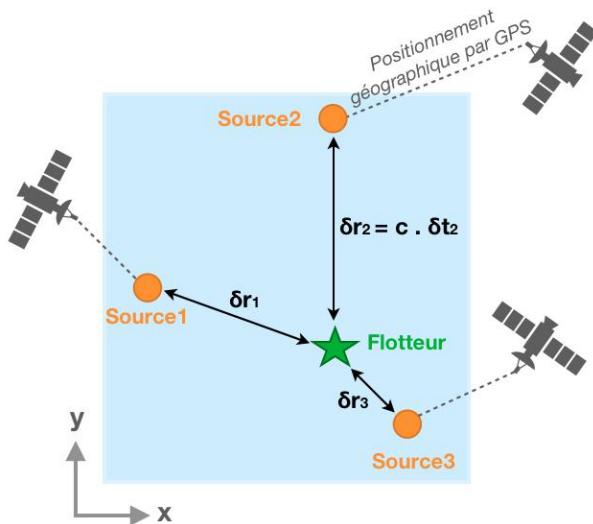


FIGURE 2.1 – Principe de localisation acoustique "base longue"

La détermination de la position relative d'un flotteur par rapport aux sources est basée sur des estimations de distances, elles-mêmes issues de mesures de temps de propagation (ToA). En effet, l'instant de réception du signal est enregistré par le flotteur, ce qui permet, connaissant

l'instant d'émission de la source, d'en déduire le temps de trajet, δt , du signal. De ce temps de trajet, on peut alors calculer la distance, δr , séparant la source et le flotteur. Finalement, grâce à 3 sources minimum, nous obtenons un positionnement relatif du flotteur. De cette position relative, il est finalement possible de déduire la position géographique absolue de l'objet à localiser.

Le principe global de localisation utilisé pour le projet Cognac est similaire à celui du système RAFOS. En effet, les flotteurs RAFOS (acronyme inversé de *SOund Fixing And Ranging*), développés par Thomas Rossby en 1984 à partir du système SOFAR déjà existant, sont des flotteurs dérivants immersés à une profondeur fixe [24]. Les flotteurs enregistrent les temps d'arrivées (ToA) de signaux émis par des sources acoustiques fixes mouillées, puis leur trajectoire est reconstituée a posteriori par triangulation. Quelques différences majeures entre le système RAFOS et le projet Cognac sont tout de même à prendre en compte :

- Les flotteurs RAFOS sont capables de détecter des signaux émis à plusieurs centaines de kilomètres car ils sont généralement placés à des profondeurs correspondant au canal SOFAR. Ce chenal sonore océanique naturel, est situé autour de la profondeur à laquelle la célérité du son est minimum. Il agit alors comme un guide d'onde et permet une propagation des ondes sur plusieurs centaines, voire milliers de kilomètres [7]. Pour le projet Cognac, nous cherchons à obtenir une portée de seulement 100 km. Cependant, les flotteurs et les sources ont des profondeurs limitées et ne sont donc pas toujours idéalement placés dans le canal SOFAR. Ainsi, la détection des signaux et la connaissance de leur trajectoire ne sont pas garanties.
- La précision de localisation recherchée pour le projet Cognac est égale 10m, tandis que les précisions atteintes avec le système RAFOS sont plutôt de l'ordre du kilomètre [12].

2.3 Sources d'erreurs

Contrairement aux hypothèses généralement émises dans les méthodes de géolocalisation présentées dans la partie 2.1, la précision de localisation demandée pour le projet Cognac (10 m) nous pousse à considérer plusieurs sources d'erreurs qui devront impérativement être prises en compte dans l'algorithme de géolocalisation :

- L'horloge du flotteur ne peut être recalée que lorsque le flotteur est en surface (par synchronisation GPS). Autrement, le phénomène de dérive doit être pris en compte et induit une erreur non négligeable sur le calcul du temps de trajet du signal.
- Le transducteur de la source est situé entre 5 et 100m de profondeur et est relié par un câble à la bouée de surface. Du fait de cisaillements verticaux du profil de courant et/ou d'effets de fardages, la position horizontale du transducteur par rapport à la source reste incertaine.
- Afin d'établir la conversion entre le temps de trajet de l'onde et la distance parcourue, nous devons connaître la célérité du son dans l'eau. Considérée comme constante dans la plupart des méthodes classiques de localisation, celle-ci est en réalité variable dans le temps et dans l'espace. Il est en pratique difficile de connaître précisément le champ de célérité et cela implique donc une erreur sur le calcul de la distance entre source et flotteur.

2.4 Formulation théorique de la méthode de géolocalisation

Afin d'établir un budget d'erreur de localisation des flotteurs prenant compte les différentes sources d'erreurs énoncées précédemment (partie 2.3), un algorithme de géolocalisation a dû être mis en place. Nous avons choisi de procéder à la géolocalisation par minimisation d'une fonction de coût, dans le cadre d'une modélisation idéalisée du problème physique. Nous cherchons alors à déterminer la position horizontale du flotteur (\underline{x}), ainsi que la dérive de son horloge (δt), en s'appuyant sur un certain nombre de **paramètres connus** :

- \underline{x}_s^i : la position de la bouée de surface de la source i .
- t_e^i : le temps d'émission du signal par la source i .
- \tilde{t}_r^i : le temps de réception, par le flotteur, du signal émis par la source i .
- ϵ_i : la détection du signal, $\epsilon_i = 1$ (détected) ou 0 (pas de détection).

Les **variables inconnues**, quant à elles, sont :

- $\underline{x} = (x, y)$: la position du flotteur.
- δt : l'offset de l'horloge du flotteur. $\delta t = \tilde{t}_r^i - t_r^i$, avec \tilde{t}_r^i le temps de réception du flotteur et t_r^i le temps absolu de réception.
- $\delta\underline{x}^i$: vecteur différence entre la position de la bouée de la source (connue) et la position du transducteur. $\delta\underline{x}^i = \underline{x}_t^i - \underline{x}_s^i$.
- $\delta t_p(\underline{x}, \underline{x}_t^i)$: la différence entre le temps de propagation réel ($t_r^i - t_e^i$) de \underline{x}_t^i à \underline{x} , et le temps estimé a priori $t_p(\underline{x}, \underline{x}_t^i)$. Pour plus de simplicité, nous faisons l'hypothèse que le temps de propagation estimé dépend uniquement de la distance source-récepteur : $t_p(\underline{x}, \underline{x}_t^i) = t_p(||\underline{x} - \underline{x}_t^i||)$. Par exemple, t_p peut être déduit d'une célérité estimée c_b . Dans ce cas, on obtient $t_p(\underline{x}, \underline{x}_t^i) = ||\underline{x} - \underline{x}_t^i||/c_b$.

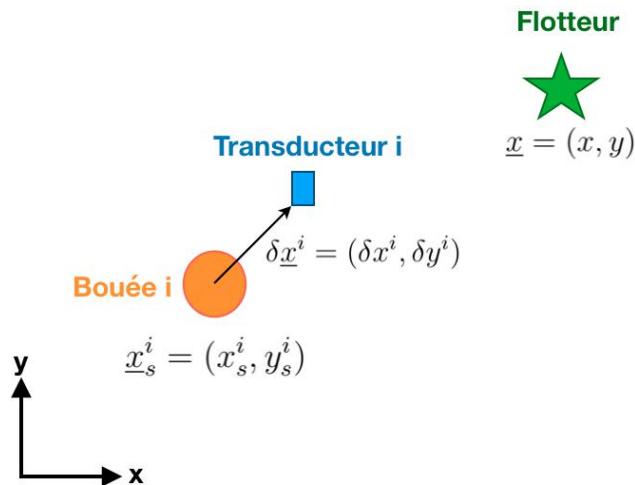


FIGURE 2.2 – Schémas des différentes variables

Des **estimations a priori** de \underline{x} , δt , $\delta\underline{x}^i$ et $\delta t_p(\underline{x}, \underline{x}_t^i)$ peuvent éventuellement être renseignées. Nous les fixons toutes à zéro. Ainsi, la position a priori du flotteur est $\underline{x}_b = (x = 0km, y = 0km)$.

De plus, des **erreurs** sont associées à chacune des variables inconnues. Elles sont notés e_x , $e_{\delta t}$, $e_{\delta x}$ et e_{tp} :

- e_x est l'erreur associée à l'estimation a priori de la position du flotteur (x_b). Nous décidons d'avoir une connaissance approximative de cette position a priori et avons fixé l'écart-type $e_x = 10$ km.
- $e_{\delta x}$ est l'erreur de position horizontale entre la bouée de surface d'une source et son transducteur.
- Les deux dernières erreurs, $e_{\delta t}$ et e_{tp} , sont respectivement liés à la dérive d'horloge et au temps de parcours du signal.

Finalement, l'estimation de la position du flotteur minimise la fonction suivante :

$$\begin{aligned} J(\underline{x}, \delta t) &= \frac{\|x - x_b\|^2}{e_x^2} + \frac{\delta t^2}{e_{\delta t}^2} + \sum_i \epsilon_i \times \frac{\delta t_p(\underline{x}, \underline{x}_t^i)^2}{e_{tp}^2} \\ &= \frac{\|x - x_b\|^2}{e_x^2} + \frac{\delta t^2}{e_{\delta t}^2} + \sum_i \epsilon_i \times \frac{[\tilde{t}_r^i - \delta t - t_e^i - t_p(\underline{x}, \underline{x}_t^i)]^2}{e_{tp}^2} \end{aligned}$$

La quantification des différentes erreurs énoncées ci-dessus constituera l'un des axes majeurs de réflexion dans les chapitres suivants. Cette méthode de localisation permettra ensuite d'obtenir l'erreur finale de positionnement du flotteur pour différentes conditions de déploiement.

Chapitre 3

Estimation des erreurs dans le cas idéal du milieu isocélère

Dans un premier temps, nous travaillons dans un milieu idéalisé : la célérité du son y est constante (milieu isocélère). Nous cherchons à quantifier les erreurs instrumentales, à déterminer les performances du système et à en déduire la précision de géolocalisation des flotteurs.

3.1 Les erreurs instrumentales

3.1.1 Estimation de la dérive d'horloge

Du fait que le flotteur soit situé entre 100 et 500 mètres de profondeur, son horloge dérive alors que celle de la source est recalée en utilisant le PPS (*Pulse Per Second*) fourni par son GPS. Il y a donc un décalage entre les deux horloges, entraînant une erreur sur le calcul du temps de propagation des signaux.

La durée d'une campagne sera d'environ 30 jours. Or, nous souhaitons une précision de 10 m sur la géolocalisation des flotteurs. Cela revient alors à une erreur en temps entre la source et le flotteur de 6.7 ms maximum au bout de 30 jours. Pour respecter le cahier des charges, nous aurions besoin d'une horloge d'une précision d'environ 2 ppb (partie par milliard). Cette précision est, en pratique, inatteignable dans le cadre des contraintes budgétaires et énergétiques fixées dans le cahier des charges. Il est cependant possible de faire remonter les flotteurs à la surface tous les 10 jours afin que leurs horloges puissent se recaler sur le PPS du GPS. Dans ce cas, la précision optimale requise serait d'environ 7 ppb.

Afin de choisir au mieux l'horloge du flotteur, les différentes catégories d'oscillateurs à quartz sont présentées ci-dessous [9] :

- **TCXO** (*Temperature Compensated Crystal Oscillator*) : sa précision est aux alentours de 0.5 ppm, pour une consommation de 50 mW et un prix inférieur à 10 €. Actuellement, les prototypes de flotteurs sont équipés d'un oscillateur TCXO d'une dérive de 0.7 ppm, beaucoup trop importante pour notre application.
- **OCXO** (*Oven Control Crystal Oscillator*) : l'oscillateur est encapsulé dans un four à température contrôlée, ce qui permet de réduire la dérive (20 ppb). Cependant, un OCXO consomme en général entre 2 et 4 W ce qui est incompatible avec un système embarqué.

- **MCXO** (*Microcomputer-Compensated Crystal Oscillator*) : ces oscillateurs sont d'une très grande stabilité car leur fonctionnement est régulé par un microcontrôleur utilisant des algorithmes de compensation. La précision atteinte est de l'ordre de la dizaine de ppb comme pour les OCXO. La consommation est cependant beaucoup plus faible, environ 100 mW.

Nous avons finalement trouvé plusieurs modèles susceptibles de correspondre à nos attentes :

Modèle	Type	Précision	Consommation (pour 3.3 V)	Prix	Recalage automatique sur le PPS du GPS
MX503 Microsemi [16]	MCXO	30 ppb	40 mW	env. 200 €	Non
IQCM 140 IQD [10]	GPS Disciplined OCXO	10 ppb	800 mW	env. 300 €	Oui
QT 2020 QTECH [23]	Radiation Tolerant MCXO	5 à 30 ppb	90 mW	>300 €	Oui

TABLE 3.1 – Modèles d'horloges et leurs caractéristiques

L'horloge idéale d'un point de vue performances serait la QT2020 ; cependant, bien que ne connaissant pas exactement son prix, nous savons qu'il sera supérieur à 300 €, ce qui représente plus de 10 % du budget accordé pour la réalisation d'un flotteur dans son ensemble. Finalement, afin de respecter au mieux le cahier des charges, il faudra trouver le meilleur compromis entre prix et précision de l'horloge. Le choix n'étant pas encore fait, les résultats de géolocalisation montrés par la suite seront basés sur deux configurations distinctes :

- avec l'horloge actuelle, bas de gamme, ayant une dérive de 0.7 ppm. L'erreur au bout de 10 jours serait alors : $e_{\delta t} = 0.6$ s.
- avec une horloge haut de gamme (plus chère) d'une dérive de 30 ppb. L'erreur au bout de 10 jours serait alors : $e_{\delta t} = 26$ ms.

3.1.2 Position du transducteur

Le transducteur permettant l'émission du signal sonore est situé entre 5 et 100m de profondeur et est relié à la bouée de surface de la source par un câble. Ainsi, suivant les courants et les vents présents, il existe une incertitude sur la position horizontale du transducteur par rapport à celle de la bouée.

On cherche à déterminer, à l'aide d'un modèle simple, l'écart dx entre la position horizontale de la bouée et celle du transducteur. Pour cela, on considère un câble rigide (formant une droite

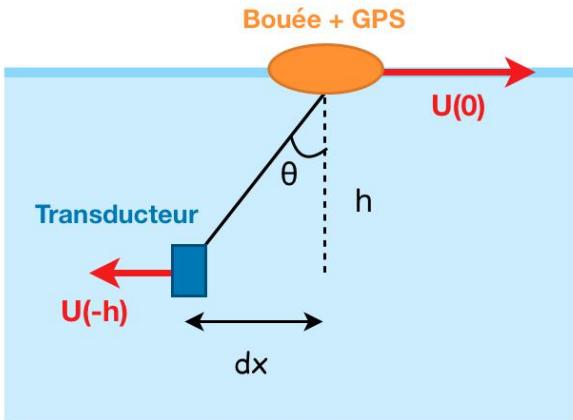


FIGURE 3.1 – Position du transducteur par rapport à la bouée

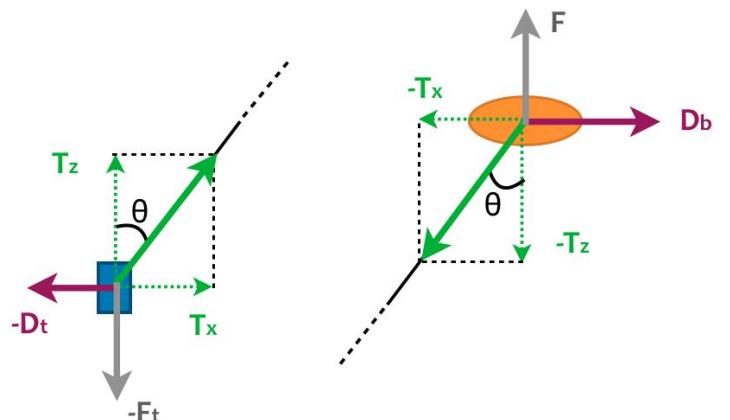


FIGURE 3.2 – Bilans de forces sur la bouée et sur le transducteur

entre la bouée et le transducteur) et de petite section. La traînée due au câble est donc supposée négligeable. D'après les figures 3.1 et 3.2, on peut écrire :

$$dx = h \cdot \tan(\theta) \quad \text{et} \quad \tan(\theta) = \frac{T_x}{T_z} = \frac{D_t}{F_t} \quad (3.1)$$

avec D_t la force de traînée liée au transducteur et F_t telle que :

$$F_t = (m - \rho_w V_t)g \quad (3.2)$$

avec m la masse du transducteur + son lest (kg), ρ_w la masse volumique de l'eau (kg/m^3), V_t le volume du transducteur (m^3) et g l'accélération de la pesanteur (m/s^2).

La force de trainée D_t , quant à elle s'écrit :

$$D_t = C_t \rho_w S_t |U(-h)| U(-h) \quad (3.3)$$

avec C_t le coefficient de traînée du transducteur, S_t la section du transducteur (m^2) et $U(-h)$ la vitesse relative du courant par rapport à l'ensemble du système, à la profondeur du transducteur (m/s).

Afin de calculer D_t , nous considérons le système à l'équilibre et nous obtenons donc la relation suivante :

$$D_t + D_b = 0 \quad \text{avec} \quad D_b = C_b \rho_w S_b |U(0)| U(0) \quad (3.4)$$

avec D_b la force de traînée liée à la bouée de surface, C_b le coefficient de traînée de la bouée, S_b la section de la bouée (m^2) et $U(0)$ la vitesse relative du courant par rapport à l'ensemble du système, au niveau de la bouée (m/s).

Des équations (3.3) et (3.4), nous déduisons :

$$r^2 |U(-h)| U(-h) + |U(0)| U(0) = 0 \quad \text{avec} \quad r^2 = \frac{C_t S_t}{C_b S_b} \quad (3.5)$$

Ainsi,

$$U(0) = -r U(-h)$$

Or,

$$U(0) = U_a(0) + U_r \quad \text{et} \quad U(-h) = U_a(-h) + U_r$$

avec $U_a(0)$ et $U_a(-h)$ les vitesses abolues du courant aux profondeurs 0 et -h et U_r la vitesse absolue du système {bouée + transducteur}.

D'où,

$$U(-h) = U_a(0) - h\partial_z U + U_r = U(0) - h\partial_z U = -\frac{h\partial_z U}{1+r}$$

Finalement, la combinaison des équations (3.1), (3.2) et (3.3) nous permet d'écrire l'équation (3.6) donnant l'écart dx entre la position de la bouée et du transducteur :

$$dx = h \cdot \frac{C_t \rho_w S_t h^2 |h\partial_z U| h\partial_z U}{(1+r)^2(m - \rho_w V_t)g} \quad (3.6)$$

Afin d'obtenir un ordre de grandeur de dx , les valeurs numériques suivantes ont été choisies :

g	$9.81 \text{ m}^2/\text{s}$
ρ_w	1000 kg/m^3
h	100 m
$\partial_z U$	$0.1/\text{h s}^{-1}$
S_b	$1. * 0.5 = 0.5 \text{ m}^2$

C_b	0.5
S_t	$0.2 * 0.5 = 0.1 \text{ m}^2$
C_t	0.5
m	10 kg
$\rho_w V_t$	5 kg

TABLE 3.2 – Valeurs numériques choisies pour le calcul de dx

Ainsi, en faisant varier la longueur de câble nous obtenons les résultats présentés sur la figure 3.3. Pour une longueur de 100 m, l'écart horizontal de position entre la bouée et le transducteur est de 1 m.

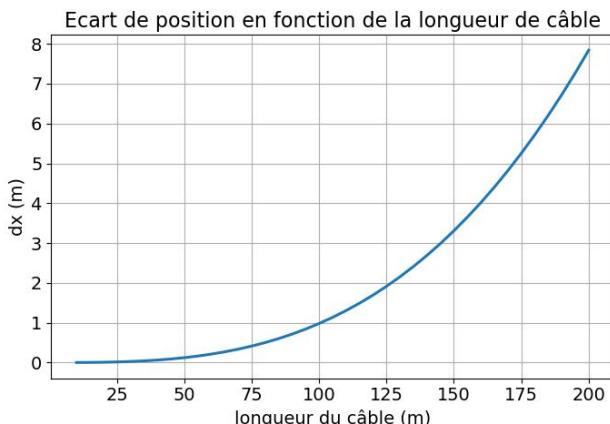


FIGURE 3.3 – Impact de la longueur de câble sur la position du transducteur

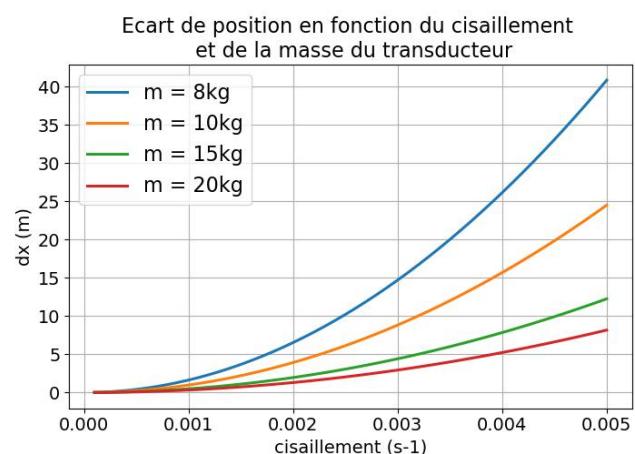


FIGURE 3.4 – Impact du cisaillement du courant et de la masse sur la position

Sur la figure 3.4, la longueur de câble est fixée à 100 m et les deux paramètres variables sont le cisaillement du courant (entre 1 et 50 cm/s sur 100 m) et la masse du transducteur lesté (entre 8 et 20 kg). Il apparaît clairement que, même en cas de cisaillement très important, le lestage du transducteur permet de limiter l'écart de position dx à quelques mètres.

Ainsi, bien que les résultats précédents nécessitent une confirmation expérimentale et/ou numérique avec un modèle détaillé et des hypothèses plus fines, nous estimons, pour la suite, l'incertitude sur la position du transducteur par rapport à la bouée de surface, $e_{\delta x}$, égale à 10 m. En effet, cette précision pourra toujours être atteinte en régulant le lestage.

3.1.3 Précision sur le profil de célérité

Un instrument typiquement utilisé pour mesurer la célérité du son dans l'eau est une CTD (Conductivity Temperature Depth) SBE37 MicroCAT du constructeur Sea-Bird [25]. D'après la documentation, la température est mesurée à ± 0.002 °C, pour des températures allant de -5 °C à 35 °C. De la même manière, la conductivité est mesurée avec une précision de $\pm 3.10^{-4}$ S/m. Cela revient, en salinité, à une erreur d'environ 3.10^{-4} psu.

L'équation d'état de l'eau de mer, ou *International Equation of State of Seawater* [30], nous permet de calculer la célérité du son dans l'eau en fonction de la salinité, la température et la pression. Ainsi, une erreur de 0.002 °C en température entraîne une erreur en célérité de 9.10^{-3} m/s. De même, une erreur de 3.10^{-4} psu en salinité entraîne une erreur en célérité de 4.10^{-4} m/s.

Finalement, nous pouvons arrondir l'erreur instrumentale liée à la mesure de célérité à 1.10^{-2} m/s. Cela correspond à environ 10^{-5} de précision relative de célérité, donc de temps, et donc de distance. À noter qu'il s'agit d'une erreur affectée à une mesure locale et instantanée, qui ne représente donc pas vraiment l'incertitude sur le champ de célérité à l'échelle spatiale de la mesure de localisation. Cette erreur sera prise en compte dans l'erreur sur le temps de propagation e_{tp} (cf. partie 2.4) et utilisée lors de la géolocalisation des flotteurs. On peut d'ores et déjà penser que cette erreur sera négligeable face aux autres erreurs liées à la propagation acoustique.

3.2 Performances

3.2.1 Portée maximale de détection

Plus la fréquence d'émission d'une source est basse, moins le niveau de bruit ambiant et les pertes par propagation sont importantes et plus la portée est grande. Cependant, un compromis est à faire entre fréquence et coût car les transducteurs basse fréquence sont très coûteux. Finalement, pour obtenir une portée de l'ordre de 100 km, nous travaillons avec une source à la fréquence d'émission de 3 kHz. Afin d'évaluer sa portée maximale de détection, nous utilisons l'équation du sonar suivante :

$$RL = SL - TL - NL + DI + PG \quad (3.7)$$

avec :

- SL le niveau émis par la source : 185 dB ref. 1 μ Pa à 1 m.

- RL le rapport signal sur bruit (dB).
- TL les pertes par transmission (dB). Ces pertes comprennent un terme de divergence géométrique (sphérique) et un terme rendant compte de l'absorption de l'eau. On peut alors écrire : $TL = 20\log(r) + \alpha r$ avec α le coefficient d'absorption du son dans l'eau (dB/m), déterminé par le modèle de Thorp [28], et r la distance parcourue par l'onde (m).
- NL le niveau de bruit ambiant dans la bande (dB). Il est défini tel que $NL = NL_0 + 10\log(B)$ avec B la largeur de bande du signal (200Hz). NL_0 , la densité spectrale, est définie grâce au modèle de Wenz [32], présenté en annexe B. Les niveaux choisis par la suite (cf. tableau 3.3) sont des estimations pour différents états de mer [31]. En pratique, ces niveaux varient en fonction des conditions et devront être mesurés pendant la campagne in-situ.
- DI l'indice de directivité à la réception (dB). Comme nous travaillons avec un hydrophone omnidirectionnel, $DI = 0$ dB.
- PG le gain de traitement (dB) : $PG = 10\log(BT)$ avec B la largeur de bande du signal (Hz) et T la durée d'émission (s). Or, $B = 200$ Hz et $T = 1$ s, d'où $PG = 23$ dB.

Le LOPS possédant aussi une source à 12 kHz, nous effectuerons également les calculs de portée maximale à cette fréquence. Deux paramètres varient selon la fréquence d'émission de la source :

Fréquence	α	NL		
		Estat de mer 0	Estat de mer 2	Estat de mer 4
3 kHz	0.19 dB/km	45 dB	77 dB	82 dB
12 kHz	1.23 dB/km	40 dB	61 dB	71 dB

TABLE 3.3 – Paramètres de l'équation du sonar variables selon la fréquence

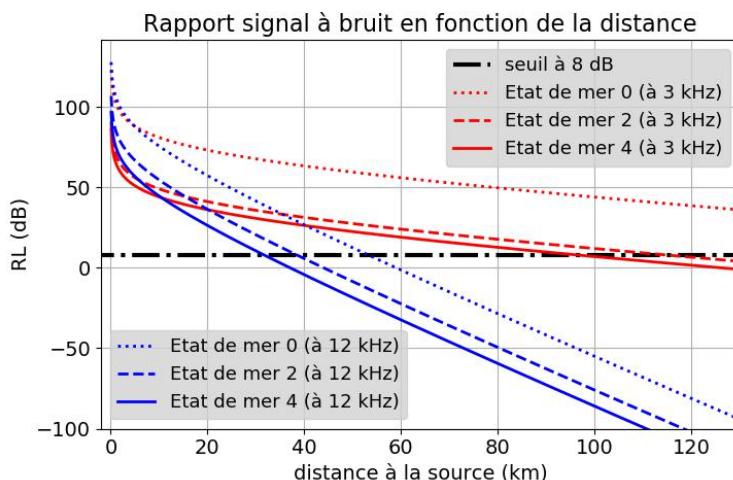


FIGURE 3.5 – Portée maximale de détection suivant la fréquence utilisée

De plus, d'après l'analyse sur la précision de mesure du temps d'arrivée (cf. partie 3.2.2), le seuil de détection du signal doit être fixé à 8 dB minimum afin d'obtenir une précision de mesure du temps d'arrivée satisfaisante. La figure 3.5 représente le rapport signal à bruit en fonction de la distance parcourue par le signal. Finalement, la portée maximale de détection à 3 kHz est d'environ 95 km pour un état de mer 4, contre seulement 30 km à 12 kHz.

3.2.2 Précision de mesure du temps d'arrivée

Nous cherchons maintenant à quantifier la précision de mesure du temps de réception du signal bruité par le flotteur. En effet, plus le signal sera bruité, plus l'erreur sur l'estimation du temps d'arrivée sera importante. La borne de Cramer-Rao permet d'estimer la limite inférieure de la variance du temps d'arrivée τ en fonction du rapport signal sur bruit [15]. Les deux variables sont liées par l'équation (3.8) :

$$var(\tau) \geq \frac{1}{r.(2\pi.B_e)^2} \quad (3.8)$$

avec r le rapport signal sur bruit à la sortie du récepteur, τ le temps d'arrivée du signal et B_e la largeur de bande effective du signal, définie par :

$$B_e^2 = \frac{\int (f - f_0)^2 \cdot |S(f)|^2 \cdot df}{\int |S(f)|^2 \cdot df} \quad (3.9)$$

avec $S(f)$ le signal étudié, dans le domaine fréquentiel. Or, le signal avec lequel nous travaillons est typiquement un chirp (signal modulé en fréquence) linéaire de la forme :

$$S(t) = A \cdot \sin(2\pi[f_0 + m \frac{t-T}{2}]t) \quad \text{si } 0 < t < T \quad (3.10)$$

avec A l'amplitude du signal, f_0 la fréquence centrale, T la durée du signal et $m = \frac{B}{T}$ avec B la largeur de bande. Ici, le signal choisi est tel que : $A = 1$, $f_0 = 3$ kHz, $B = 200$ Hz et $T = 1$ s.

La largeur de bande effective de ce signal, calculée grâce à l'équation (3.9), est de 63 Hz. Or, nous souhaitons que l'écart-type sur le temps d'arrivée τ soit égal à 1 ms. En effet, cela correspond à une erreur en distance d'environ 1.5 m, ce qui est en accord avec nos objectifs. Grâce à l'équation (3.8), nous en déduisons le rapport signal sur bruit minimum nécessaire pour obtenir la précision voulue sur τ : celui-ci doit être supérieur ou égal à 8 dB. Ainsi, pour la suite de notre travail, nous décidons de fixer un seuil de détection de 10 dB afin que la précision sur la mesure du temps d'arrivée soit satisfaisante.

3.3 Localisation

Maintenant que nous avons déterminé les erreurs instrumentales ainsi que les performances de notre système, nous pouvons utiliser l'algorithme de géolocalisation et en déduire la précision sur la localisation des flotteurs, en milieu isocélère et sous l'hypothèse d'une célérité connue (aux incertitudes de mesures de la CTD près). Nous travaillons dans un contexte simplifié,

selon une unique dimension x . La figure 3.6 représente un exemple de déploiement possible : les sources sont représentées par un disque orange et le flotteur par une étoile verte.

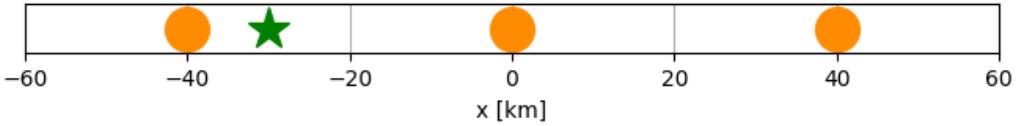


FIGURE 3.6 – Exemple de déploiement source - récepteur selon une dimension

Afin d'avoir une idée de l'erreur liée à la géolocalisation, nous utilisons la méthode présentée dans le chapitre 2. Pour rappel, la fonction de minimisation a la forme suivante :

$$J(\underline{x}, \delta t) = \frac{\|\underline{x} - \underline{x}_b\|^2}{e_x^2} + \frac{\delta t^2}{e_{\delta t}^2} + \sum_i \epsilon_i \times \frac{[\tilde{t}_r^i - \delta t - t_e^i - t_p(\underline{x}, \underline{x}_t^i)]^2}{e_{tp}^2}$$

Nous connaissons à présent les erreurs e_{dx} (liée à la position du transducteur \underline{x}_t^i), e_{tp} (liée au temps de propagation) et $e_{\delta t}$ (liée à la dérive d'horloge) :

- e_{dx} est fixée à 10 m comme présenté dans la partie 3.1.2.
- e_{tp} comprend l'erreur due à la précision de mesure de la CTD égale à 0.5 ms (cf. partie 3.1.3), ainsi que l'erreur due à la précision de mesure du temps d'arrivée du signal égale à 1 ms (cf partie 3.2.2). Finalement, e_{tp} est donc fixée à 1 ms.
- $e_{\delta t}$ prendra deux valeurs différentes. En effet, l'horloge n'étant pas encore choisie, on travaille selon deux configurations : avec une horloge bas de gamme pour laquelle $e_{\delta t} = 0.6$ s, et avec une horloge haut de gamme pour laquelle $e_{\delta t} = 26$ ms (cf. partie 3.1.1).

3.3.1 Résultats avec 3 sources

Entre -60 et +60 km, avec une résolution de 500 m, nous calculons, en chaque point, 1000 fois la position \underline{x} du flotteur. Cela nous permet alors d'en déduire une RMS (Root Mean Square) et un biais de positionnement par rapport à la position réelle. Les figures 3.7, 3.8 et 3.9 représentent les résultats de RMS et de biais, respectivement obtenus pour une dérive d'horloge nulle, de 26 ms, et de 0.6 s.

Dans le premier cas, sans dérive d'horloge (figure 3.7), l'erreur finale sur la position du flotteur est d'environ 87 cm (RMS moyen) et est indépendante de la position des sources. Cependant, ceci n'est plus vrai pour les deux cas suivants qui, eux, prennent en compte une dérive d'horloge. L'erreur moyenne est toujours aux alentours de 90 cm quand le flotteur est situé entre les sources (de -40 à 40 km), mais prend de très fortes valeurs à l'extérieur des sources. Et plus la dérive est importante, plus ces valeurs augmentent. Ceci s'explique par le fait que la dérive d'horloge est compensée lorsque le flotteur est situé entre 2 sources, mais n'est plus compensée dès lors que le flotteur se situe à l'extérieur des sources. Un schéma explicatif est proposé sur la figure 3.10.

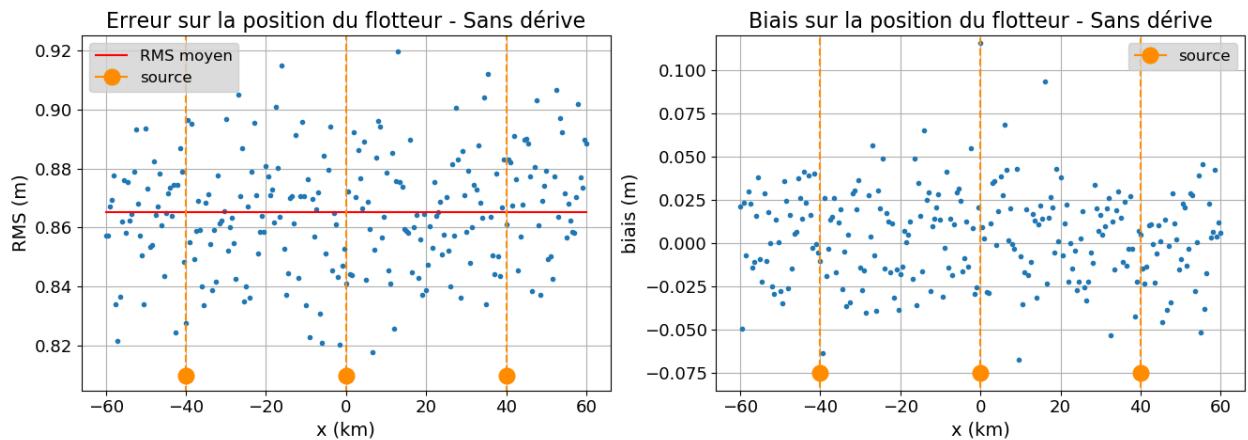


FIGURE 3.7 – RMS et biais sur la position du flotteur sans dérive d’horloge

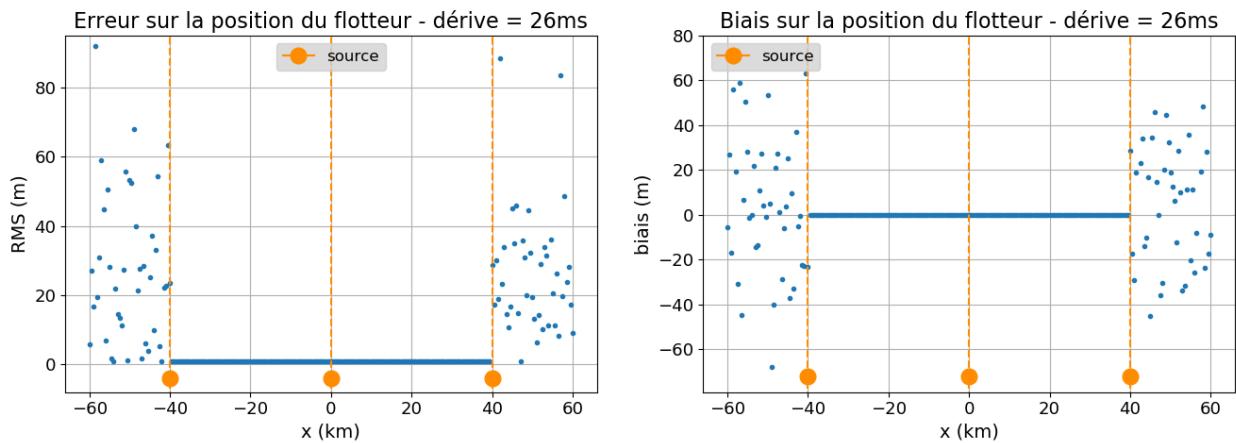


FIGURE 3.8 – RMS et biais sur la position du flotteur avec une dérive de 26 ms

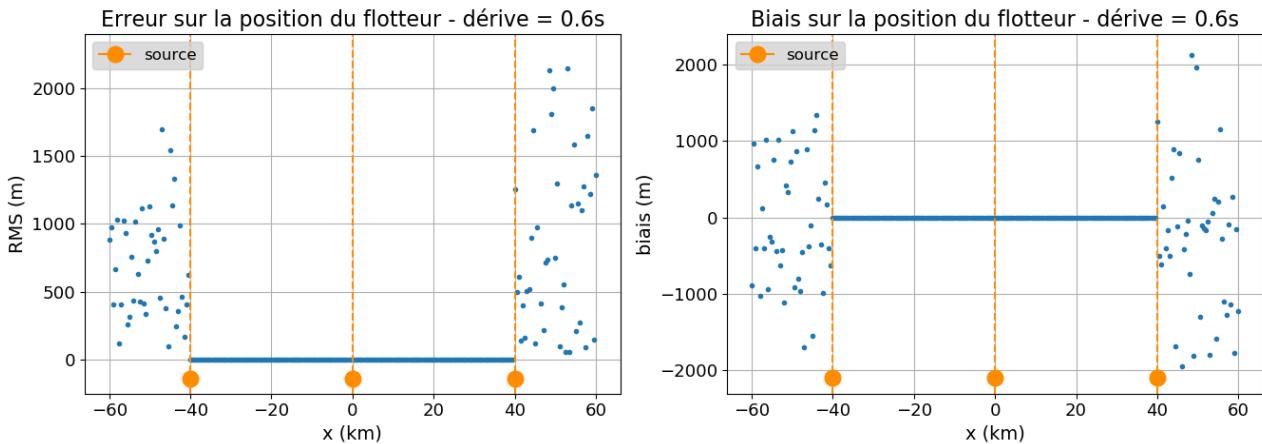


FIGURE 3.9 – RMS et biais sur la position du flotteur avec une dérive de 0.6 s

En définitive, nous comprenons que tant que la dérive d’horloge $e_{\delta t}$ est plus faible que l’erreur e_{tp} , l’erreur sur la position finale du flotteur sera indépendante de sa position par rapport aux sources. Dans le cas contraire, il est important que le flotteur soit situé entre 2 sources afin d’éviter une erreur de positionnement trop importante.

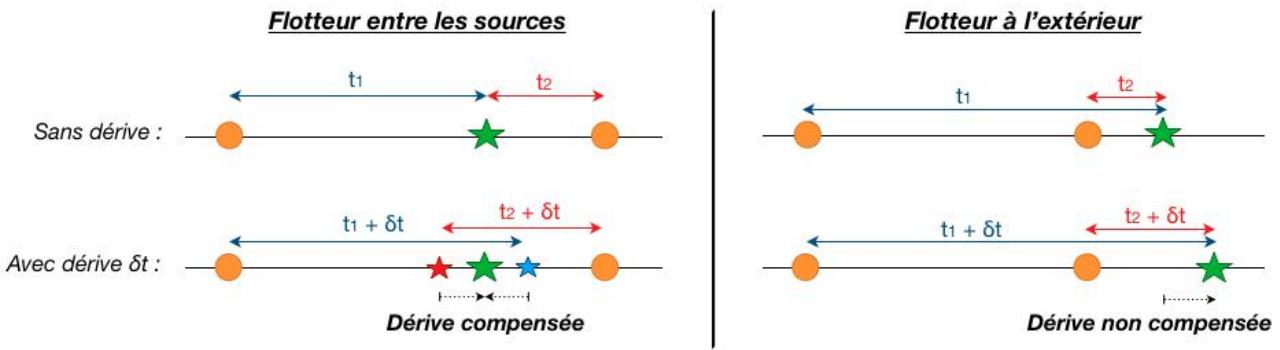


FIGURE 3.10 – Schéma explicatif de la compensation ou non de la dérive d’horloge

3.3.2 Impact du nombre de sources

Après avoir obtenu les résultats pour 3 sources, nous étudions l’impact du nombre de sources sur l’erreur de localisation du flotteur. La figure 3.11 montre un lien de proportionnalité entre le RMS moyen observé sur le transect et le nombre de sources utilisées. En effet, l’erreur sur la position du flotteur décroît en racine carrée du nombre de sources. Cette propriété s’avère être vraie avec ou sans dérive d’horloge.

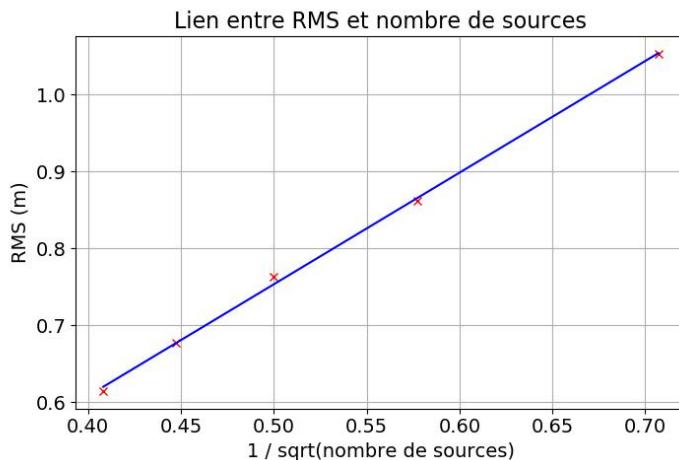


FIGURE 3.11 – Impact du nombre de sources sur la RMS de la position du flotteur

En définitive, dans le cas idéalisé du milieu isocélère, l’erreur sur le positionnement du flotteur est de l’ordre du mètre lorsque le flotteur se situe entre les sources. De plus, cette erreur peut encore décroître si le nombre de sources augmente. Ainsi, si l’on considère (en idéalisant le milieu de propagation) uniquement les incertitudes liées à l’instrumentation elle-même ou au rapport signal sur bruit, la précision de localisation attendue est atteignable. Cette conclusion est à la fois encourageante (les aspects technologiques sont maîtrisables) et illusoire puisque le milieu isocélère n’existe pas et est contraire à la raison d’être du projet Cognac qui cherche à comprendre les dynamiques océaniques. Ainsi, l’optimisation du système doit se porter sur la compréhension physique des phénomènes de propagation et sur leur prise en compte dans la méthode de géolocalisation. C’est tout l’objet du chapitre 4.

Chapitre 4

Impact de la bathycélémétrie

Après avoir établi un budget d'erreur sur la géolocalisation dans un milieu idéal isocèle, nous nous penchons maintenant sur l'impact de la bathycélémétrie sur ce budget d'erreur. En effet, la propagation acoustique est dépendante de la célérité du son dans l'eau et l'impact sur la géolocalisation peut devenir important dès lors que nous travaillons sur des distances dépassant la dizaine de kilomètres.

4.1 Le modèle de propagation Bellhop

Afin d'estimer les erreurs liées à la localisation par acoustique dans un cas de propagation réaliste, nous utilisons un modèle de tracé de rayons prédisant les champs de pression acoustique en environnement sous-marin : Bellhop [21]. Ainsi, grâce à Bellhop, pour un champ de célérité et une profondeur de source donnés, il est possible d'obtenir différentes informations telles que :

- Un tracé de rayons (figure 4.1). En rouge sont représentés les rayons directs, en bleu les rayons réfléchis sur la surface et en noir les rayons réfléchis sur le fond. Ce code couleur est conservé pour l'ensemble du rapport.
- Les pertes par propagation, présentées sur la figure 4.2. Seules les pertes sur les 500 premiers mètres de profondeur sont représentées ici car il s'agit de notre zone d'intérêt. En effet, pour rappel, les flotteurs sont situés entre 100 et 500 m de profondeur.
- Les réponses impulsionales pour un récepteur donné. Le récepteur choisi sur la figure 4.3, à 200 m de profondeur et 60 km de la source, est localisé par une étoile verte sur les figures 4.1 et 4.2. Il s'agit de représenter les amplitudes des arrivées en fonction de leur temps de détection. L'amplitude A peut être convertie en niveau reçu (RL) tel que : $RL = 20\log(A)$. Or le niveau émis (SL) considéré par Bellhop est de 0 dB. Les pertes par propagation peuvent alors être déduites ainsi : $TL = SL - RL = -RL = -20\log(A)$.

Pour finir, l'ensemble des paramètres utilisés lors des modélisations Bellhop est présenté en annexe C.

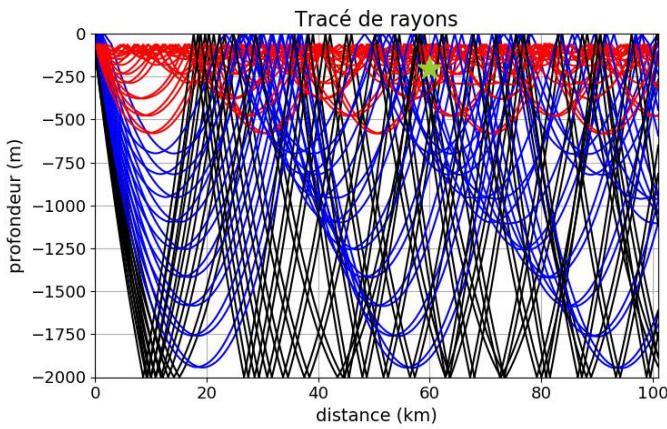


FIGURE 4.1 – Tracé de rayons - Profil n°1 de Méditerranée (cf. figure 4.4) - Source à 100 m de profondeur // Rouge : direct, Bleu : réfléchi surface, Noir : réfléchi fond.

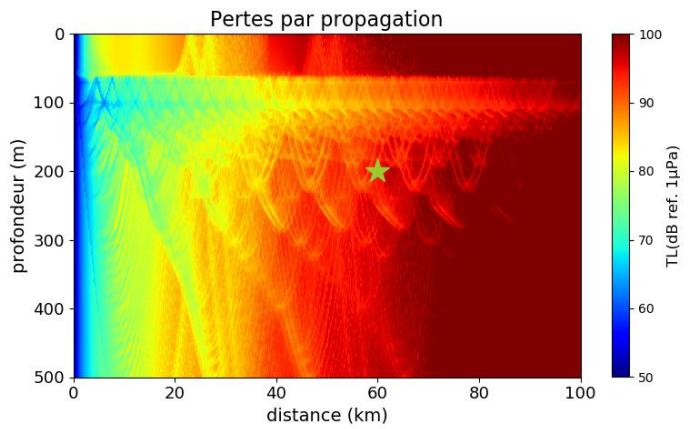


FIGURE 4.2 – Pertes par propagation - Profil n°1 de Méditerranée (cf. figure 4.4) - Source à 100 m de profondeur

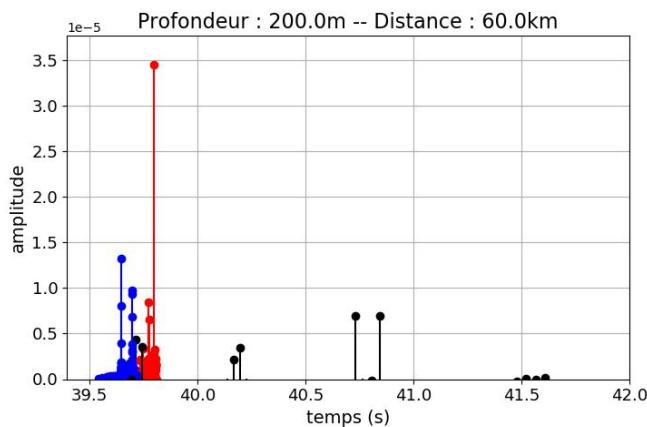


FIGURE 4.3 – Réponse impulsionnelle pour un récepteur donné (étoile verte sur la figure 4.1 : 200 m de profondeur et 60 km de la source)

4.2 Zones d'étude

Afin d'évaluer l'impact de la bathycélémétrie, nous travaillons avec des profils et champs de célérité de différentes zones d'intérêt :

- Nous avons quatre profils représentatifs des différentes situations pouvant être rencontrées en Méditerranée, en été comme en hiver. L'ensemble de ces profils est présenté sur la figure 4.4.
- De plus, nous avons accès à des sorties de modélisation numérique de circulation océanique fournies par Jonathan Gula (LOPS). Le premier modèle, au niveau du Gulf Stream (cadre rouge sur la figure 4.5), nous permet d'obtenir un profil de célérité tous les 500 m sur une zone de 500 km de côté. Une telle zone, très énergétique, est spécialement intéressante dans le contexte du projet Cognac. Le deuxième modèle, quant à lui, est situé sur l'ensemble de l'Atlantique Nord (cadre orange sur la figure 4.5), avec une résolution de 2 km. Grâce à ces deux modèles, nous avons accès à des champs de célérité variant dans l'espace et dans le temps. Des cartes des températures de surface des deux zones sont présentées en annexe D.

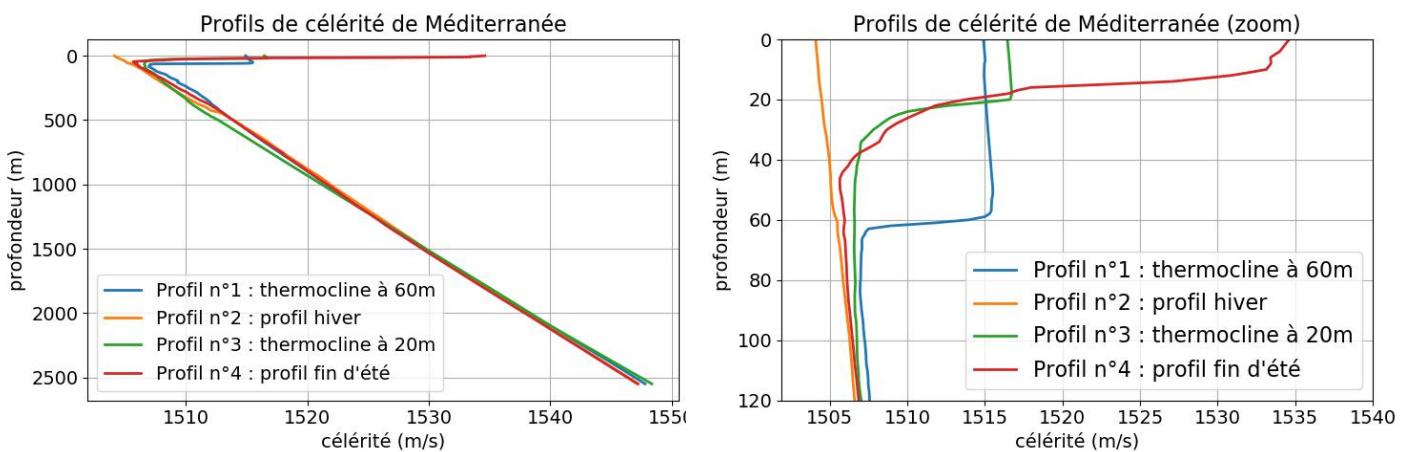


FIGURE 4.4 – Profils de célérité de Méditerranée



FIGURE 4.5 – Carte situant les deux zones d'étude : en rouge au niveau du courant du Gulf Stream ; en orange en Atlantique Nord

4.3 Analyse des tracés de rayons

Dans un premier temps, nous avons cherché à analyser les résultats des modélisations Bellhop calculées à partir des différents profils de célérité présentés dans la partie 4.2 précédente. Dans un soucis de clarté des explications, les figures et interprétations présentées dans cette section seront basées sur un seul profil de célérité : le profil n°3 de Méditerranée (présenté sur la figure 4.4 de la partie précédente). L'annexe E présentera alors les résultats obtenus pour tous les autres profils de célérité étudiés.

Les tracés de rayons et pertes par transmission obtenus pour le profil étudié sont présentés sur la figure 4.6. La source est alors placée à une profondeur de 10 m, à la distance arbitraire de 0 km. A noter que les tracés de rayons sont réalisés sur l'ensemble de la colonne d'eau (2000 m), mais présentés uniquement pour des angles de départ compris entre -60 et $+60^\circ$ par rapport à l'horizontale, dans un soucis de lisibilité. Les pertes par propagation, quant à elles, sont présentées uniquement sur les 500 premiers mètres de profondeur. Il s'agit, encore une fois, de la zone d'intérêt.

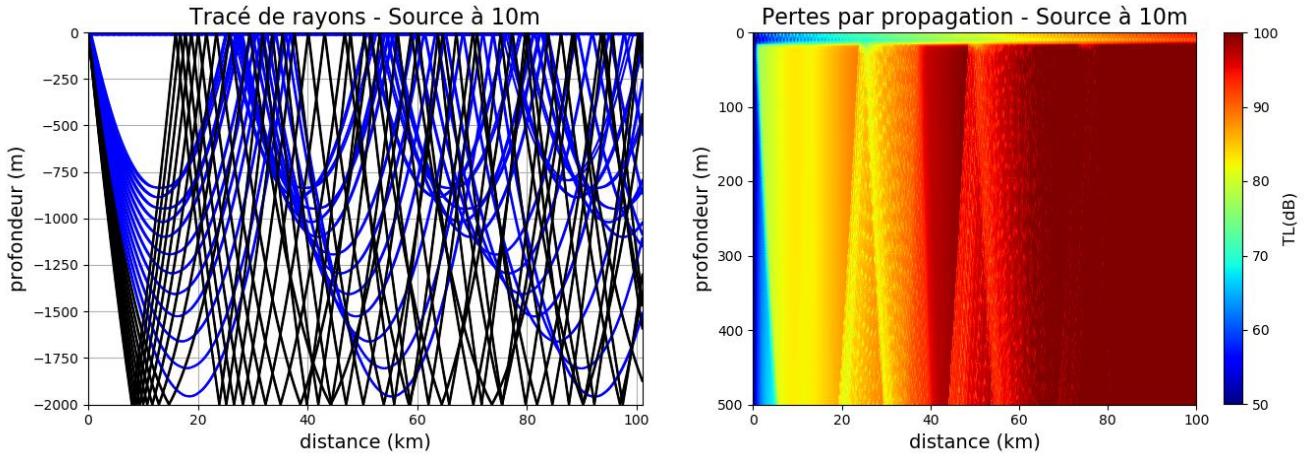


FIGURE 4.6 – Tracé de rayons pour une source à 10 m - Profil n°3 Méditerranée

Nous nous rendons compte de l'existence de différents types de trajets suivis par les rayons : certains sont directs (en rouge, non existants sur cet exemple), d'autres sont réfléchis uniquement sur la surface (en bleu) et d'autres encore sont réfléchis sur le fond (en noir).

Il existe des zones où seuls les rayons réfléchis sur le fond sont présents. C'est notre cas, ici, dans les 800 premiers mètres de profondeur pour des distances à la source de 0 à 25 km et de 40 à 55 km (figure 4.6). Ces zones sont appelées "zones d'ombres". En effet, ne connaissant pas la bathymétrie exacte de la zone de travail, nous sommes incapables de connaître avec une précision suffisante (quelques mètres) la distance parcourue par ces rayons réfléchis sur le fond. De plus, ces rayons subissent des pertes d'énergie importantes associées aux réflexions sur le fond. Ils sont donc pratiquement inexploitables.

Ainsi, si le flotteur se trouve dans une zone d'ombre, il sera impossible de le localiser correctement. L'objectif principal est donc de minimiser les zones d'ombres afin d'avoir un maximum de rayons exploitables (rayons rouges et bleus) et de pouvoir localiser le flotteur où qu'il soit entre 100 et 500 m de profondeur, comme défini par le cahier des charges.

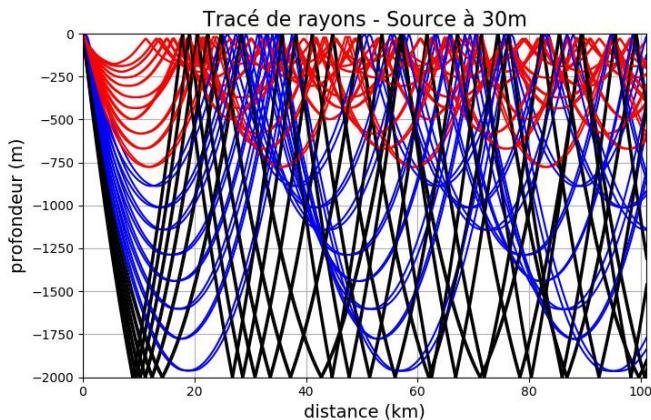


FIGURE 4.7 – Tracé de rayons pour une source à 30 m

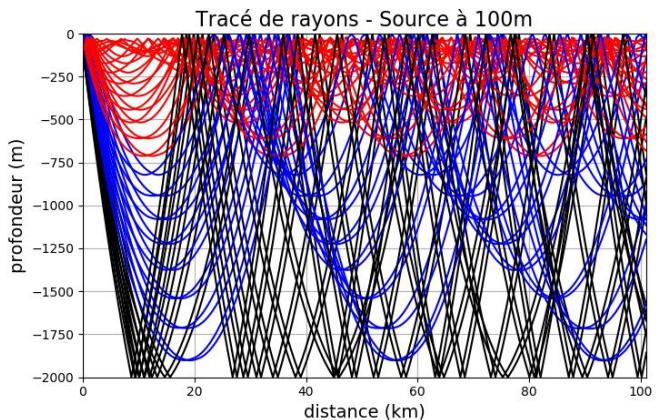


FIGURE 4.8 – Tracé de rayons pour une source à 100 m

Une solution afin de minimiser les zones d'ombres est de jouer sur la profondeur de la source. Les résultats obtenus avec la source placée à 30 m, puis 100 m de profondeur sont présentées sur les figures 4.7 et 4.8. Une zone d'ombre plus petite (de 0 à 10 km sur 200 m de profondeur) est toujours visible pour une source à 30 m, mais disparaît lorsque la source est placée à 100 m.

Finalement, de grandes zones d'ombres existent seulement lorsque la source est placée au dessus de la thermocline (à 20 m dans notre exemple) ou bien au dessus du minimum de célérité. L'annexe E confirme cette explication sur les 3 autres profils de Méditerranée étudiés. L'épaisseur de la couche de mélange étant toujours inférieure à la centaine de mètres en Méditerranée, la profondeur optimale de la source peut être fixée à 100 m et les zones d'ombres seront alors négligeables.

Cependant, les choses se compliquent en Atlantique où les profils de célérité sont très variables et complètement différents de ceux présentés pour la Méditerranée. Le minimum de célérité est atteint aux alentours des 500 à 1000 m de profondeur. Deux exemples de tracés de rayons sont présentés sur les figures 4.9 et 4.10, pour une source à 100 m. Les profils de célérité ont été acquis respectivement au sud et au nord du Gulf Stream.

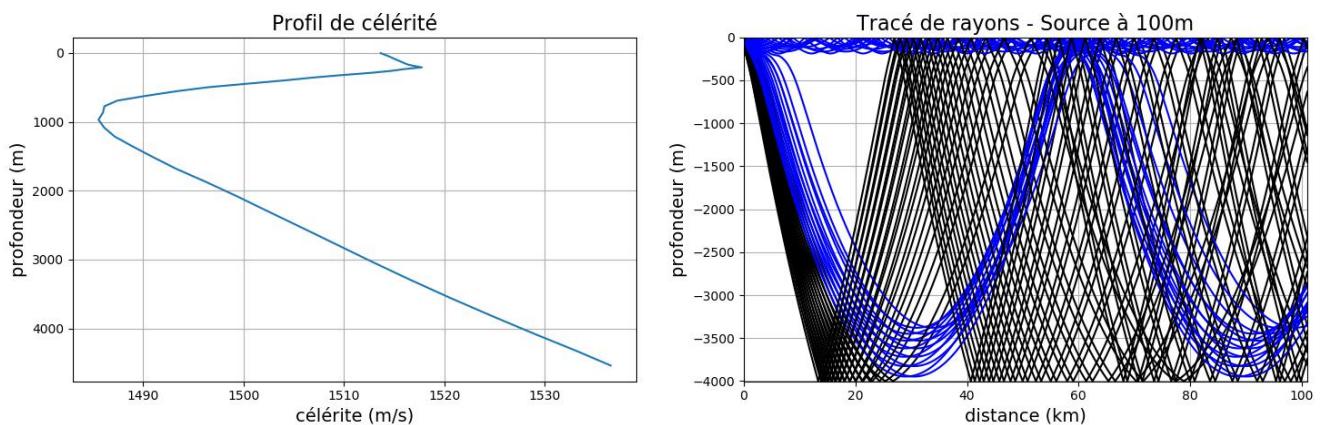


FIGURE 4.9 – Profil de célérité et tracé de rayons pour un point au Sud du Gulf Stream

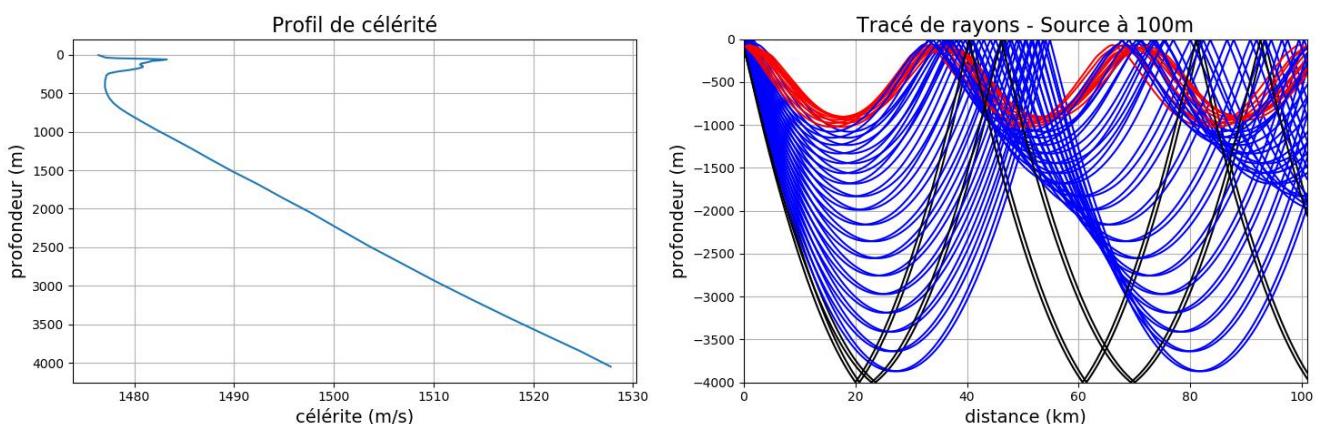


FIGURE 4.10 – Profil de célérité et tracé de rayons pour un point au Nord du Gulf Stream

Dans le premier cas, on observe un chenal de propagation en surface (sur 200 m) qui pourrait nous être utile. Cependant, dans le second cas, ce chenal n'apparaît pas. Dans les deux cas, des zones d'ombres sont présentes. En augmentant encore la profondeur de la source, les résultats pourraient être améliorés. Cependant, pour diverses raisons évoquées précédemment (cf. partie 1.2), la profondeur maximale du transducteur est de 100 m et nous serons donc contraints de tenir compte de la présence des zones d'ombre.

En définitive, afin de limiter au maximum les zones d'ombres, tout en tenant compte des limites technologiques du transducteur, la profondeur de la source sera de 100 m pour toute la suite du raisonnement, et ce, quelque soit la zone d'étude. De plus, il faudra adapter le nombre et la couverture des sources à la présence de ces zones d'ombre.

4.4 Structures des séquences de trajets multiples

Lorsque nous étudions cette fois-ci les réponses impulsionales reçues pour une position particulière du flotteur, nous observons de nombreuses arrivées liées à la présence de trajets multiples. L'objectif est d'identifier les divers types de trajets dans une même séquence temporelle pour pouvoir associer une distance de propagation à la mesure des divers temps d'arrivée.

Nous nous sommes limités à deux méthodes de détection simples et classiques : soit une détection de la première arrivée au dessus du seuil de 10 dB (déterminé dans la partie 3.2.2), soit une détection du maximum d'amplitude (figure 4.11).

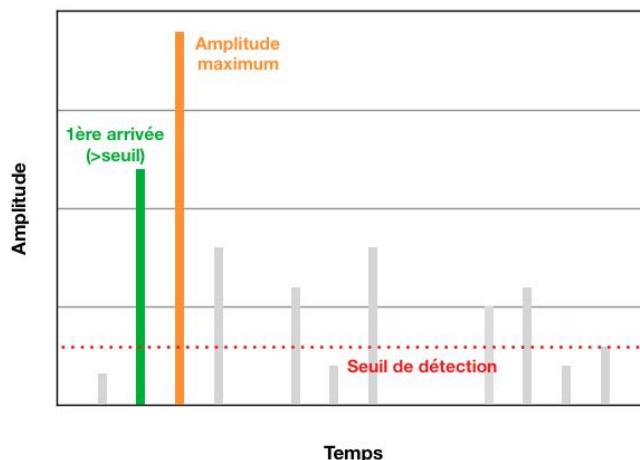


FIGURE 4.11 – Les deux méthodes de détection considérées

En pratique, nous calculons, grâce à Bellhop, les réponses impulsionales pour plusieurs positions du flotteur sur la zone (tous les 10 km en distance et tous les 100 m de profondeur par exemple) et nous en déduisons la méthode la plus adaptée. L'exemple de la figure 4.12 est basé sur le profil n°1 de Méditerranée (cf. figure 4.4 et E.2). Afin de détecter les trajets directs, la méthode de détection de la 1ère arrivée semble être la mieux adaptée. En effet, en utilisant le maximum d'amplitude nous détecterions des rayons réfléchis sur le fond.

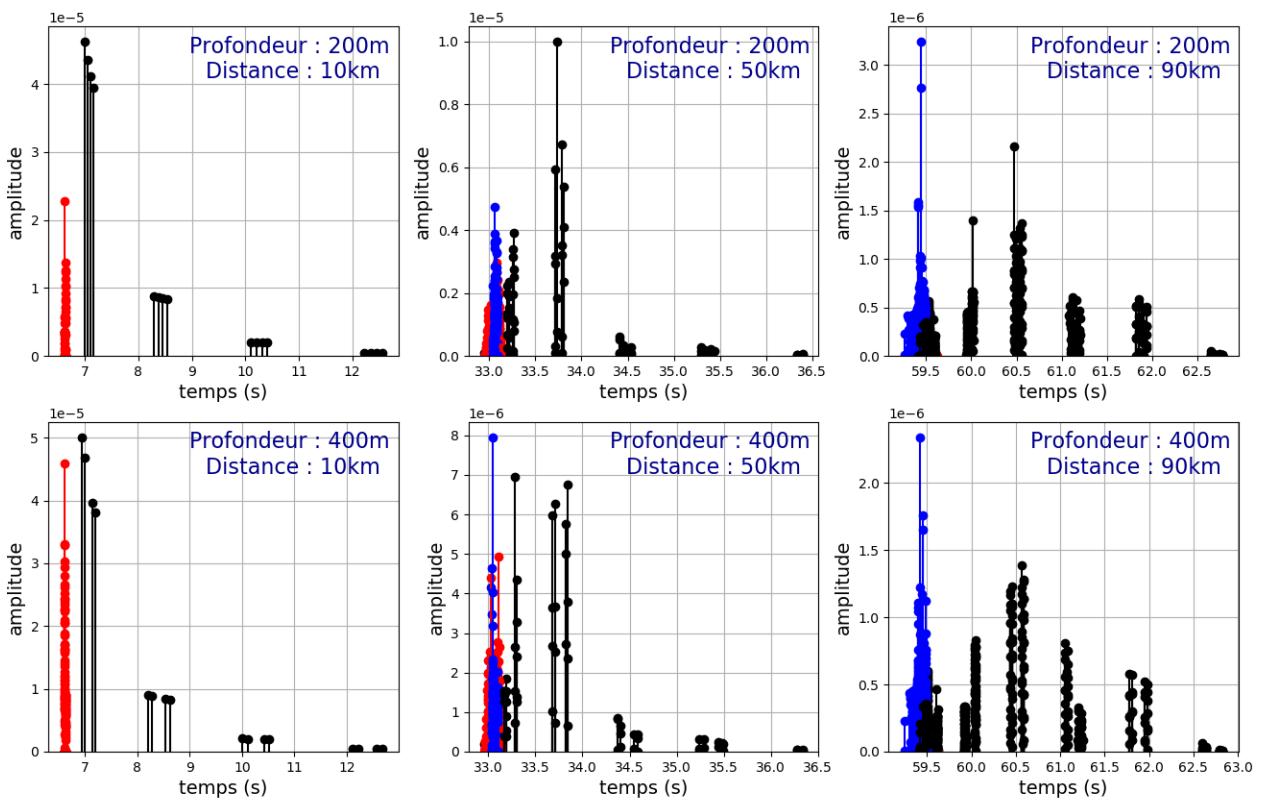


FIGURE 4.12 – Réponses impulsionnelles pour différentes positions du flotteur - source à 100 m

Ce même exercice est réalisé sur plusieurs zones d'études (4 profils de Méditerranée et 2 profils dans la zone du Gulf Stream) et les résultats sont présentés en annexe F. Au final, nous nous apercevons qu'il n'existe pas de solution universelle et que la méthode de détection doit être adaptée à chaque zone d'étude. Une double détection, à la fois de la première arrivée et du maximum d'amplitude, pourrait éventuellement s'avérer utile (cf partie 4.6).

4.5 Concept de célérité équivalente

Après avoir choisi la méthode de détection du temps d'arrivée du signal, nous cherchons maintenant à convertir les temps d'arrivées obtenus en une distance horizontale source-flotteur. Cette distance nous permettra alors d'en déduire la position du flotteur par rapport à la source.

La méthode la plus simple consiste à définir une "célérité équivalente", constante sur toute la zone, nous permettant très simplement la conversion entre temps d'arrivée et distance parcourue. Cette méthode a plusieurs avantages :

- Un profil de célérité est nécessaire sur zone afin de modéliser les temps d'arrivée avec Bellhop puis de déterminer la célérité équivalente, mais après cela, plus aucune mesure de célérité ne sera nécessaire. Cela représente un gain significatif de temps de traitement.
- De plus, une fois la célérité équivalente fixée, nous n'avons plus besoin de modèles de propagation (comme Bellhop) pour définir la distance source-récepteur. Les calculs sont donc très simples et rapides.

Cependant, la précision sur la distance source-récepteur obtenue par cette méthode est-elle en accord avec le cahier des charges ? Pour répondre à cette question, nous avons défini une célérité équivalente pour plusieurs profils et nous avons calculé les erreurs associées sur la distance source-récepteur.

4.5.1 La méthode

Afin de déterminer la célérité équivalente, nous utilisons les réponses impulsionales calculées dans la partie 4.4. De là, nous en déduisons les temps d'arrivées du signal (suivant la méthode de détection choisie). Il s'agit ensuite de tracer la distance source-récepteur en fonction du temps d'arrivée. Nous pouvons finalement effectuer une régression linéaire dont le coefficient directeur de la droite sera la célérité équivalente. Pour le profil n°1 de Méditerranée, nous obtenons par exemple, une célérité équivalente de 1515.2 m/s (figure 4.13).

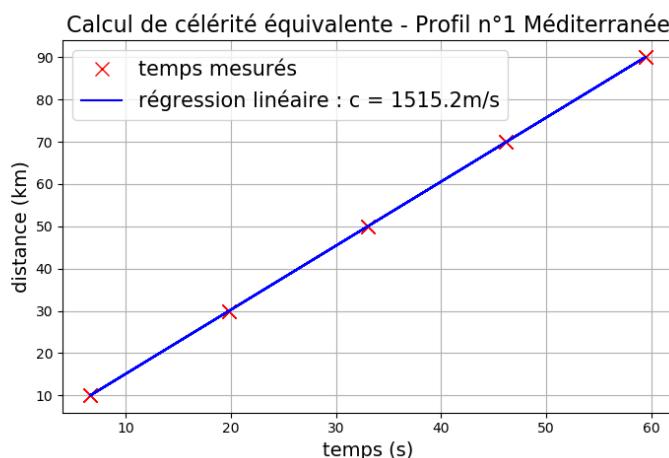


FIGURE 4.13 – Calcul de la célérité équivalente

Par la suite, afin de quantifier l'erreur due à l'utilisation de la célérité équivalente, nous modélisons un grand nombre de réponses impulsionales pour des flotteurs dont nous connaissons la position réelle. Nous pouvons ainsi convertir les temps de réception du signal en une distance grâce à la célérité équivalente et comparer cette distance à la distance réelle.

4.5.2 Les résultats

Dans le meilleur des cas (profil n°1 de Méditerranée), nous obtenons les résultats présentés sur la figure 4.14. L'écart-type moyen obtenu, sans tenir compte des rayons réfléchis sur le fond, est de 45 m. Cependant, il s'agit ici du cas le plus favorable. Pour d'autres zones d'étude, le résultat est moins satisfaisant. Par exemple, pour le profil n°4 de Méditerranée, nous obtenons les erreurs présentées sur la figure 4.15.

Les erreurs sont très importantes (> 150 m) lorsque les arrivées détectées ne sont pas des trajets directs mais soit des trajets réfléchis sur le fond, soit des zones de résurgences avec des rayons réfractés dans la colonne d'eau à de très grandes profondeurs (rayons bleus). Ainsi, on atteint un écart-type moyen d'environ 300 m, pour des erreurs maximales atteignant les 1500 m.

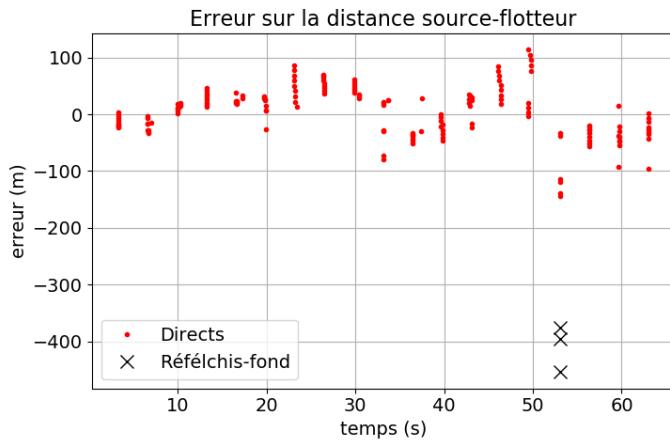


FIGURE 4.14 – Erreur sur la distance source-récepteur - profil n°1 Méditerranée

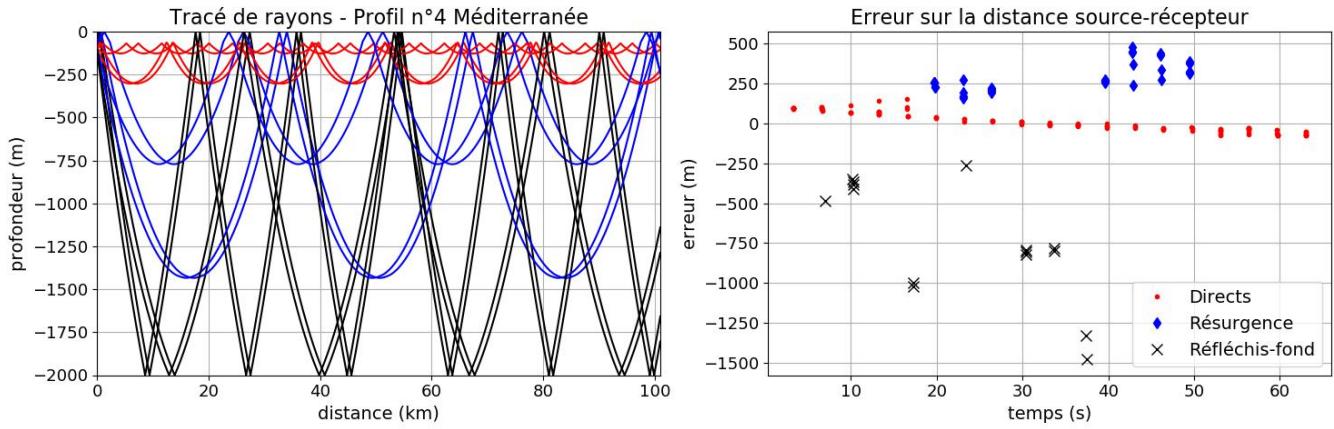


FIGURE 4.15 – Tracé de rayons et erreur sur la distance source-récepteur - Profil n°4 Méditerranée

En définitive, la méthode de célérité équivalente, bien que très pratique, ne pourra pas être utilisée dans notre étude. En effet, les erreurs observées, même dans les cas les plus favorables, ne répondent pas à nos exigences de localisation du flotteur à 10m près.

4.6 Impact de la connaissance imparfaite du champ de célérité

D'après les résultats de la partie 4.5.2, le concept de célérité équivalente ne convient pas à notre projet. Ainsi, afin de convertir le temps de parcours de l'onde en une distance séparant la source et le récepteur, une seconde méthode est envisageable. Il s'agit de la tabulation de temps d'arrivées.

Connaissant la célérité sur la zone d'étude, il est possible de modéliser, grâce à Bellhop, les temps d'arrivées (déttection de la première arrivée) pour des récepteurs entre 0 et 500 m de profondeur et jusqu'à 100 km de la source. Nous obtenons le résultat suivant (figure 4.16) :

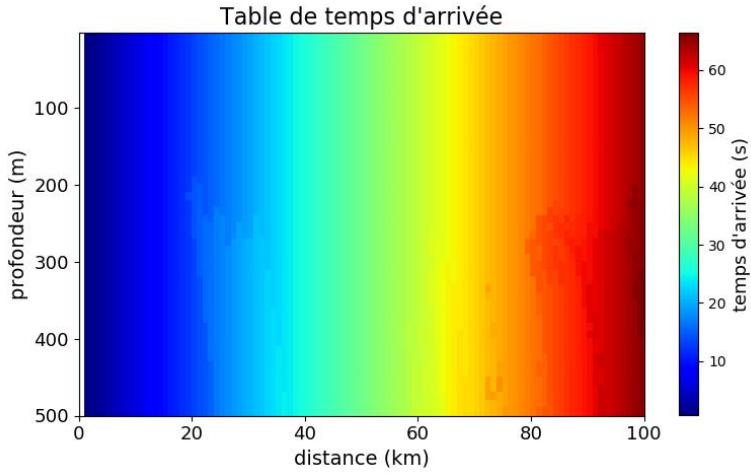


FIGURE 4.16 – Exemple de table de temps d’arrivée correspondant à un champ de célérité au Sud du Gulf Stream

De plus, nous connaissons précisément la profondeur du flotteur grâce à son capteur de pression. Ainsi, pour un temps de trajet donné et une profondeur connue, nous pouvons en déduire la distance source-récepteur en se référant à la table. A noter qu’il s’agit d’une modélisation discrète et donc que des interpolations seront nécessaires afin de trouver la distance source-flotteur la plus précise possible. De plus, pour une profondeur donnée, compte tenu des trajets multiples, des ambiguïtés peuvent exister : plusieurs distances peuvent correspondre à un même temps d’arrivée. Une double méthode de détection (à la fois de la première arrivée et du maximum d’amplitude), comme présenté dans la partie 4.4, pourrait alors permettre de lever cette ambiguïté.

Cependant, la source d’erreur la plus importante est due à la connaissance imparfaite du champ de célérité sur la zone d’étude. En effet, en conditions réelles, la mesure du champ de célérité est approximative et contrainte par le nombre de mesures réalisées : nous n’avons qu’une connaissance discrète de la zone.

Or, suivant la variabilité de la célérité sur la zone, la propagation acoustique peut varier fortement et ainsi modifier totalement les temps d’arrivée des signaux au niveau du flotteur. La table de temps d’arrivée calculée avec les quelques profils mesurés n’est donc potentiellement pas représentative de la réalité de la zone et comporte des erreurs que nous avons cherché à quantifier.

Les simulations numériques d’écoulement océanique nous servent de référence. En effet, la simulation autour du courant du Gulf Stream (cadre rouge sur la figure 4.5 présentée dans la partie 4.2) nous fournit un champ de célérité d’une résolution de 500 m que nous considérons être le champ réel, connu aussi précisément que possible, sur la zone. Nous obtenons donc la table de temps d’arrivée pour ce modèle du champ de célérité. Nous comparons cette table avec la table calculée en ne connaissant que quelques profils de célérité sur la zone. Ainsi, l’exemple présenté sur les figures 4.17 et 4.18 nous donne l’erreur commise sur la distance source-récepteur lorsque nous ne connaissons qu’un profil de célérité tous les 50 km.

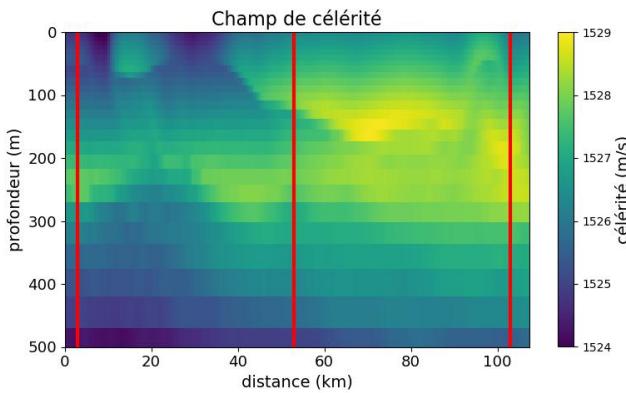


FIGURE 4.17 – Champ de célérité réel versus résolution de 50 km (en rouge)

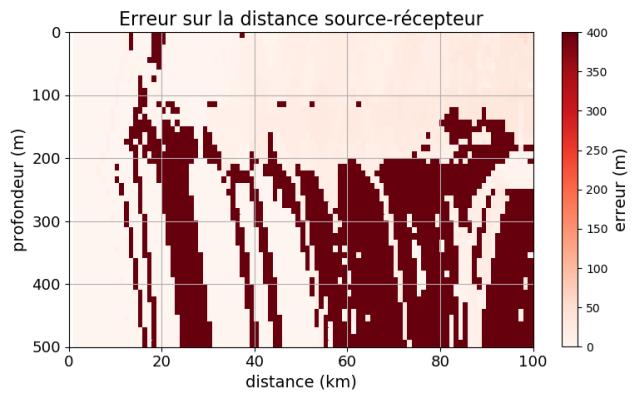


FIGURE 4.18 – Erreur sur la distance due à une mauvaise connaissance de la célérité

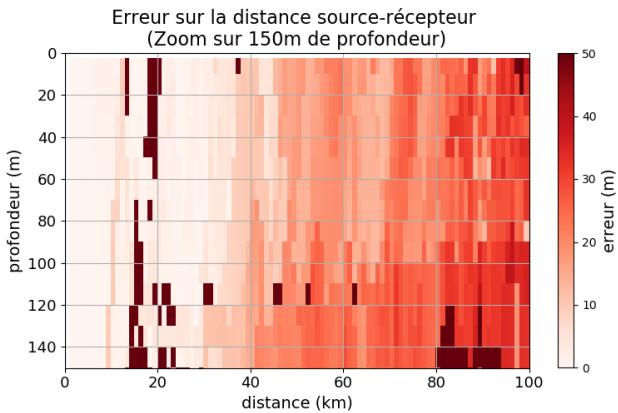


FIGURE 4.19 – Erreur sur la distance sur les 150 premiers mètres de profondeur

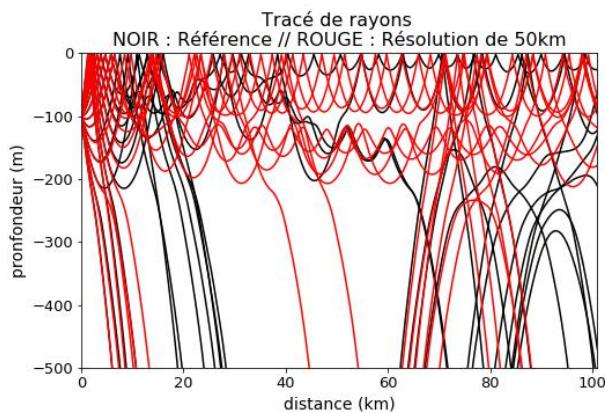


FIGURE 4.20 – Comparaison des tracés de rayons entre référence et résolution de 50 km

Nous observons des zones où l'erreur est de l'ordre de 10m (pour les 15 premiers km sur la figure 4.19), et d'autres zones avec des erreurs très importantes allant jusqu'à 1500 m. Cela est dû au fait que la propagation sera différente dans les deux cas. Le tracé de rayons peut alors varier du tout au tout (figure 4.20), ce qui engendre des tables de temps d'arrivée différentes et des erreurs significatives sur la distance source-récepteur. De plus, nous considérons ici une bathymétrie constante à 4000 m, cependant, en réalité, la bathymétrie n'est pas connue et les erreurs sont encore augmentées lorsque nous travaillons dans les zones d'ombres, avec la présence de rayons réfléchis sur le fond.

Cependant, l'exemple précédent ne représente qu'un instant donné. Ainsi, afin d'obtenir une estimation statistique plus robuste des erreurs, nous avons calculé les cartes d'erreur (similaires à la carte 4.18) toutes les 10 h pendant environ 50 jours, toujours sur la même zone. De plus, les calculs ont été réalisés pour des maillages de la zone avec des pas de 50, 10 et 5 km.

Sur la zone que nous étudions dans les environs du Gulf Stream, la célérité varie entre 1510 et 1530 m/s environ. Nous observons (figure 4.21) que, quel que soit le nombre de profils de célérité réalisés, l'erreur devient très importante à partir de 15 km et en dessous de 200 m de profondeur. Nous observons cependant que plus nous avons une bonne connaissance de la zone

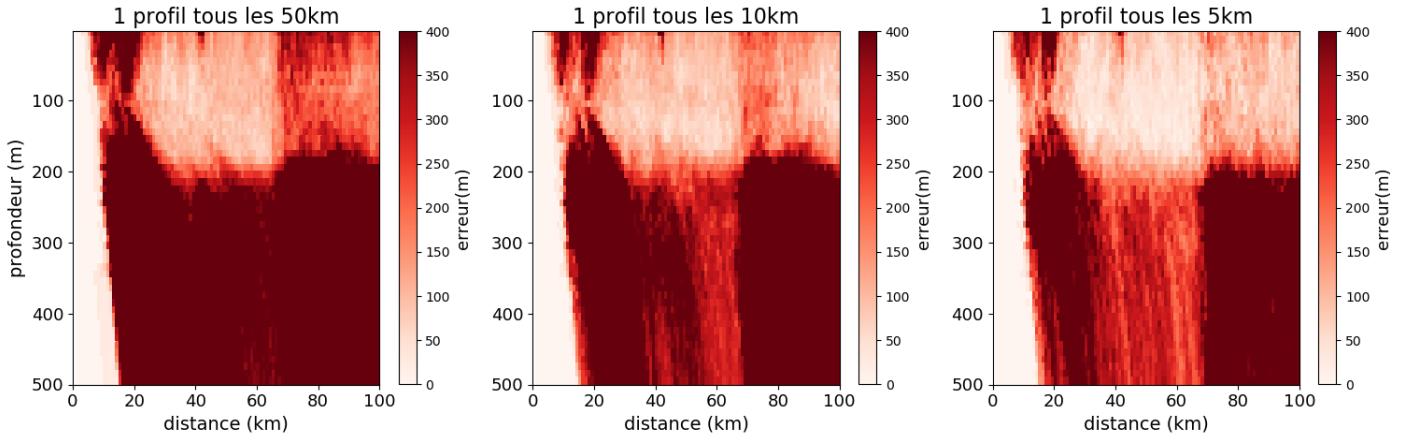


FIGURE 4.21 – Erreur sur la distance en fonction de la densité de profils mesurés - Gulf Stream

Configuration	Pas de 50 km	Pas de 10 km	Pas de 5 km
Erreur moyenne	487 m	352 m	274 m
Erreur maximale	1536 m	1116 m	932 m

TABLE 4.1 – Erreurs moyennes et maximales - Gulf Stream

(plus de profils effectués), plus les erreurs, moyenne et maximale, diminuent (tout en gardant des valeurs élevées par rapport aux objectifs formulés).

En travaillant cette fois-ci dans une zone moins énergétique, au large du Golfe de Gascogne, la célérité varie alors entre 1495 et 1505 m/s. Les résultats présentés sur la figure 4.22 présentent des erreurs plus faibles que pour la zone précédente. Il existe une limite, à 60 km, à partir de laquelle les erreurs augmentent très fortement. Il s'agit de la zone de résurgence classiquement observée en Atlantique, aux alentours de 60 km.

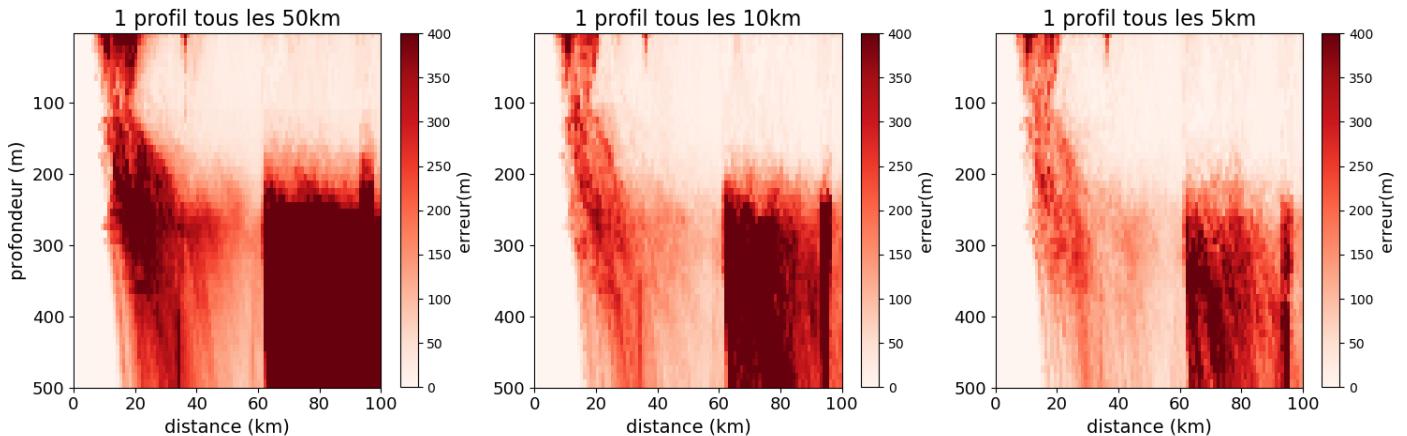


FIGURE 4.22 – Erreur sur la distance en fonction de la densité de profils mesurés - Atlantique Est

Configuration	Pas de 50 km	Pas de 10 km	Pas de 5 km
Erreur moyenne	259 m	153 m	117 m
Erreur maximale	1627 m	784 m	696 m

TABLE 4.2 – Erreurs moyennes et maximales - Atlantique Est

L'erreur moyenne obtenue lorsque nous mesurons la célérité avec une résolution de 5 km pourrait s'avérer satisfaisante. En effet, sur les 60 premiers kilomètres, l'erreur moyenne est de 82 m ce qui, en adaptant le nombre de sources à déployer, pourrait nous permettre d'atteindre l'objectif d'une précision de localisation des flotteurs aux alentours de 10 m.

Cependant, un profil tous les 5 km sur une zone de 50 km par 50 km revient à effectuer 100 profils. Or la vitesse de descente de la CTD est d'environ 1 m/s. Ainsi, pour effectuer un profil à 4000 m de profondeur, il faut plus de 2 h, sans prendre en compte les temps de trajet et de mise à l'eau. Réaliser 100 profils demanderait plusieurs semaines de travail, ce qui est impossible. Par ailleurs, le champ de célérité est dynamique et demanderait une mesure instantanée et un suivi au cours du temps- ce qui est, là aussi, impossible.

Nous savons que les grandes variations de célérité ont lieu plutôt en surface. A partir d'une certaine profondeur, la forme générale du profil reste constante. Ainsi, serait-il possible de ne mesurer la célérité que jusqu'à une certaine profondeur ? Si oui, cela permettrait alors un gain de temps considérable. Une étude plus approfondie serait nécessaire pour répondre à cette question.

Nous supposons un temps caractéristique de l'évolution de la sous-mésoéchelle de 24 h. En estimant qu'un profil jusqu'à 1000 m de profondeur est suffisant, quelle résolution pouvons-nous espérer obtenir en 24 h ? Pour réaliser 4 profils formant un carré de 50 km de côté, le temps de mesure serait d'environ 4 h, tandis que le temps de trajet entre les profils (150 km) serait de plus de 16 h. Ainsi, en 24 h, nous ne pouvons obtenir qu'une résolution de 50 km pour le champ de célérité, ce qui n'est clairement pas suffisant.

L'utilisation d'un poisson remorqué pourrait nous permettre une meilleure résolution. Il s'agit d'un véhicule remorqué ondulant, permettant des mesures océanographiques en continu. Le véhicule SeaSor de Neotek, par exemple, est capable d'onduler depuis la surface jusqu'à 500m de profondeur. Cependant, cette profondeur maximale de 500 m sera-t-elle suffisante pour répondre à nos besoins ? Une étude plus approfondie serait là aussi nécessaire. Si l'utilisation du poisson s'avérait possible, un cycle s'effectue en 15 minutes environ. Le bateau ayant une vitesse de 5 noeuds, cela nous permettrait d'atteindre une résolution de 2.5 km entre deux profils de célérité, tout en couvrant une distance de 100 km en 11 h.

4.7 Localisation

4.7.1 Erreur constante sur le temps de propagation

Afin d'observer l'impact de la bathycélémétrie sur la localisation du flotteur, nous allons utiliser l'algorithme de géolocalisation pour différentes erreurs sur le temps de propagation de l'onde :

- Cas défavorable : on considère une erreur de 490 m, correspondant à l'erreur moyenne observée au niveau du Gulf Stream pour un profil mesuré tous les 50 km. Cela représente, en temps, une erreur e_{tp} de 327 ms.
- Cas favorable : on considère une erreur de 120 m, correspondant à l'erreur moyenne observée au large du Golfe de Gascogne pour une résolution d'un profil de célérité tous les 5 km. Cela représente, en temps, une erreur e_{tp} de 80 ms.

Les calculs sont effectués pour le déploiement de 3 sources (cf. figure 3.6 de la partie 3.3). Dans les deux cas, nous travaillons avec une dérive d'horloge de 26 ms et de 600 ms, correspondant respectivement à une horloge haut de gamme et une horloge bas de gamme. D'après les conclusions de la partie 3.3.1, si la dérive d'horloge $e_{\delta t}$ est supérieure ou du même ordre de grandeur que l'erreur e_{tp} , alors, l'amplitude de l'erreur finale de positionnement augmente fortement lorsque le flotteur est situé à l'extérieur des sources. C'est pourquoi la "zone de calcul" des rms et biais est limitée à l'intérieur des sources pour l'ensemble des résultats présentés dans le tableau 4.3.

e_{tp}	$e_{\delta t}$	RMS moyen	RMS max	biais moyen	biais max
80 ms	26 ms	70 m	83 m	-1 m	36 m
	600 ms	74 m	88 m	-1 m	34 m
327 ms	26 ms	284 m	332 m	6 m	130 m
	600 ms	303 m	383 m	-3 m	246 m

TABLE 4.3 – Erreurs sur la localisation du flotteur en configurations réalistes

Pour des flotteurs placés entre les sources, le rms ne varie que très peu en fonction de la dérive d'horloge.

Au vu des résultats, nous pouvons nous demander combien de sources seraient nécessaires dans les deux cas pour atteindre les précisions recherchées sur la localisation des flotteurs (tableau 4.4). On travaille ici avec le rms moyen et les calculs s'appuient sur la loi déterminée dans la partie 3.3.2 : l'amplitude de l'erreur décroît en racine carrée du nombre de sources.

Erreur finale acceptée	285m	100m	70m	50m	30m	10m
$e_{tp} = 80 \text{ ms}$	-	-	3	6	16	150
$e_{tp} = 327 \text{ ms}$	3	24	50	98	271	2437

TABLE 4.4 – Nombre de sources nécessaire suivant l'erreur acceptée

Le tableau 4.4 suggère donc qu'il est impossible d'obtenir une localisation des flotteurs à 10 m près avec les erreurs actuellement considérées sur les temps de propagation (supérieures ou égales à 80 ms).

4.7.2 Erreur variable selon la distance source-récepteur

Travailler avec une erreur e_{tp} constante ne fournit pas de résultats satisfaisants et ne nous permet pas d'exploiter au mieux notre connaissance des temps de propagation obtenue dans la partie précédente 4.6. En effet, en réalité, l'erreur e_{tp} varie selon la distance à la source et est moins importante à faible portée. C'est pourquoi, dans cette partie, nous distinguons différentes zones pour lesquelles l'erreur e_{tp} est variable. Dans l'exemple étudié dans la partie 4.6, au large du Golfe de Gascogne, nous pouvons, par exemple, définir trois zones distinctes suivant la distance source-récepteur (figure 4.23) :

- distance inférieure à 15 km : l'amplitude de l'erreur est faible, environ 7 ms (soit 10 m).
- distance entre 15 et 60 km : l'amplitude de l'erreur est d'environ 100 ms (soit 150 m).
- distance supérieure à 60 km : l'amplitude de l'erreur est importante : 330 ms (soit 500 m).

Ainsi, si au moins une source se situe assez près du récepteur, l'erreur sera plus faible et le poids de cette distance source-récepteur, dans la fonction de minimisation de l'algorithme de localisation, sera plus important que les distances aux autres sources. L'erreur sur la localisation s'en trouvera donc diminuée.

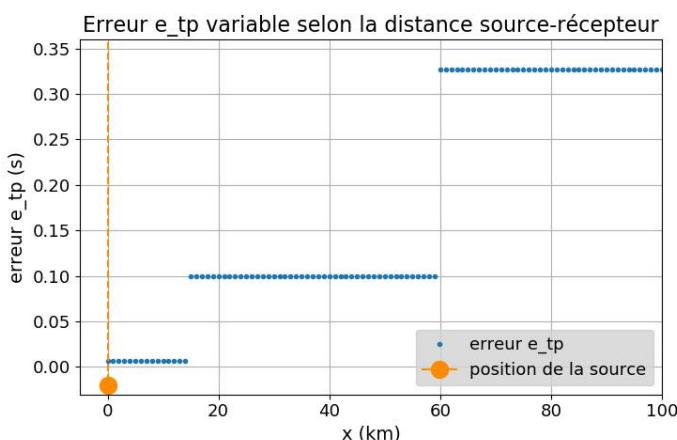


FIGURE 4.23 – Erreur e_{tp} variable en fonction de la distance source-récepteur

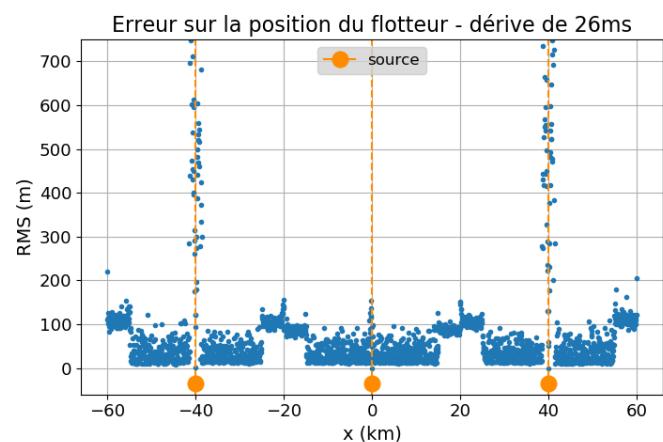


FIGURE 4.24 – Erreur finale sur la distance source-récepteur avec une erreur e_{tp} variable

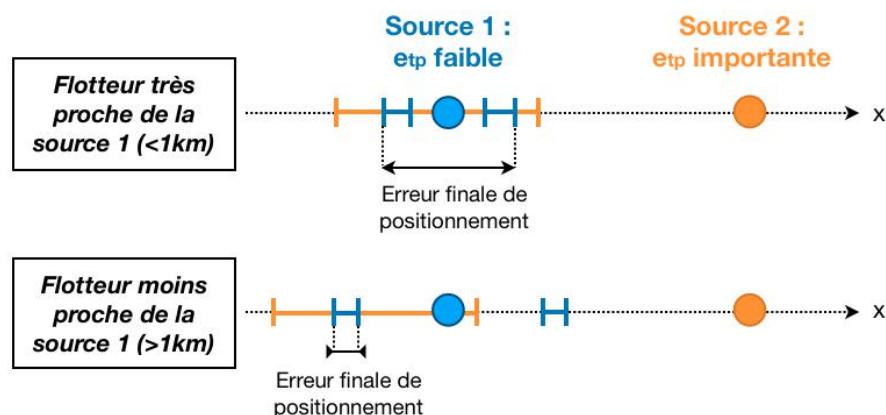


FIGURE 4.25 – Schéma explicatif des ambiguïtés de positionnement autour des sources

Les résultats présentés sur la figure 4.24 montrent bien une erreur de positionnement plus faible lorsque le récepteur est situé à moins de 15 km d'une source. Cependant, des augmentations de l'erreur ont lieu à proximité des sources, avec des valeurs atteignant 700 m. Ces augmentations reflètent une ambiguïté de positionnement due à la différence d'amplitude de l'erreur e_{tp} entre les sources (schéma de la figure 4.25). Les ambiguïtés apparaissent lorsque la distance entre le récepteur et la source la plus proche est inférieure à l'incertitude sur la distance entre le récepteur et la source la plus éloignée (1 km dans le cas présent). En dehors de ces zones d'ambiguïtés, pour une dérive d'horloge de 26 ms, le RMS moyen est de 52 m, contre 70 m minimum avec la méthode de la partie 4.7.1, considérant une erreur e_{tp} constante.

4.7.3 Utilisation d'une source mobile

Description

L'idée est ici de travailler, non plus avec plusieurs sources dérivantes et émettant quasi-simultanément, mais avec une seule source tractée émettant régulièrement. En effet, si la source émet toutes les 2 minutes pendant 1 h, alors cela pourrait revenir à avoir 30 sources.

Cependant, en 1 h, en considérant une vitesse moyenne de 10 cm/s, le flotteur se déplace de 360 m. Ce déplacement est significatif compte tenu de la précision de positionnement recherchée. La vitesse du flotteur doit donc être prise en compte dans l'algorithme de géolocalisation. Dans la nouvelle fonction de minimisation, les **variables connues** sont alors :

- \underline{x}_s^j : la position horizontale de la bouée de surface de la source à la $j^{\text{ème}}$ émission.
- t_e^j : le temps de la $j^{\text{ème}}$ émission de la source.
- \tilde{t}_r^j : le temps de réception, par le flotteur, du $j^{\text{ème}}$ signal.
- ϵ_j : détection du signal, $\epsilon_j = 1$ (détexion) ou 0 (pas de détection). Dans un soucis de simplicité, on considère $\epsilon_j = 1$ pour tous les exemples suivants.
- v_t : la vitesse du navire tractant la source, et donc, vitesse de la source, estimée à 2.5 m/s.

Une connaissance "parfaite" est supposée pour toutes les variables connues. Cela revient à considérer l'amplitude de leurs erreurs respectives comme négligeables. Les **variables inconnues**, quant à elles, sont :

- $\underline{x}(t_0)$: la position du flotteur à l'instant t_0 de la 1^{ère} émission de la source.
- v : la vitesse du flotteur, supposée constante durant l'ensemble des émissions de la source (1h dans notre cas).
- δt : l'offset sur l'horloge du flotteur, $\delta t = \tilde{t}_r^j - t_r^j$, où t_r^j est le temps exact de réception.
- $\delta \underline{x}^j$: le vecteur différence entre l'estimation de la position du transducteur (connaissant \underline{x}_s^j et v_t) et sa position réelle : $\delta \underline{x}^j = \tilde{\underline{x}}_t^j - \underline{x}_t^j$.
- $\delta t_p(\underline{x}^j, \underline{x}_t^j)$: la différence, à l'instant j , entre le temps de propagation source-récepteur réel ($\tilde{t}_r^j - \delta t - t_e^j$) et le temps de propagation estimé a priori $t_p(\underline{x}^j, \underline{x}_t^j)$. Par simplicité, on considère que le temps de propagation a priori dépend uniquement de la distance : $t_p(\underline{x}^j, \underline{x}_t^j) = t_p(\|\underline{x}^j - \underline{x}_t^j\|)$. Par exemple, en considérant une célérité a priori c_b , alors : $t_p(\underline{x}^j, \underline{x}_t^j) = \|\underline{x}^j - \underline{x}_t^j\|/c_b$.

Des estimations a priori pour $\underline{x}(t_0)$ et v sont fournies. On les considère toutes égales à 0 pour le moment : $\underline{x}_b = (\text{x}=0 \text{ km}, \text{y}=0 \text{ km})$ et $v_b = 0 \text{ m/s}$.

Les écarts-types correspondants aux erreurs sur $\underline{x}(t_0)$, v , δt et $\delta t_p(\underline{x}^j, \underline{x}_t^j)$ sont considérés comme connus et sont notés : e_x , e_v , $e_{\delta t}$ et e_{tp} . La fonction de minimisation s'écrit alors :

$$\begin{aligned} J(\underline{\mathbf{x}}(\mathbf{t}_0), \mathbf{v}, \delta \mathbf{t}) &= \frac{\|\underline{x}(t_0) - \underline{x}_b\|^2}{e_x^2} + \frac{\|v - v_b\|^2}{e_v^2} + \frac{\|\delta t\|^2}{e_{\delta t}^2} + \sum_j \epsilon_j \times \frac{\delta t(\underline{x}^j, \underline{x}_t^j)^2}{e_{tp}^2} \\ &= \frac{\|\underline{x}(t_0) - \underline{x}_b\|^2}{e_x^2} + \frac{\|v - v_b\|^2}{e_v^2} + \frac{\|\delta t\|^2}{e_{\delta t}^2} + \sum_j \epsilon_j \times \frac{[\tilde{t}_r^j - \delta t - t_e^j - t_p(\underline{x}^j, \underline{x}_t^j)]^2}{e_{tp}^2} \end{aligned}$$

$$\text{avec } \underline{x}^j = \underline{x}(t_0) + v(\tilde{t}_r^j - \delta t) \quad \text{et} \quad \underline{x}_t^j = \underline{x}_t + v_t(t_e^j)$$

Ainsi, connaissant $\underline{x}(t_0)$ et v , nous pouvons en déduire \underline{x} à tous les instants t : $x(t) = x(t_0) + v \times t$.

Résultats

Le résultat de ce travail sur la source mobile nous a montré qu'il existe un certain nombre d'ambiguïtés à lever afin d'obtenir une localisation correcte.

La première ambiguïté est présente même en l'absence de dérive d'horloge. En effet, deux minima locaux existent dans la fonction de minimisation. Le premier minimum correspond à la position et la vitesse réelles du flotteur. Le deuxième minimum local, quant à lui, est situé à la position symétrique de position réelle du flotteur par rapport à la source. Ainsi, la distance source-flotteur est la même pour les deux solutions proposées et permet, dans les deux cas, de minimiser la fonction. Afin de conserver cette même distance entre les deux solutions, la vitesse du flotteur (v_2) de la deuxième solution est alors définie telle que : $v_2 = 2v_t - v_1$ avec v_t la vitesse de la source et v_1 la vitesse réelle du flotteur définie par la 1ère solution (figure 4.26). Cette vitesse v_2 , quasiment égale au double de la vitesse de la source (soit ici 5m/s), est une valeur irréaliste de courant marin.

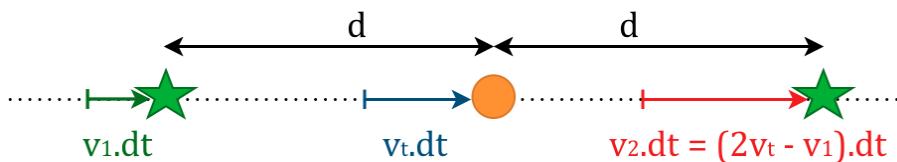


FIGURE 4.26 – Schéma des deux positions et vitesses estimées du flotteur pour une source mobile

Pour lever l'ambiguïté sur les deux solutions proposées, il suffit de fixer une estimation a priori de la position (x_0) assez proche de chacun des minima (en définissant $x_0 = x_s^0 \pm c(\tilde{t}_r^0 - t_e^0)$). On calcule alors une minimisation pour chacun des deux x_0 fixés. La valeur de minimisation la plus faible correspond à la solution correcte. L'ambiguïté est levée.

Une deuxième ambiguïté peut, quant à elle, apparaître lorsque la dérive d'horloge et l'incertitude sur la vitesse du récepteur augmentent. Nous travaillons ici avec un flotteur dont la position réelle est $x = 5$ km. Les histogrammes de la figure 4.27 présentent chacun les résultats de 100 simulations de positionnement pour cinq vitesses de récepteur. Selon les figures, l'amplitude de la dérive d'horloge ainsi que son incertitude associée varient. L'erreur e_{tp} sur le temps de propagation est fixée à 7 ms.

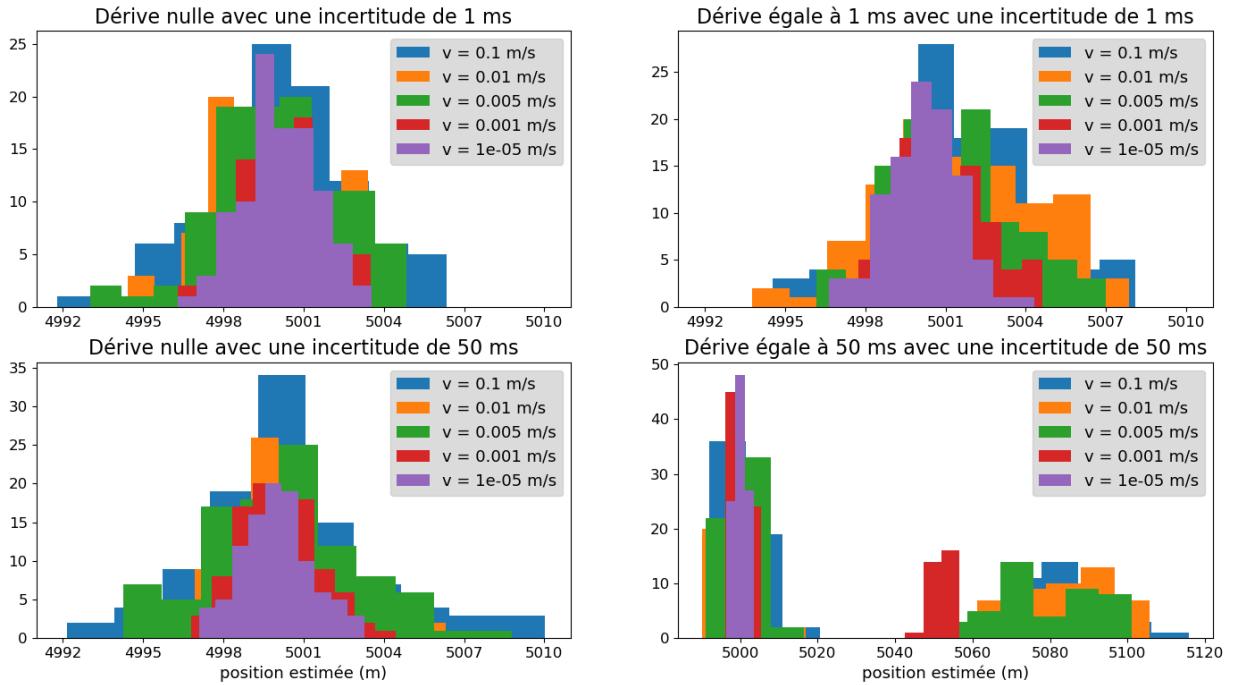


FIGURE 4.27 – Histogrammes des positions du flotteur estimées par l’algorithme de géolocalisation

A partir d’une certaine valeur de dérive et d’incertitude associée (ici 50 ms avec une incertitude de 50 ms), et d’une certaine vitesse de flotteur (ici 1 mm/s), une ambiguïté apparaît (quatrième graphe de la figure 4.27). Deux positions sont possibles : la première aux alentours de 5000 m correspondant à la position réelle du flotteur, et une deuxième à 5080 m. Concernant la vitesse, les résultats sont similaires et une ambiguïté entre deux valeurs distinctes apparaît.

Afin de résoudre cette deuxième ambiguïté, il est peut-être nécessaire d’apporter des informations supplémentaires pour la résolution de la minimisation. En effet, les difficultés posées par la combinaison d’une dérive d’horloge et d’un déplacement du récepteur ont déjà été identifiées par Jinwang Yi dans ses travaux [33]. Dans son cas, le problème est modéré par une connaissance supplémentaire de la vitesse du récepteur grâce à une centrale inertie. Pour le projet Cognac, compte tenu du budget disponible pour la réalisation d’un flotteur, nous ne pouvons pas nous permettre de travailler avec une centrale inertie. Une autre solution devra donc être apportée.

En définitive, les résultats actuellement obtenus en travaillant uniquement avec une source mobile seule ne sont pas satisfaisants. Cependant, en levant les ambiguïtés sur les solutions de la minimisation, cette technique de source mobile pourrait s’avérer utile et fournir des résultats d’une précision supérieure à ceux obtenus avec des sources dérivantes. De plus, l’utilisation d’une source mobile en complément d’autres sources dérivantes pourrait être un atout additionnel. En effet, dans ce cas, à chaque émission, la source mobile est considérée comme une source dérivante pour laquelle la vitesse du flotteur n’est plus à prendre en compte. L’addition de cette nouvelle source mobile nous permettrait de maîtriser la géométrie de déploiement des sources et donc de se placer plus facilement dans des configurations idéales pour lesquelles l’ensemble des flotteurs sont situées “à l’intérieur des sources”, là où l’erreur finale de positionnement est minimale. Cependant, ce système imposerait évidemment une contrainte sur les déplacements du navire, ce qui pourrait impacter d’autres activités de collecte de mesures.

Chapitre 5

Synthèse générale et perspectives

Conclusion

L'objectif principal de cette étude était la validation, d'un point de vue acoustique, du concept expérimental du projet Cognac. Pour cela, nous souhaitions établir un budget d'erreur sur la localisation des flotteurs dérivants. Nous avons donc créé une méthode de géolocalisation adaptée aux besoins du projet Cognac et prenant en compte les différentes sources d'erreurs liées à la propagation acoustique en milieu sous-marin.

L'étude en milieu isocélère a permis de conclure que des distances de l'ordre de 100 km seraient atteignables sur le seul critère du rapport signal sur bruit. De plus, les erreurs instrumentales ne sont pas limitantes pour le projet, mise à part la dérive d'horloge. En effet, lorsque le flotteur est placé à l'extérieur des sources, l'erreur de positionnement devient très importante notamment avec une horloge bas de gamme. Cependant, en milieu isocélère, si le flotteur est situé entre les sources, l'erreur finale sur la localisation est de l'ordre du mètre, ce qui est satisfaisant compte tenu des objectifs de départ. De plus, nous avons montré que cette erreur diminue proportionnellement à la racine carrée du nombre de sources utilisées.

Afin de travailler dans un cas d'étude réaliste, nous nous sommes ensuite placés dans des zones d'intérêt pour le projet, c'est à dire des zones énergétiques, comme par exemple aux alentours du Gulf Stream. L'étude a alors montré que l'approche de la célérité équivalente (généralement appliquée pour les systèmes de positionnement acoustique sous-marins) ne permet pas d'obtenir les précisions de localisation recherchées pour ce projet. Cela impose donc un passage au calcul exact de la propagation réfractée, avec les nombreuses difficultés que cela engendre. Le mode de détection du signal doit être choisi afin de gérer au mieux les trajets multiples. De plus, suivant le champ de célérité, des zones d'ombres apparaissent au sein desquelles il nous est difficile, sans connaissance de la bathymétrie, d'estimer précisément les distances source-récepteur. Ces zones d'ombres peuvent cependant être réduites en adaptant la profondeur de source, ainsi que le nombre et la distribution spatiale des sources.

En outre, l'erreur prédominante dépendra surtout de la résolution spatiale de notre connaissance a priori du champ de célérité. Mieux le champ de célérité sera connu, moins les erreurs de localisation des flotteurs seront importantes. Afin d'obtenir des erreurs raisonnables, de l'ordre de la cinquantaine de mètres, la résolution de notre connaissance de la célérité doit être inférieure à 5 km. Il s'agit donc de déterminer la méthode la plus adaptée afin d'obtenir la meilleure résolution possible (poisson remorqué par exemple). Cependant, si la résolution recherchée ne

s'avère pas atteignable par des méthodes et moyens de mesures existants, on se heurterait ici aux limitations des performances de la localisation par acoustique, incompatibles avec les attentes du projet en terme d'échelle spatiale et de précision.

Finalement, nous avons envisagé la possibilité de travailler avec une source mobile (tractée par un navire) plutôt que plusieurs sources dérivantes. Cependant, notre algorithme de localisation actuel ne permet pas d'obtenir une précision de localisation satisfaisante lorsque la dérive d'horloge et le déplacement du récepteur sont combinés. Ainsi, l'utilisation d'une source mobile seule semble compromise. Cependant, une source mobile utilisée en complément des sources dérivantes pourrait s'avérer être un réel atout afin de maîtriser la géométrie de déploiement des sources et ainsi minimiser les erreurs de localisation.

Perspectives

Sur l'ensemble de l'étude, les calculs de géolocalisation ont été effectués uniquement en monodimensionnel afin de faciliter la compréhension des phénomènes. Il est maintenant envisageable, pour la suite, de travailler en 2D et ainsi observer l'effet des différentes configurations de déploiement possibles des sources : nombre de sources, distance entre 2 sources, ou encore géométrie du déploiement.

Le choix de l'horloge du flotteur, quant à lui, va s'avérer être une des études prioritaires pour la suite du projet. Il s'agira alors de trouver le meilleur compromis entre précision et coût. Ainsi, est-il vraiment essentiel d'avoir une horloge à très faible dérive ? Peut-on s'assurer que les flotteurs seront toujours encadrés par les sources afin de limiter l'effet de la dérive ? Pour répondre à ces différentes questions, des modélisations de la dynamique des sources et flotteurs dans les zones d'intérêt pourraient être utiles.

De plus, certaines mesures étant prévues en Méditerranée, il serait aussi intéressant de s'appuyer sur des sorties de simulations numériques de cette zone afin d'estimer les erreurs de propagation et de localisation, comme nous l'avons fait aux alentours du Gulf Stream ou encore au large du Golfe de Gascogne.

Finalement, concernant la résolution du champ de célérité nécessaire, plusieurs questions doivent être posées : Pouvons-nous nous permettre d'établir des profils de célérité seulement sur une couche de surface ou faut-il absolument travailler sur l'ensemble de la colonne d'eau ? Un poisson remorqué, dont la profondeur maximale est de 500 m, pourrait-il être utilisé ? Une étude poussée sera nécessaire afin de répondre à ces questions. La méthode choisie et la résolution atteignable seront déterminantes sur le budget d'erreur final de localisation, ainsi que sur l'ajustement ou non du cahier des charges en terme d'échelle spatiale et de précision de localisation.

Annexe A

Impact environnemental

Il est aujourd’hui prouvé que les émissions sonores d’origine anthropiques sont susceptibles d’avoir un impact négatif sur la faune sous-marine. Nous cherchons donc à étudier l’impact environnemental du projet Cognac. Ce projet ne se déroulant pas en milieu côtier, à proximité de zones de pêche, nous n’étudierons pas l’impact du bruit sur les poissons ou encore les crustacés. Nous nous concentrons donc ici essentiellement sur les mammifères marins qui se servent des sons pour communiquer, se nourrir, ou encore se localiser.

La source utilisée lors du projet Cognac émet à la fréquence de 3 kHz, à un niveau de 185 dB pendant 1 seconde, toutes les 1 à 2 minutes. Le projet se déroule sur une durée de 30 jours maximum. Les mammifères alors impactés à la fréquence de 3 kHz sont [3] :

- **Les cétacés moyenne fréquence** comme les dauphins, les baleines à dents ou encore les baleines à bec. Leur gamme fonctionnelle (fréquences leur servant à se repérer et à communiquer) se situe entre 150 Hz et 160 kHz.
- **Les pinnipèdes** comme les otaries, les phoques ou encore les morses. Leur gamme fonctionnelle est comprise entre 75 Hz et 75 kHz.
- **Les cétacés basse fréquence** comme les baleines à fanons (ou mysticètes), peuvent éventuellement eux aussi être impactés car leur gamme d’écoute est située entre 20 Hz et 2 kHz. Avec une fréquence à 3 kHz, nous sommes donc à la limite de cette gamme d’écoute.

En fonction des caractéristiques du son émis et de la distance de l’animal par rapport à la source, les effets sur les mammifères peuvent être divers. Différentes zones d’impact sont définies ci-dessous :

- **La zone d’audibilité** : l’animal détecte le son. Dans notre cas, cette zone peut atteindre un rayon de 80 km autour de la source, pour les cétacés moyenne fréquence.
- **La zone de masquage des communications** : le bruit interfère avec des signaux d’intérêt pour l’animal.
- **La zone de réactivité** : un changement de comportement est observé chez l’animal dû à la réception du signal.
- **La zone de traumatisme** : lorsque l’animal est très proche de la source (de l’ordre de la dizaine de mètres), le son peut alors provoquer des lésions auditives temporaires ou définitives. Ces lésions peuvent aller jusqu’à entraîner la mort de l’animal.

Nous nous intéressons ici aux seuils d'émission induisant des réactions comportementales et pertes temporaires d'audition chez les mammifères cités précédemment (tableau A.1). Les seuils présentés sont des niveaux d'exposition SEL (Sound Exposure Level), exprimés en dB re. $1 \mu Pa^2 s$. Comme nous travaillons sur des signaux d'une durée d'une seconde, nous pouvons directement comparer le niveau de la source (185 dB) aux seuils présentés dans le tableau :

Groupe taxonomique	Réactions comportementales	Perte d'audition temporaire
Cétacés basse fréquence	183	198
Cétacés moyenne fréquence	183	198
Pinnipèdes	171	186

TABLE A.1 – Seuils d'émissions induisant des pertes temporaires d'audition et des réponses comportementales chez les mammifères marins. D'après [3]. Seuils issus de [26] et [17].

Concernant les réactions comportementales des mammifères, le niveau d'émission de la source est légèrement supérieur aux seuils fixés dans le tableau A.1. Notons alors qu'il s'agit de niveaux calculés à seulement 1 m de la source et que, bien évidemment, les mammifères concernés ne seront jamais aussi près de la source en réalité. De plus, en cas de gêne, la réaction de ces animaux est la fuite. Cette fuite ne causera pas de problèmes dans notre cas. En effet, la durée du projet est courte (quelques jours) et ne perturbera pas les populations sur le long terme. De plus, le projet a lieu en hauturier, nous ne rencontrerons donc pas de populations résidentes, sur des aires d'intérêt restreintes (d'alimentation, de reproduction et de mise bas), comme c'est parfois le cas en côtier. Les mammifères peuvent donc se déplacer de quelques centaines de mètres, le temps du projet, sans être perturbés.

Les seuils de perte d'audition, quant à eux, sont supérieurs au niveau d'émission de la source du projet Cognac. Il n'y a donc aucun risque à ce niveau là.

En définitive, la réalisation du projet Cognac n'aura pas d'impact significatif sur les populations présentes dans la zone d'étude.

Annexe B

Bruit ambiant : Modèle de Wenz

Le spectre de Wenz (figure B.1) est un modèle empirique fournissant les spectres sonores moyens des bruits ambients mesurés dans l'océan en l'absence de sources sonores individualisables [32]. Il comprend une première composante associée au bruit dû au trafic maritime et une seconde composante due à l'agitation de surface sous l'effet du vent. Ce spectre est utilisé comme référence pour prévoir le bruit ambiant sous-marin.

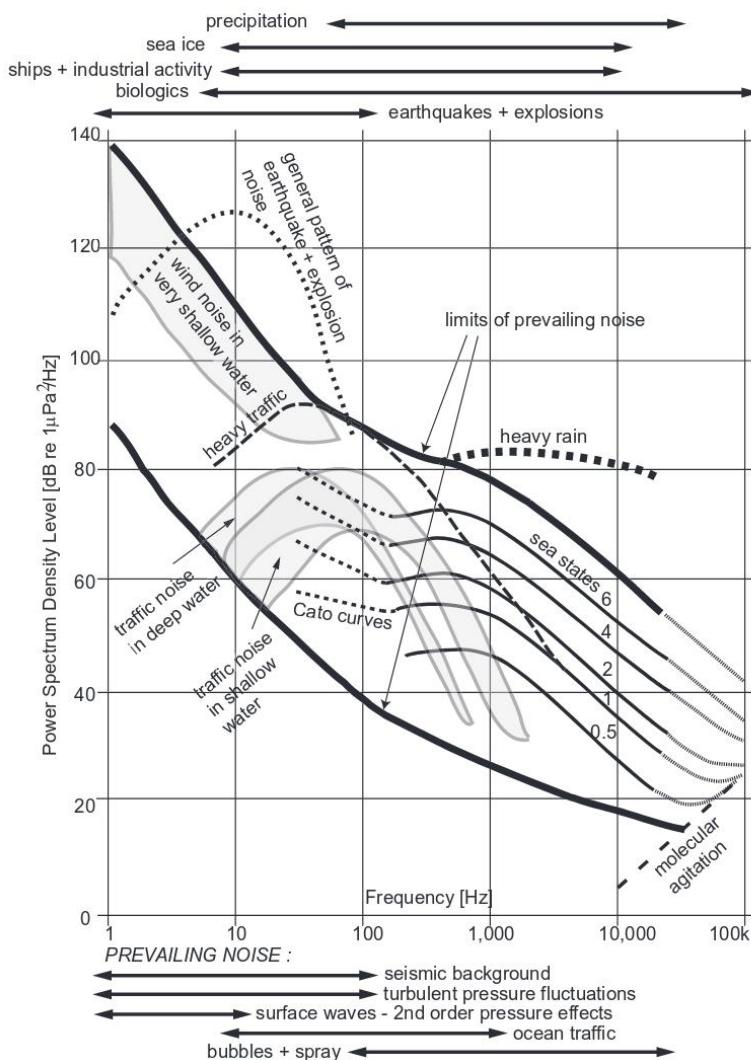


FIGURE B.1 – Spectres de bruit ambiant [5]

Annexe C

Paramètres des modélisations Bellhop

Afin de lancer les simulations Bellhop, un fichier environnement contenant tous les paramètres nécessaires doit être fourni. Ainsi, pour l'ensemble de nos modélisations, les paramètres suivants ont été utilisés.

C.1 Paramétrage de la source et des récepteurs

La fréquence d'émission de la source est de 3 kHz. La profondeur de la source est fixée à 100 m. En effet, comme expliqué dans la partie 4.3, il s'agit de la profondeur optimale. Il s'agit ensuite de choisir les profondeurs et distances (par rapport à la source) des différents récepteurs étudiés. Attention, il est important de limiter le nombre de récepteurs. En effet, pour une simulation donnée, seules 20.10^6 arrivées, au total, peuvent être enregistrées, et cela afin de ne pas saturer l'espace mémoire. Ainsi, le nombre d'arrivées dédié à chacun des récepteurs calculé dans l'exécutable Bellhop est tel que :

$$N_{arr} = \max \left(\frac{20.10^6}{N_{recepteurs}}, 10 \right) \quad (\text{C.1})$$

Avec un trop grand nombre de récepteurs, seules les 10 arrivées de plus forte amplitude seront retenues pour chaque récepteur. Ces données ne seront donc pas exploitables. Il est important de pouvoir obtenir au minimum 100 ou 200 arrivées par récepteur, ce qui limite le nombre de récepteurs à environ 100 000.

C.2 Interfaces air et fond

La surface de l'océan est considérée comme étant du vide (option 'V'). Le fond, quant à lui, est modélisé comme étant un semi espace acousto-élastique où l'on considère la célérité égale à 1600 m/s, avec une densité de 1.8 g/cm³ et un coefficient d'absorption $\alpha = 0.8 \text{ dB}/\lambda$. Ces paramètres sont ceux du sable fin.

C.3 Hypothèses de calculs

Nous travaillons en faisceaux gaussiens [22]. L'interpolation du ou des profil(s) de célérité étudié(s) est l'interpolation spline cubique (option 'S') lorsque nous travaillons avec un unique profil sur toute la zone d'étude. Lorsque nous travaillons avec un champ de célérité dépendant de la distance à la source, nous utilisons l'interpolation quadri-linéaire (option 'Q'). Les pertes

par absorption sont calculées en décibels par longueur d'onde λ (option 'W'), en utilisant la formule d'atténuation de Thorp (option 'T'). Il s'agit d'un modèle de pertes simplifié pour les basses fréquences (<50 kHz) : $\alpha = (\frac{0.11}{1+f^2} + \frac{44}{4100+f^2})f^2$ avec f la fréquence en kHz [28].

C.4 Eviter les instabilités numériques

Afin d'éviter toute instabilité numérique, le pas de calcul horizontal du tracé de rayon doit être fixé manuellement. Sans précision de la part de l'utilisateur, Bellhop utilise un pas par défaut. Dans notre cas, nous nous sommes rendus compte de la présence d'instabilités numériques engendrant de fortes erreurs sur les calculs de rayons (figure C.1).

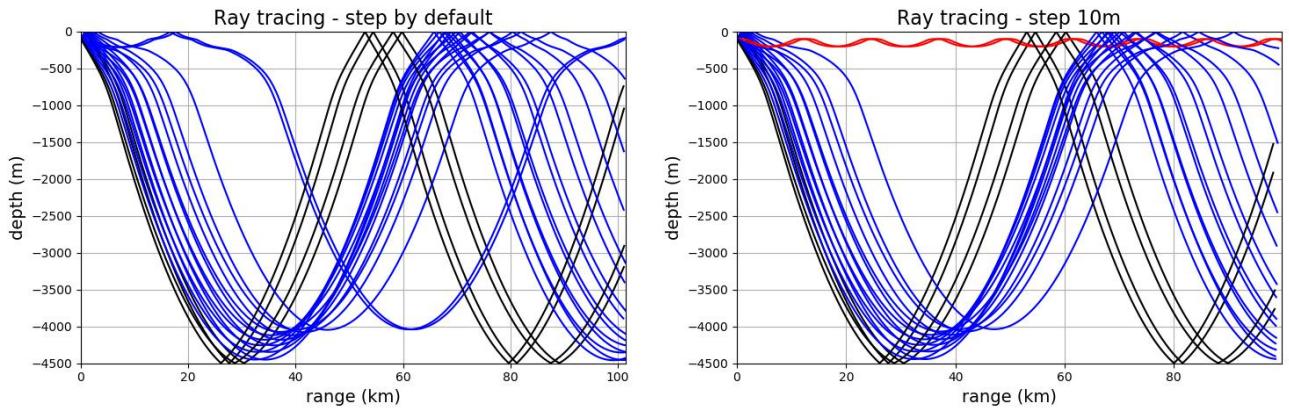


FIGURE C.1 – Tracés de rayons avec deux pas de calcul différents

Un mauvais calcul de rayons engendre évidemment des erreurs importantes sur le temps d'arrivée calculé du signal. La figure C.2 représente les différences de temps d'arrivées entre une modélisation effectuée avec un pas de calcul par défaut (492 m) et une seconde modélisation avec un pas fixé à 10 m. Environ 5 % des données calculées avec le pas par défaut ont une erreur sur le temps d'arrivée supérieure à 10 ms. Cela représente alors une erreur en distance d'environ 15 m, ce qui n'est pas négligeable. De plus, les erreurs atteignent ici jusqu'à 1.8 s, soit une erreur en distance de 2700 m. Pour éviter cela, nous fixons donc manuellement le pas de calcul, tout en prenant en compte le fait que plus celui-ci est faible, plus les temps de calculs sont longs. Finalement, choisir un pas aux alentours de 10 m semble être un bon compromis.

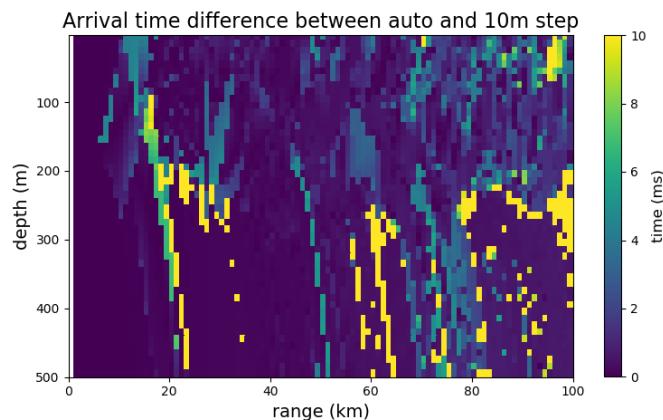


FIGURE C.2 – Impact des instabilités numériques sur le temps d'arrivée du signal

Annexe D

Cartes des zones d'études en Atlantique

Les figures suivantes présentent les cartes de température de surface des zones étudiées :

- La première carte (figure D.1) se situe en Atlantique Nord-Ouest au niveau du courant du Gulf Stream.
- La deuxième carte (figure D.2) représente l'ensemble de l'Atlantique Nord.

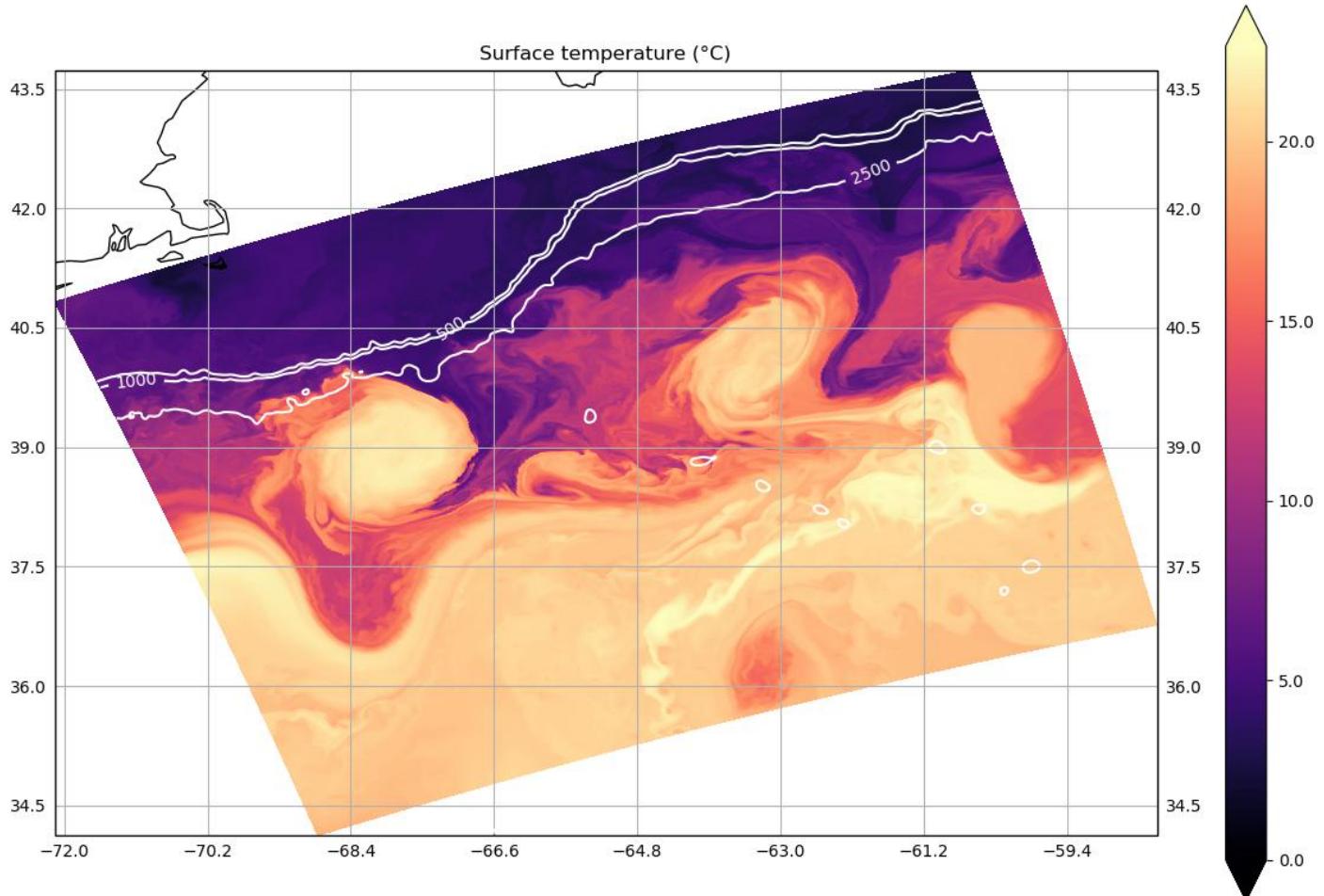


FIGURE D.1 – Zone d'étude au niveau du Gulf Stream

Pour les deux cartes D.1 et D.2, les latitudes et longitudes sont exprimées en degrés décimaux. Les variations de température de surface nous informent sur la nature de la zone : énergétique ou non. Sur la première carte (figure D.1), zone très énergétique, nous observons des tourbillons formés en marge du Gulf Stream.

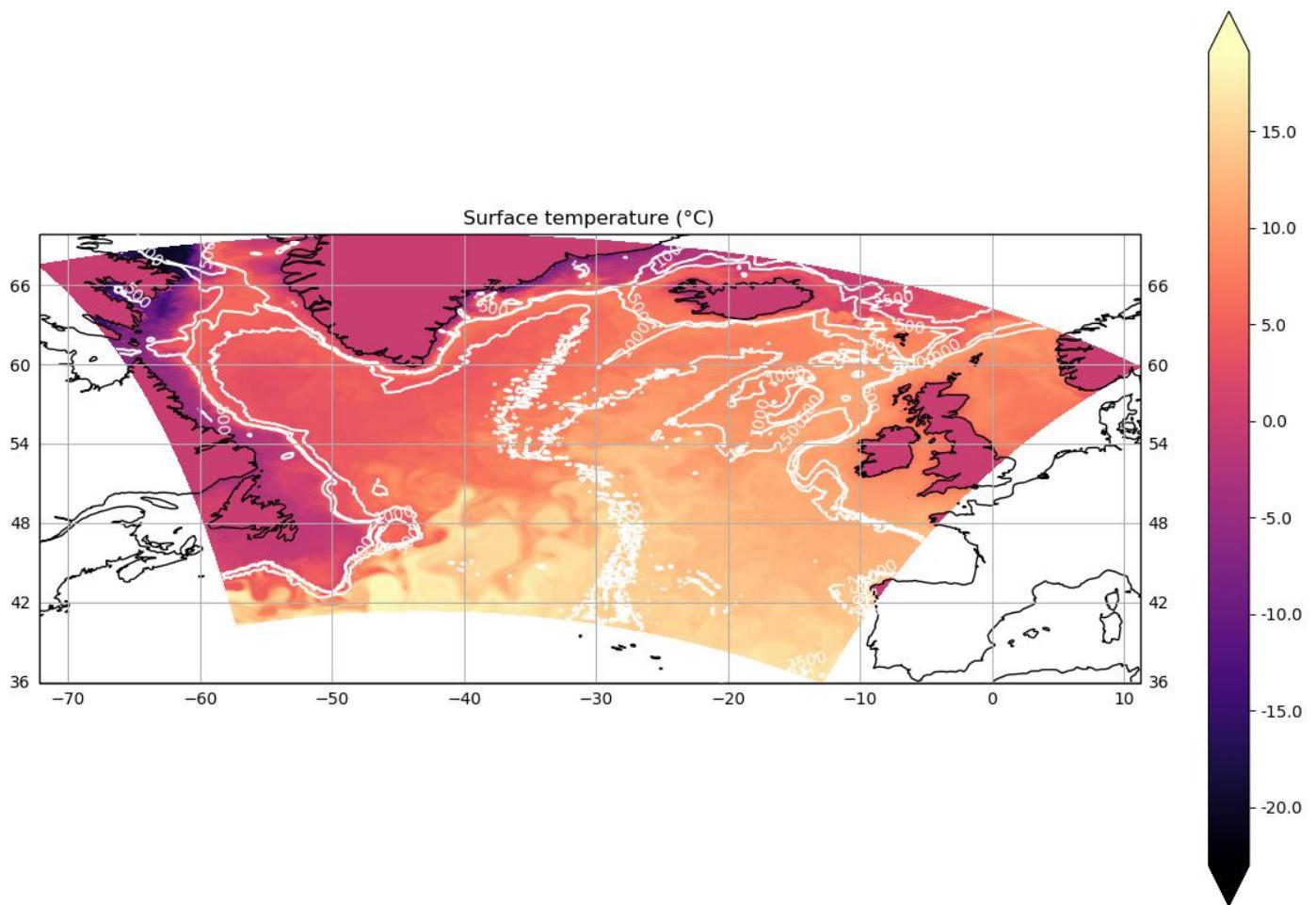


FIGURE D.2 – Zone d'étude d'Atlantique Nord

Annexe E

Analyses des séquences reçues pour l'ensemble des profils étudiés

Afin de compléter la partie 4.3, voici les résultats des modélisations Bellhop pour l'ensemble des profils de Méditerranée. Les tracés de rayons sont réalisés sur l'ensemble de la colonne d'eau (2000 m), tandis que les pertes par propagation sont présentées uniquement sur les 500 premiers mètres de profondeur.

E.1 Profil n°1 : thermocline à 60 m

Pour une source placée à 20 m de profondeur (figure E.1), nous observons un chenal de surface sur 30 m de profondeur. D'importantes zones d'ombres sont visibles jusqu'à 600 m de profondeur sur les zones 0-25 km et 40-50 km.

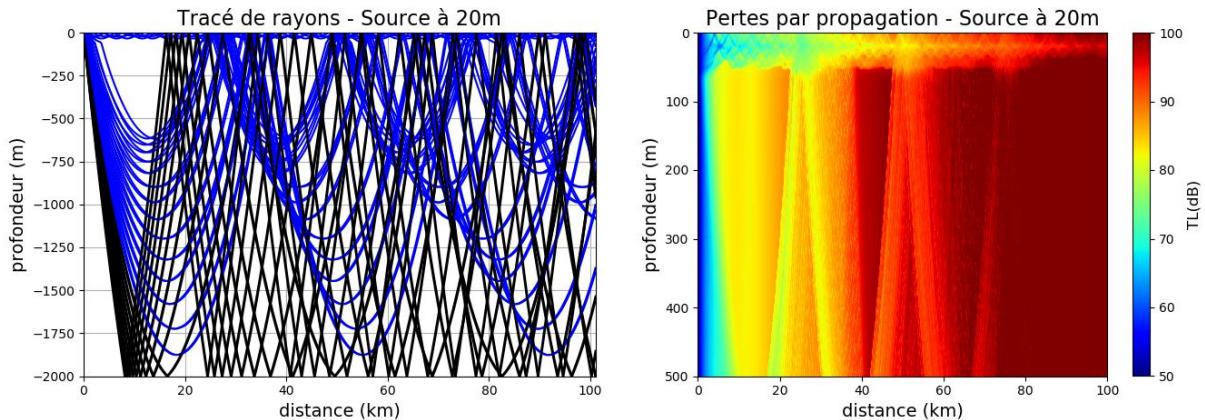


FIGURE E.1 – Tracés de rayons et pertes par propagation pour le profil n°1 - source à 20 m

Si l'on place la source à 70 m (figure E.2), soit 10 m sous la thermocline, les rayons sont réfractés sous la barre des 60 m. Il n'y a aucune zone d'ombre entre 100 et 500 m de profondeur, là où se trouvent les flotteurs.

Ainsi, dans le cas du profil n°1, si l'on souhaite travailler avec un flotteur compris entre 100 et 500 m de profondeur, il faut placer la source sous la thermocline.

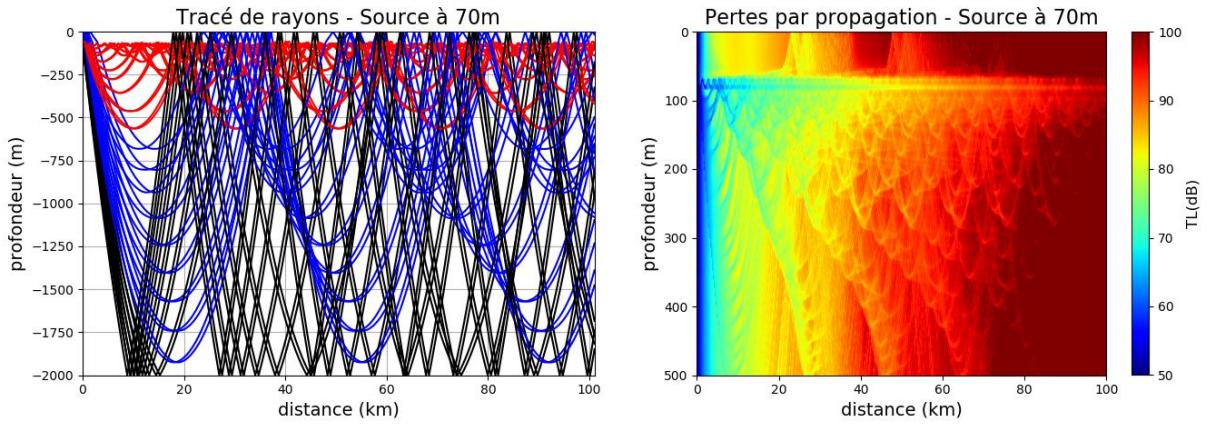


FIGURE E.2 – Tracés de rayons et pertes par propagation pour le profil n°1 - source à 70 m

E.2 Profil n°2 : profil d'hiver

Le profil n°2 ne comporte pas de thermocline, la célérité ne cesse d'augmenter avec la profondeur. Ainsi, la profondeur de la source influe peu et les résultats présentés pour une source à 50 m (figure E.3) sont similaires à ceux obtenus avec toutes les autres profondeurs de sources. Nous n'observons pas de zones d'ombre entre 100 et 500 m de profondeur.

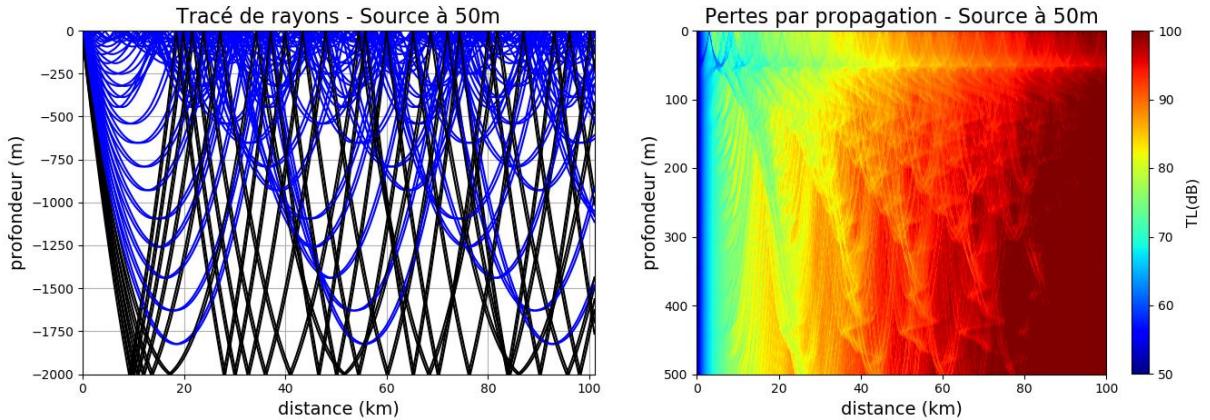


FIGURE E.3 – Tracés de rayons et pertes par propagation pour le profil n°2 - source à 50 m

E.3 Profil n°3 : thermocline à 20 m

Les figures correspondant au profil de célérité n°3 sont présentées dans la partie 4.3. La conclusion est la même que pour le profil n°1 : la source doit être placée sous la thermocline pour éviter les zones d'ombres entre 100 et 500 m de profondeur.

E.4 Profil n°4 : profil de fin d'été

Le profil n°4 correspond à un profil de fin d'été avec une température de surface très élevée (23°C) qui décroît rapidement (-6°C entre 0 et 15 m). Le minimum de célérité se trouve aux alentours de 50 m. Au delà, le gradient de célérité devient positif.

Si la source est placée à 20 m (figure E.4), nous observons une importante zone d'ombre sur les 25 premiers km sur 500 m de profondeur. Cependant, si la source est placée à 60 m de profondeur, cette zone d'ombre disparaît (figure E.5).

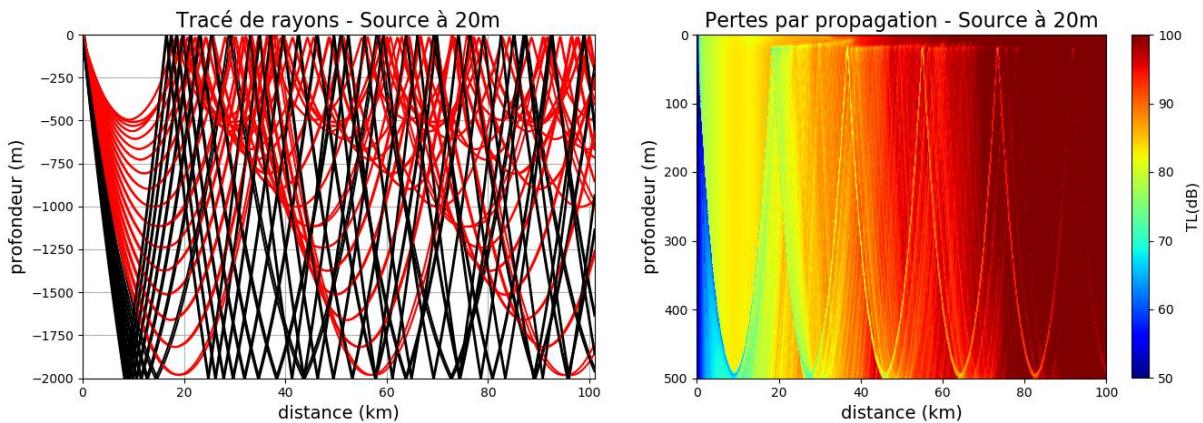


FIGURE E.4 – Tracés de rayons et pertes par propagation pour le profil n°4 - source à 20 m

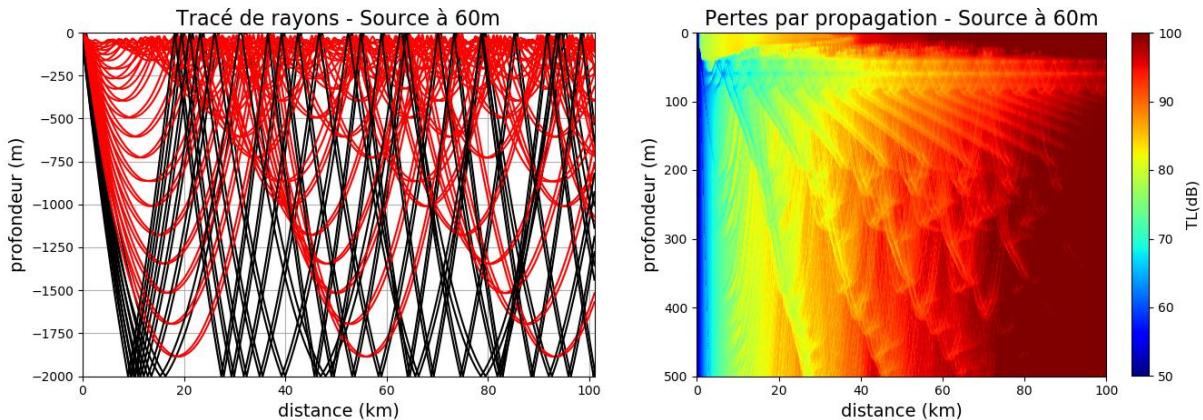


FIGURE E.5 – Tracés de rayons et pertes par propagation pour le profil n°4 - source à 60 m

En définitive, quel que soit le profil étudié, la source doit être placée en dessous de la thermocline s'il y en a une, ou bien en dessous de la profondeur à laquelle le gradient de célérité s'inverse.

Annexe F

Choix de la méthode de détection pour les différents profils

Afin de choisir la méthode de détection la plus adaptée à chaque profil de célérité étudié, nous avons tracé, dans chaque cas, 20 réponses impulsionales réparties en distances et profondeurs. Les conclusions sont les suivantes :

- Méditerranée profils n°1 et n°3 (figures F.3 et F.5) : Ces deux cas sont similaires (avec une thermocline) et une détection de la première arrivée semble être la mieux adaptée.
- Méditerranée profil n°2 (figure F.4) : Cette configuration est typique d'un profil isotherme. La première arrivée et le maximum d'amplitude sont des rayons réfractés (bleus) dont nous connaissons la trajectoire. La première arrivée correspond au trajet le plus long ayant subi le plus de réflexions sur la surface. Le maximum d'amplitude, quant à lui, correspond au dernier rayon réfracté, ayant parcouru le trajet le plus direct. Les deux méthodes de détection sont donc complémentaires dans ce cas.
- Méditerranée profil n°4 (figure F.6) : Dans la majorité des vignettes, la première arrivée et le maximum d'amplitude sont des rayons directs (rouges). Les deux méthodes de détection peuvent alors être utilisées.
- Gulf Stream profils n°1 et 2 : Dans les deux cas, une détection de la première arrivée semble mieux adaptée. Cependant, dans les zones d'ombres, la première arrivée est un rayon réfléchi et, dans cette situation, les résultats ne seront pas exploitables.

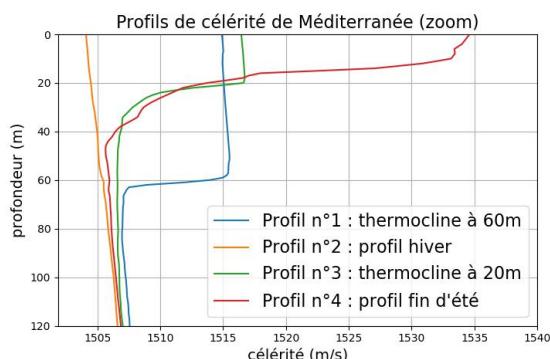


FIGURE F.1 – Profils de Méditerranée

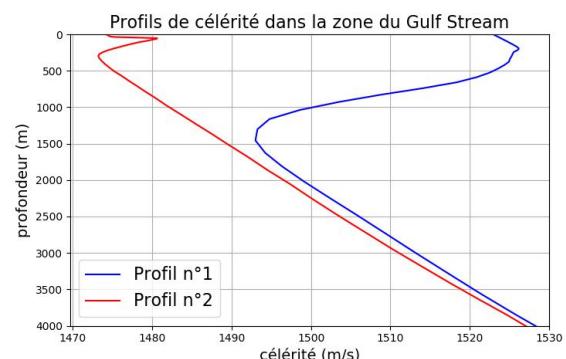


FIGURE F.2 – Profils - Zone du Gulf Stream

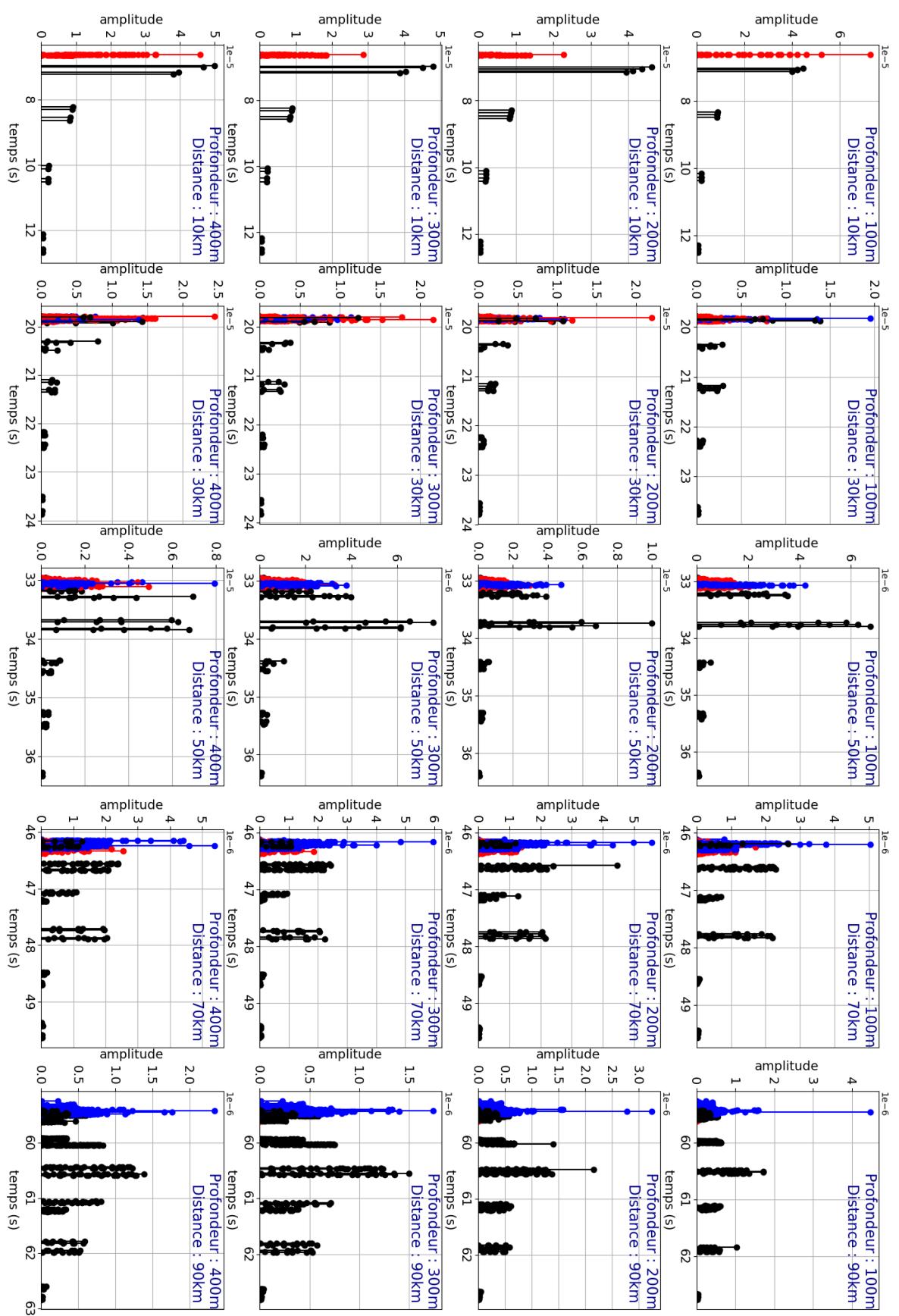


FIGURE F.3 – Réponses impulsionnelles - Profil n°1 Méditerranée

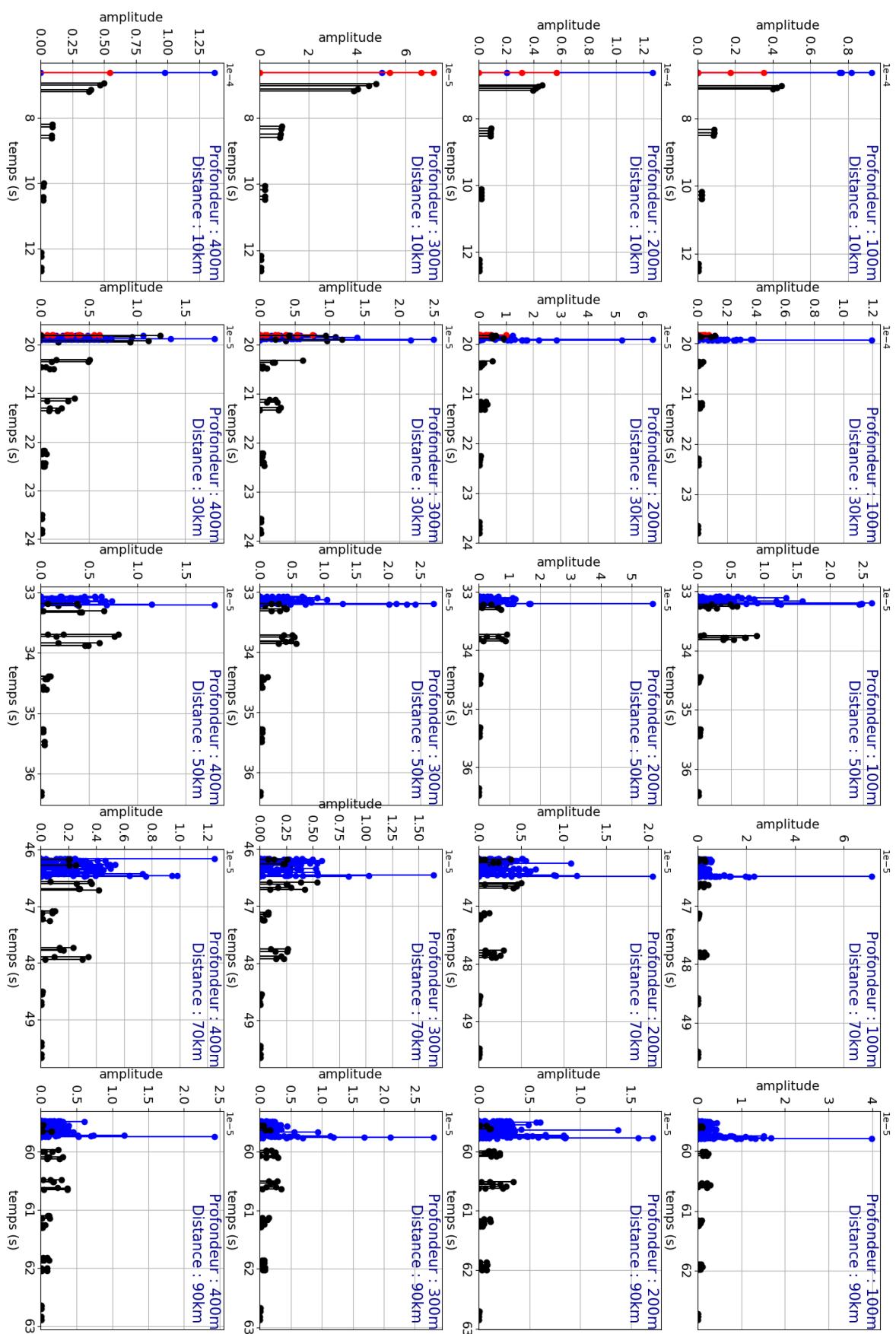


FIGURE F.4 – Réponses impulsionales - Profil n°2 Méditerranée

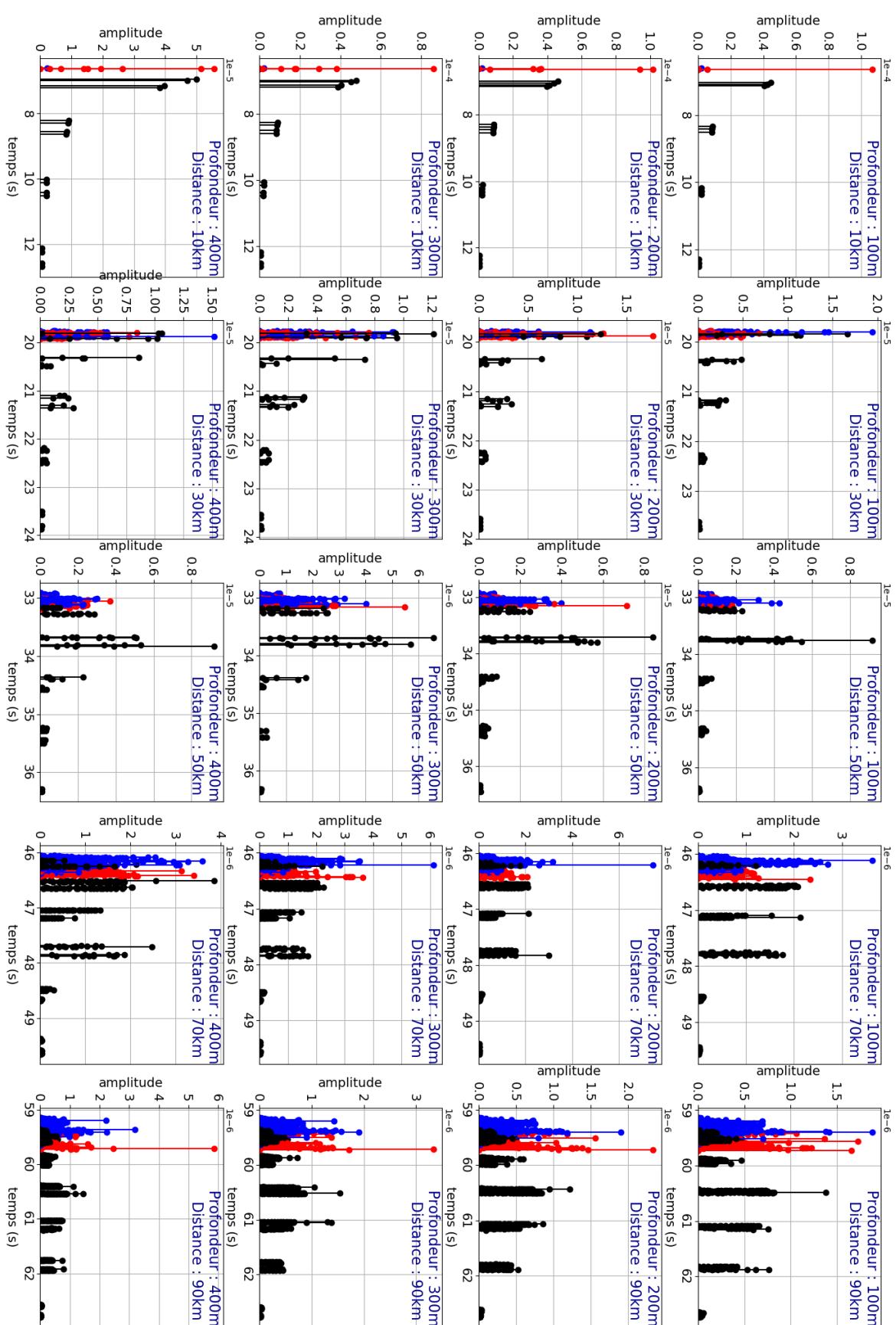


FIGURE F.5 – Réponses impulsionnelles - Profil n°3 Méditerranée

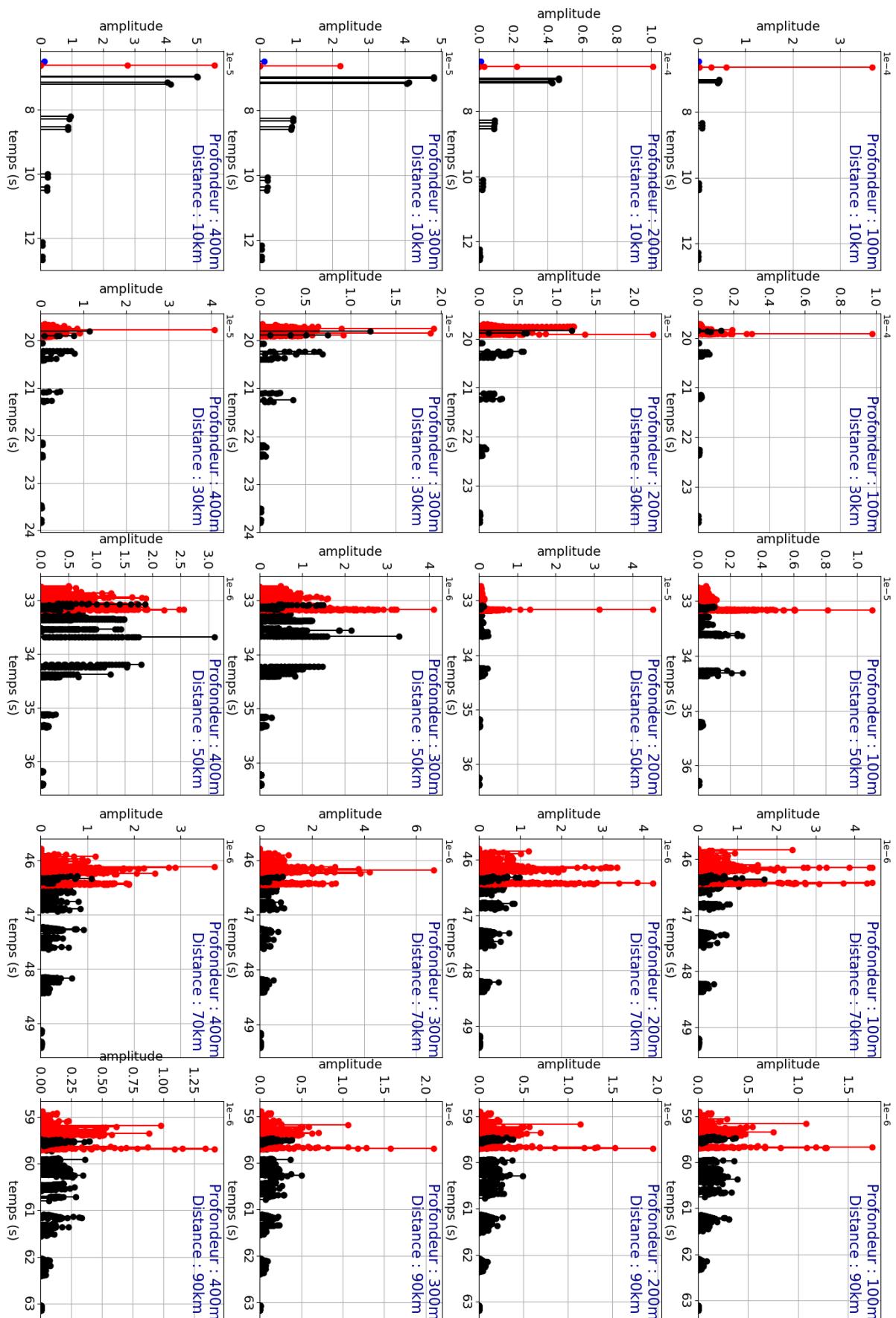


FIGURE F.6 – Réponses impulsionales - Profil n°4 Méditerranée

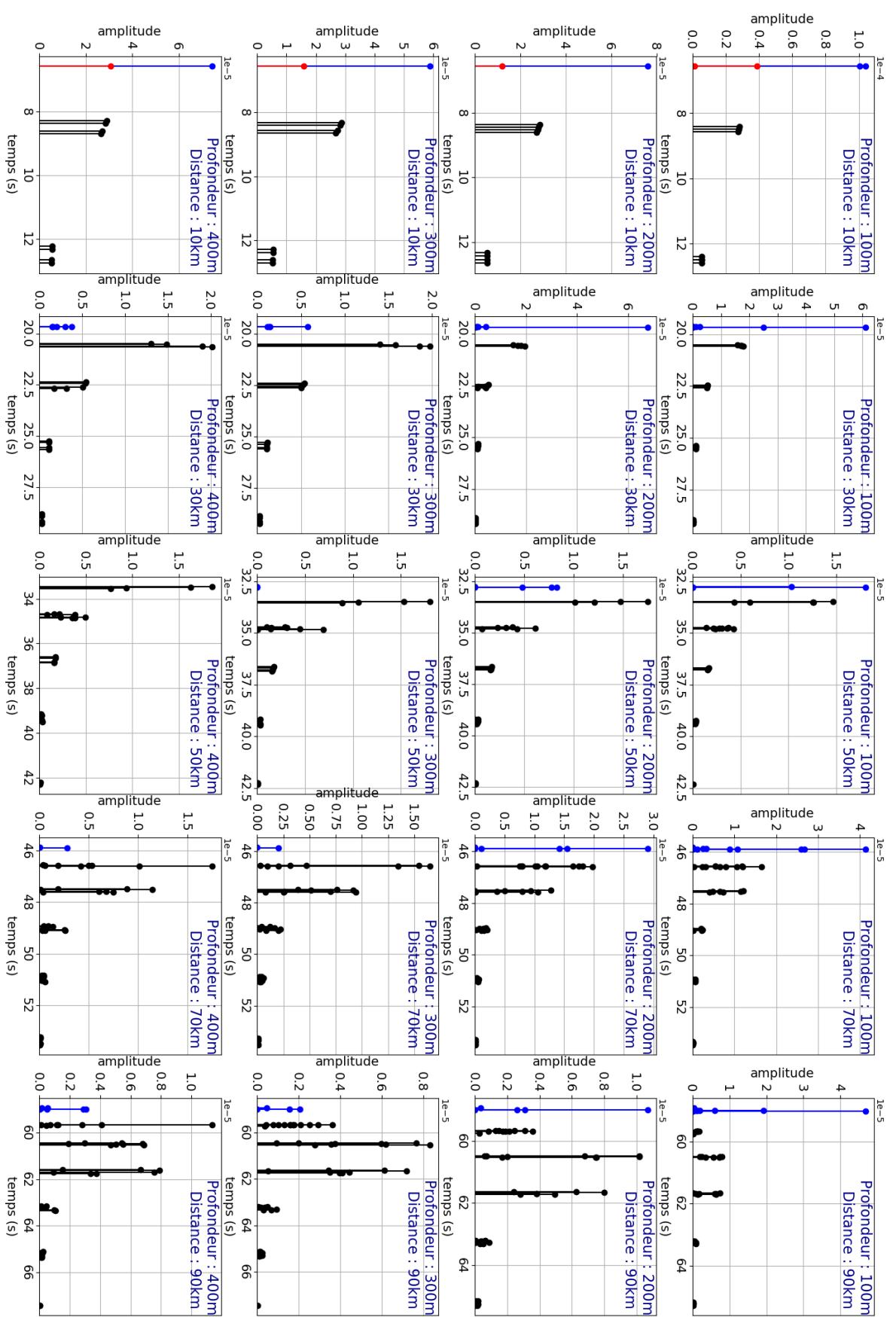


FIGURE F.7 – Réponses impulsionales - Profil n°1 Gulf Stream

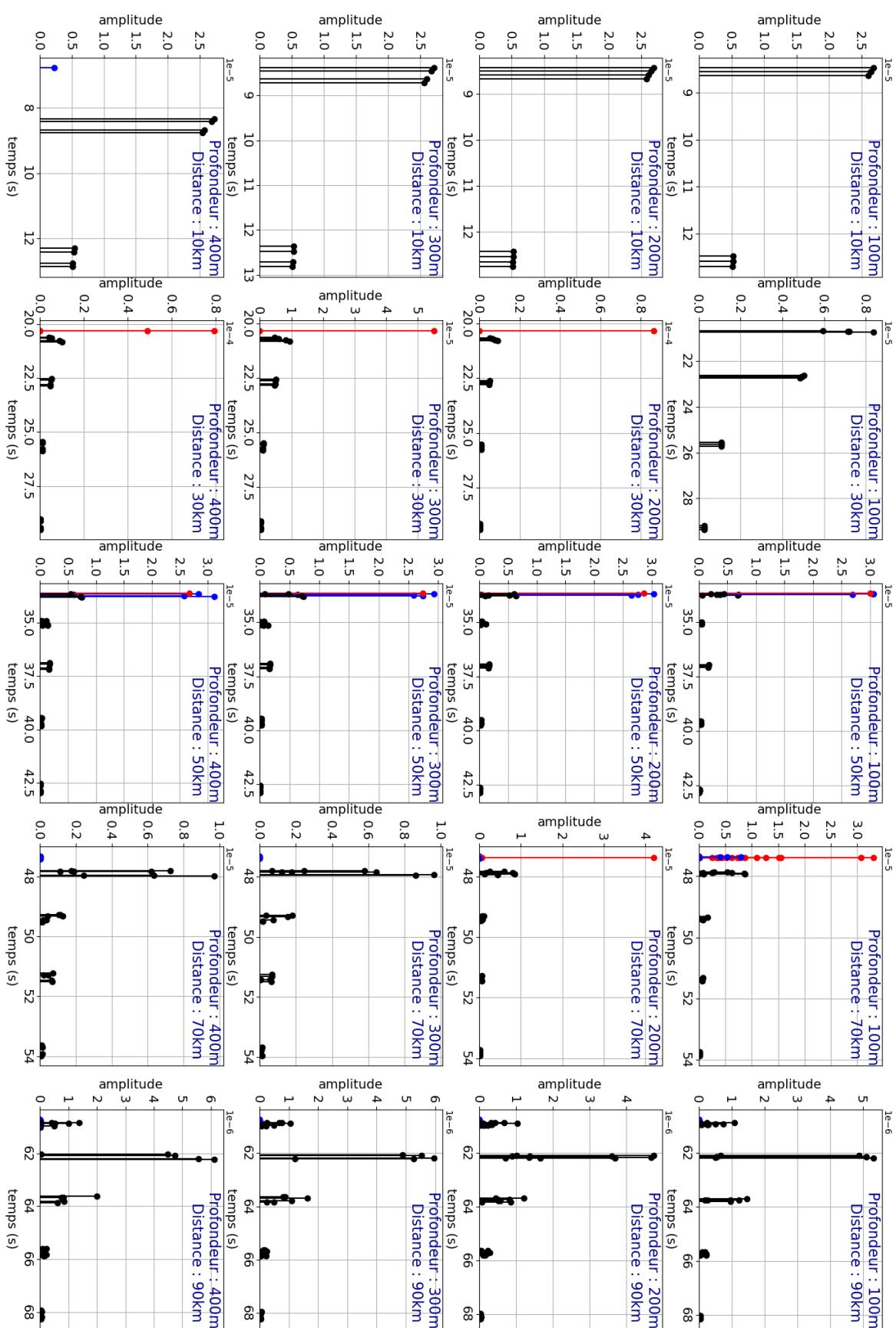


FIGURE F.8 – Réponses impulsionales - Profil n°2 Gulf Stream

Bibliographie

- [1] Argouarch, E. (2018). PFE : Conception de la partie électronique d'un prototype de flotteur bas coût.
- [2] Chandrasekhar, V. and Seah, W. (2006). Area localization scheme for underwater sensor networks. *IEEE OCEANS Asia Pacific Conference*.
- [3] Chauvaud, S. et al. (2018). *Impacts des sons anthropiques sur la faune marine*. Editions Quae.
- [4] Cheng, X. et al. (2008). Silent positioning in underwater acoustic sensor networks. *IEEE Transactions on Vehicular Technology* **57**(3), 1756-1766.
- [5] Erbe, C. (2011). *Underwater Acoustics : Noise and the Effects on Marine Mammals. A Pocket Handbook*. 3rd edition. JASCO Applied Sciences.
- [6] Erol, M., Vieira, L., and Gerla, M. (2007). AUV-Aided localization for underwater sensor networks. *International Conference on Wireless Algorithms, Systems and Applications (WASA 2007)*, 44-54.
- [7] Ewing, M. and Worzel, J. (1948). Long-range sound transmission. *The Geological Society of America, Memoirs* **27**.
- [8] Ferrari, R. (2011). A frontal challenge for climate models. *Science* **332**(6027), 316-317.
- [9] Fruehauf, H. (2004). *Understanding Oscillator Specs*. FEI-Zyfer Incorporation.
- [10] IQD Frequency Products (2017). *IQCM140 - OCXO Specification*. Disponible sur : <https://www.iqdfrequencyproducts.fr/products/>.
- [11] Le Gall, Y. and Lurton, X. (2017). Cognac : Sources acoustiques.
- [12] Lherminier, P. (1998). *Convection Profonde en Mer du Groenland : Etude Expérimentale des Phases de Préconditionnement et de Mélange*. PhD thesis, Université Paris 6.
- [13] LOPS (2016). Laboratoire d'océanographie physique et spatiale - présentation. Disponible sur : <https://www.umr-lops.fr/>.
- [14] Luo, H. et al. (2008). UDB : Using directional beacons for localization in underwater sensor networks. *IEEE International Conference on Parallel and Distributed Systems*.
- [15] Lurton, X. (2008). *An Introduction to Underwater Acoustics - Principles and Applications*. 2nd edition. Springer, 680p.

- [16] Microsemi (2017). *MX-503 - Microprocessor Controlled Crystal Oscillator*. Disponible sur : <https://www.vectron.com/>.
- [17] National Marine Fisheries Service (2016). Technical guidance for assessing the effects of anthropogenic sound on marine mammal hearing : Underwater acoustic thresholds for onset of permanent and temporary threshold shifts.
- [18] Naughton, P. et al. (2017). Self-localization of a deforming swarm of underwater vehicles using impulsive sound sources of opportunity. *IEEE Access* **6**, 1635-1646.
- [19] Omand, M. et al. (2015). Eddy-driven subduction exports particulate organic carbon from the spring bloom. *Science* **348**(6231), 222-225.
- [20] Othman, A. (2008). GPS-less localization protocol for underwater acoustic networks. *IFIP International Conference on Wireless and Optical Communications Networks (WOCN)*.
- [21] Porter, M. (2011). *The BELLHOP Manual and User's Guide*. Disponible sur : <http://oalib.hlsresearch.com/Rays/>.
- [22] Porter, M. and Bucker, H. (1987). Gaussian beam tracing for computing ocean acoustic fields. *Journal of the Acoustical Society of America* **82**(4), 1349-1359.
- [23] Q-TECH Corporation (2018). *QT2020 MCXO - Radiation tolerant microcomputer compensated crystal oscillator*. Disponible sur : <https://q-tech.com/>.
- [24] Rossby, T. et al. (1986). The RAFOS system. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* **3**(4), 672-679.
- [25] Sea-Bird (2015). *SBE 37-SM MicroCAT C-T(P) Recorder*. Disponible sur : <http://www.seabird.com/>.
- [26] Southall, B. et al. (2007). Marine mammal noise exposure criteria : initial scientific recommendations. *Aquatic Mammals* **33**(4), 411-521.
- [27] Tan, H. et al. (2011). A survey of techniques and challenges in underwater localization. *Ocean Engineering* **38**(14), 1663-1676.
- [28] Thorp, W. (1967). Analytic description of the low frequency attenuation coefficient. *Journal of the Acoustical Society of America* **42**, 270.
- [29] Troadec, P. (2018). Rapport de stage de fin d'études 2018 - Réalisation d'un flotteur autonome.
- [30] UNESCO (1980). Tenth report of the joint panel on oceanographic tables and standards. *UNESCO technical papers in Marine Sciences* **36**.
- [31] US Naval Oceanographic Office (1966). *Handbook of Oceanographic Tables*.
- [32] Wenz, G. (1962). Acoustic ambient noise in ocean : Spectra and sources. *Journal of the Acoustical Society of America* **34**(12), 1936-1956.
- [33] Yi, J. (2015). ToA-TS : time of arrival based joint time synchronization and tracking for mobile underwater systems. *Ad Hoc Networks* **34**, 211-223.

