

SeGaMas : Serious Game for Marine mammals Survey

Une modélisation complète de scènes acoustiques sous-marines
pour l'étude des cétacés



**Gaëtan Patenôtre, Sébastien Paris, Stéphane Jaspers, Adeline Paiement,
Hervé Glotin**

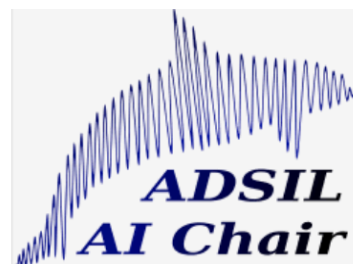


Table des matières

1. Introduction	3
2. Présentation de SeGaMas	3
3. Modèle de propagation acoustique	4
3.1. Hypothèses et domaine de validité	4
3.2. Travail effectué et prochaines étapes	5
4. Autres briques de SeGaMas	8
5. Perspectives	8
6. Références bibliographiques	8

1. Introduction

Entré au Laboratoire d'informatique et Système (LIS) de Toulon en mars 2024, je souhaite continuer en thèse le travail que je réalise depuis 2 mois. Ce rapport présente mon sujet ainsi que mes premiers résultats.

Le projet dans lequel s'inscrit ma thèse est en 2 parties : la construction d'un simulateur de scènes acoustiques complètes nommé SeGaMas (Serious Game for Marine mammals Survey), puis l'utilisation de ce simulateur pour l'étude des cétacés. Ce rapport inclut une présentation du simulateur, puis une description de mon travail sur le modèle de propagation acoustique inclus dans ce simulateur. La fin du rapport est dédiée aux prochaines étapes du projet : les dernières étapes de la construction de SeGaMas, suivi de son utilisation pour l'étude des cétacés.

2. Présentation du simulateur SeGaMas

L'étude des cétacés est complexe du fait de l'inaccessibilité du milieu marin et de sa faible visibilité. L'acoustique passive est la solution la plus prometteuse pour les étudier de manière non invasive. Aujourd'hui, la détection et la classification des espèces enregistrées sont réalisées de manière automatique avec une bonne précision, notamment grâce à des méthodes IA. Cependant, utiliser de telles méthodes pour localiser les animaux est encore imprécis, à cause du manque de données sur leurs déplacements réels, et de la faible taille de nos capteurs.

Pour pallier cela, nous travaillons à la création d'un modèle complet de scènes acoustiques, nommé SeGaMas (Serious Game for Marine (mammals) Survey). Le but est de recréer le plus fidèlement possible tout ce qui se passe sous l'eau, du mouvement de l'animal jusqu'à l'enregistrement du son par les hydrophones (Figure 1). SeGaMas inclut donc la génération de trajectoires réalistes de cétacés, l'émission régulière d'un signal sonore, la modélisation de la propagation et l'atténuation de ce signal dans un environnement réel jusqu'à sa réception par un capteur. En entrée, le modèle recevra les données bathymétriques, océanographiques et le bruit ambiant moyen, ainsi que des paramètres liés au scénario à définir. En sortie, il fournira les trajectoires des animaux, le signal reçu et le trajet parcouru par ce signal (Fig. 2). La détermination de cartes d'intensité sonore pour chaque scénario sera également possible.

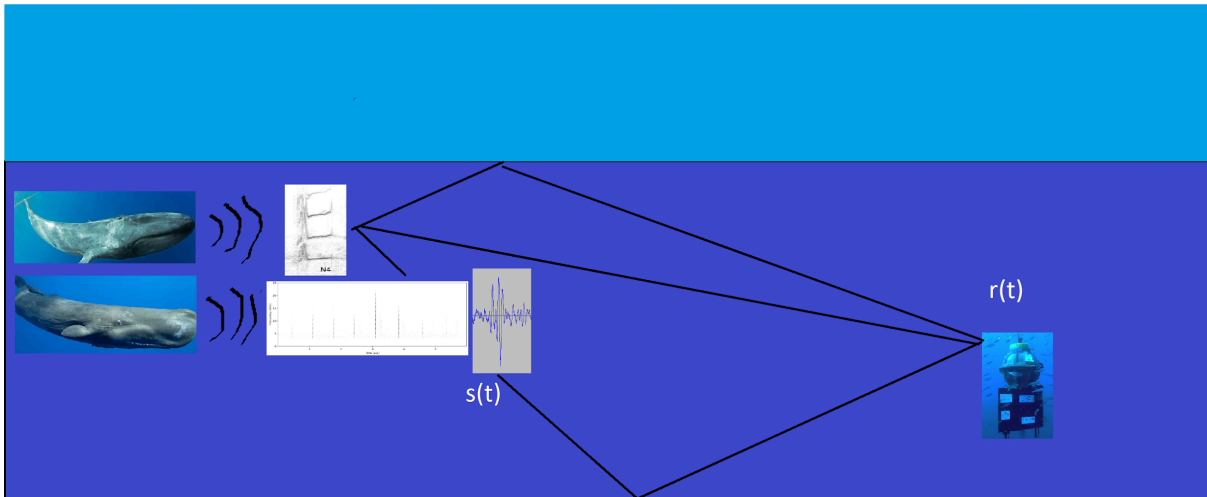


Fig 1 : Schéma basique d'une scène acoustique simulée grâce à SeGaMas

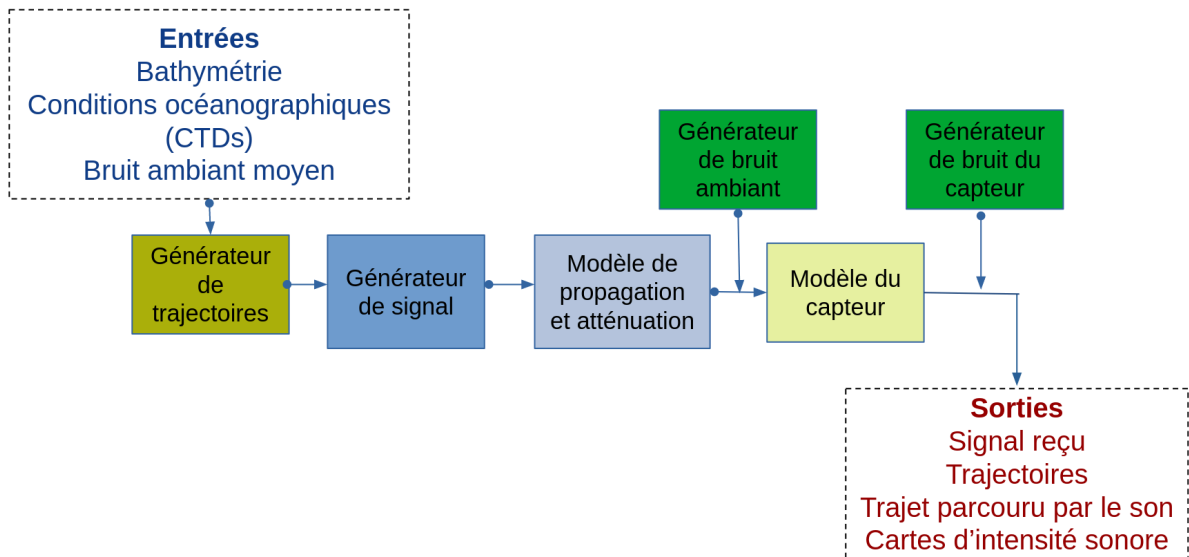


Fig 2 : Structure du simulateur SeGaMas

Les données simulées par SeGaMas seront ensuite utilisées pour déterminer la position des animaux, placer nos capteurs de manière optimale, et mieux comprendre ce qu'entendent et vivent les cétacés.

3. Modèle de propagation acoustique

Depuis mon arrivée au LIS en mars, j'ai concentré mes efforts sur la partie propagation acoustique du modèle, qui devrait bientôt fonctionner en 2 dimensions dans un environnement réel.

3.1. Hypothèses et domaine de validité

Plusieurs hypothèses ont été réalisées pour cette première version du modèle de propagation. Nous avons fait le choix d'utiliser un modèle en lancer de rayon, considérant l'onde sonore

comme un rayon, analogue à un rayon lumineux. Ce type de modèle est rapide, très intuitif et facilite l'interprétation du signal reçu. Cependant, il est moins performant en basses fréquences. Le modèle de propagation est donc valide uniquement en hautes et moyennes fréquences. Il prend en compte la réfraction du son due aux différences de conditions océanographiques suivant la profondeur, ainsi que les réflexions en surface et au fond de l'eau. Nous négligeons les phénomènes d'interférence et de diffraction.

Dans un premier temps, le modèle sera "Range-Independant", c'est-à-dire que la célérité du son ne dépendra que de la profondeur. A terme, cette hypothèse pourrait être relaxée et la célérité du son pourrait varier en fonction de la position horizontale également.

La rétropropagation des rayons (retour en direction de la source suite à un rebond au sol) est pour l'instant prise en compte. Il faudra étudier sa pertinence car il est possible que les rayons rétropropagés soient trop atténués pour être détectés.

Concernant l'atténuation du signal sonore, 3 phénomènes physiques sont modélisés. L'effet le plus important est la dispersion géométrique, qui tient compte du fait que la même puissance sonore est répartie sur une plus grande surface au fur et à mesure que le son se propage loin de la source. La perte en niveau sonore est calculée grâce à la distance horizontale parcourue par le rayon, et à la divergence verticale entre 2 rayons tirés avec une très faible différence angulaire au départ (Hovem, 2011). Le second effet modélisé est la perte par absorption, liée à la friction entre les molécules occasionnée par le passage du son. Un facteur de perte en dB/km est calculé grâce à la formule de François et Garrison (1982). Le dernier effet modélisé est la perte lors des réflexions au sol et en surface. Plusieurs méthodes existent pour modéliser ces phénomènes. Je suis en train d'étudier lesquelles sont les plus pertinentes vis-à-vis de nos objectifs. Suivant la fréquence et l'agitation de la mer, le signal réfléchi en surface est en partie absorbé par les bulles d'air formées juste sous la surface, ou simplement atténué par la rugosité de la surface (APL-UW High-Frequency Ocean Environmental Acoustic Models Handbook, 1994). La perte lors de la réflexion au fond dépend du type de sol marin, de la fréquence, et de l'angle d'impact (Jensen et al. 2011). Le modèle NUC de Hall et Watson (1967) semble être le plus adapté à nos objectifs.

Enfin, la directivité de l'émetteur et du récepteur sera prise en compte pour la reconstruction du signal final.

3.2. Travail effectué et prochaines étapes

J'ai d'abord travaillé sur l'implémentation d'un protocole de construction des rayons, étape par étape. Puis, une fois ce protocole fonctionnel, je l'ai premièrement testé sur des bathymétries (topographies du fond marin) simples, avec des profils de célérité linéaires. J'ai ensuite complexifié les tests tout en apportant les corrections nécessaires jusqu'à arriver à un comportement fiable des rayons dans un environnement réel. Le calcul de trajectoire des rayons sonores semble aujourd'hui fiable et a été testé dans les conditions océanographiques

et bathymétriques du fjord de Kvaenangen en Norvège, dans lequel le LIS a placé des hydrophones (voir figure 3).

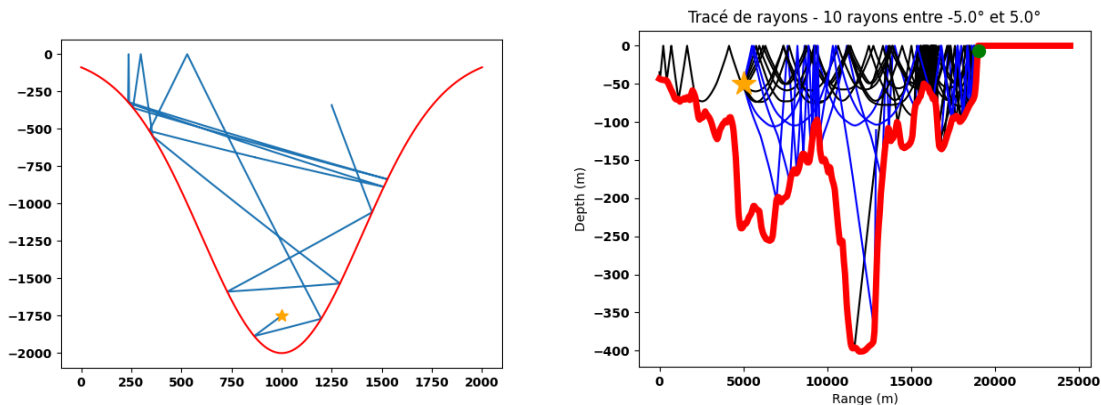


Fig 3 : A gauche : les premiers tests réalisés dans des conditions simples. A droite : lancer de plusieurs rayons en conditions réelles (fjord de Kvaenangen) avec détection par l'hydrophone. Les rayons partent du point jaune et s'affichent en noir s'ils sont détectés par l'hydrophone en vert

Plusieurs possibilités existent pour calculer la trajectoire des rayons. La première version du modèle simule un océan divisé en couches horizontales homogènes dans lesquelles chaque rayon se déplace en ligne droite, et est réfracté lors du passage à la couche suivante, ou réfléchi lorsqu'il intercepte le fond ou la bathymétrie. Cette méthode présente certaines limites (érosion numérique et comportements aberrants des rayons horizontaux) et il est possible que d'autres méthodes de calcul la complètent ou la remplacent. Un tracé par arc de cercles successifs ou une division verticale de l'espace sont des pistes intéressantes.

Je travaille également sur la modélisation de l'atténuation du signal au cours du trajet du son sous l'eau, ainsi que la reconstruction du signal détecté en sortie. J'ai déjà modélisé la perte par absorption (fig 4). Comme cet effet dépend de la fréquence, le signal temporel est transposé dans un espace fréquentiel par Transformée de Fourier Discrète. Chaque fréquence est ensuite atténuée différemment et le signal reçu est reconstruit par Transformée de Fourier Inverse. Je souhaite désormais créer des modules calculant les pertes dues aux réflexions et la dispersion géométrique le long du rayon. J'espère terminer cela rapidement, pour ensuite travailler sur la modélisation de la directivité de l'émetteur et du récepteur.

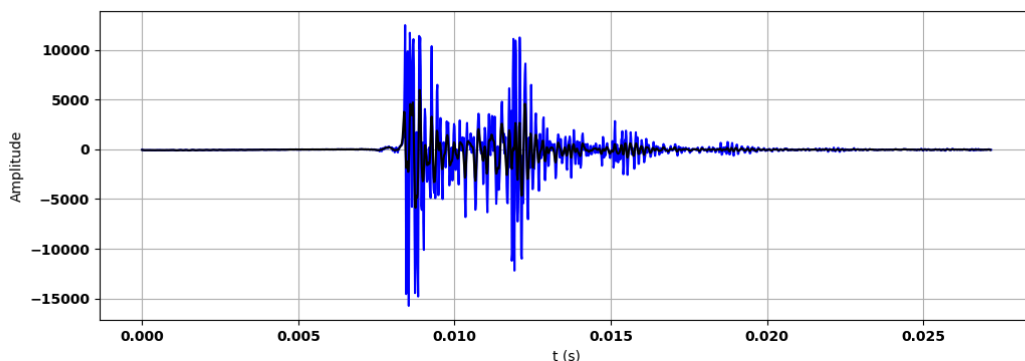


Fig 4 : Exemple de reconstruction du signal atténué après un parcours d'environ 7km. Seule l'absorption est prise en compte dans le calcul de l'atténuation

Une fois la propagation et l'atténuation du son modélisées de manière fiable en 2D, je souhaite étendre le modèle à 3 dimensions. Une étape intermédiaire vers la 3D sera le N*2D, c'est-à-dire l'extraction de plusieurs bathymétries suivant des plans tournant autour d'un point (un hydrophone), suivi de la simulation de la propagation et de l'atténuation du son dans chacun des plans (Fig. 5). Le code d'extraction de la bathymétrie suivant différents plans est déjà opérationnel.

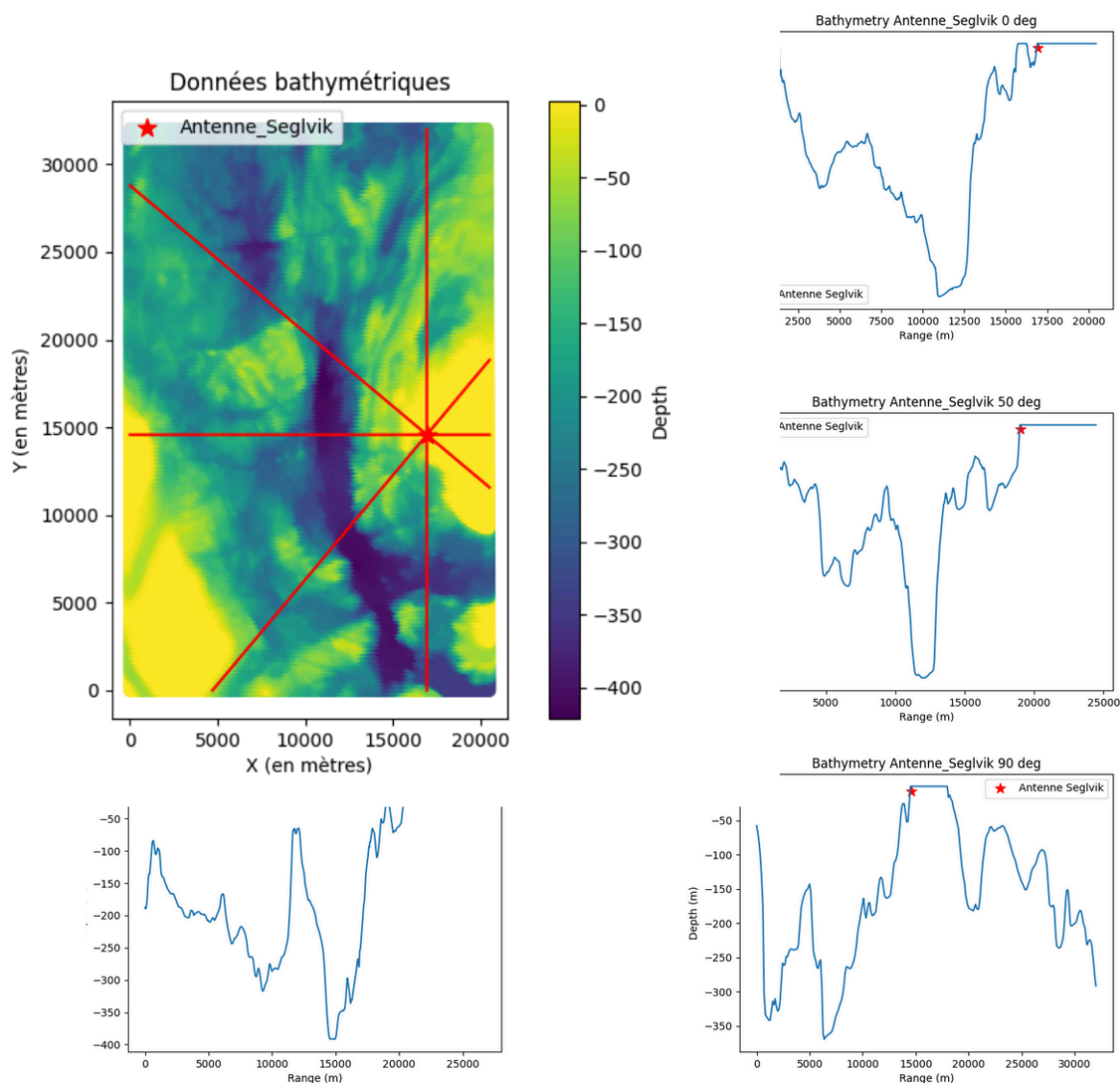


Fig 5 : Extractions de plusieurs bathymétries en 2D à partir de la carte bathymétrique 3D du fjord. L'utilisateur peut choisir les angles d'intérêt pour l'extraction (0°, 50°, 90° et 140° dans cet exemple)

Pour valider le modèle, nous avons plusieurs pistes. La resimulation d'expéditions réalisées ou d'enregistrements sonores pourrait nous offrir des conclusions intéressantes. Les bateaux enregistrés par nos micros placés en mer et dont la position est connue pourraient servir de témoins. Les orques et cachalots enregistrés dans le fjord de Kvaenangen au cours de la mission Adapredat pourraient également nous fournir des données utiles. Enfin, nous envisageons également de créer des expériences en mer propres à la validation du modèle.

L'idée serait de lâcher un bipeur à une position maîtrisée dans un environnement assez bien connu (le fjord Kvaenangen par exemple) et de comparer le signal reçu à une certaine distance avec celui prédit par le modèle.

4. Autres briques de SeGaMas

Je n'ai pas encore travaillé sur les autres briques de SeGaMas, mais des anciens étudiants du laboratoire avaient commencé le travail, notamment sur la génération de trajectoire des animaux ainsi que la fabrication du signal sonore.

La génération de trajectoires réalistes tiendra compte des contraintes cinématiques, de l'angle de la tête, du comportement des animaux et de leurs zones d'intérêt, de la bathymétrie, etc. J'essaierai de recréer des formes de trajectoire réalistes, basées sur nos expéditions (Glottin et al. 2020), ou sur les connaissances actuelles des comportements des espèces observées. Les connaissances actuelles sur les cachalots (Whitehead, 2003) ou les observations d'orques en milieu arctique par exemple (Similä & Ugarte (1993), Similä (1997), Simon (2007)) nous seront très utiles pour modéliser les trajectoires de ces 2 espèces. A terme, nous espérons pouvoir recréer des scènes de vie des animaux, simulant la trajectoire de plusieurs individus en simultanément, où chacun émet des sons réguliers. Il est aussi envisagé d'utiliser des méthodes d'Intelligence Artificielle pour la génération des trajectoires.

Le bruit ambiant sera intégré grâce aux caractérisations de paysages sonores sur lesquelles travaillent d'autres doctorants et chercheurs du LIS en ce moment-même. Le modèle de bruit du capteur est à construire.

5. Utilisation du simulateur

Les données simulées par SeGaMas seront utilisées pour créer des estimateurs de position et trajectoire par Machine Learning. En effet, à cause de la taille limitée de l'antenne, il est impossible d'obtenir des estimations précises de la position de la source seulement par des méthodes géométriques classiques. Utiliser l'IA nous permettrait de créer des estimateurs de position prenant en compte toute l'information contenue dans le signal, et pas seulement les retards à l'arrivée sur les différents micros (Time Delay of Arrival ou TDoA). L'atténuation et la modification du signal, ainsi que les multiples trajets des rayons se rejoignant pour former le signal final, contiennent beaucoup d'information difficilement exploitable par des méthodes classiques, mais potentiellement intéressantes pour un modèle d'apprentissage. Grâce aux trajectoires simulées, nous disposerons enfin des métadonnées (vitesse, orientation, position) qui sont généralement inaccessibles sur le terrain. Ces données serviront à entraîner des estimateurs en Machine Learning de TDoA et d'angle d'émission pour améliorer nos estimations actuelles (Ferrari, 2020), puis à créer des estimateurs de position voire même de trajectoire.

Nous souhaitons aussi utiliser SeGaMas pour positionner de manière optimale nos capteurs, afin d'avoir les meilleurs enregistrements possibles dans une zone connue. En simulant un grand nombre de scènes acoustiques, nous serons en mesure de déterminer la ou les positions des capteurs permettant de maximiser par exemple le Rapport Signal sur Bruit, le nombre de détections, ou la taille de la zone enregistrée. Le paramètre à optimiser reste à définir. Nous pourrions également préciser la position optimale du capteur en resimulant de nouvelles scènes acoustiques plus fines autour d'une position potentiellement intéressante. Pour cela, nous envisageons également de créer un "émulateur" du simulateur, c'est-à-dire un simulateur en IA ayant appris à générer des scènes acoustiques à partir du simulateur SeGaMas. Cette méthode permet d'accélérer considérablement les temps de calculs et donc de générer plus de données. Des approches similaires sont par exemple déjà utilisées en chimie quantique pour déterminer des positions d'équilibre (Morgan et al. 2023).

Enfin, ce modèle nous fournira une meilleure compréhension de ce que les cétacés peuvent dire et entendre, grâce à la possibilité d'inverser les rôles émetteur-récepteur. Nous pourrions en effet simuler le passage d'un bateau (ici l'émetteur) et le trajet du son émis par ce bateau jusqu'à un cétacé (ici le récepteur), et ainsi mieux comprendre les perceptions de ces animaux. Cela permettrait également l'identification de zones de silence lors des passages des bateaux, dans lesquelles les animaux pourraient se réfugier si besoin. Enfin, nous pourrions aussi étudier les collisions entre les cétacés et les bateaux. En effet, certaines conditions océanographiques peuvent générer des zones de silences en surface, ie des zones invisibles pour les mammifères marins. Ceux-ci ne pourraient donc pas connaître ce qu'il y a au-dessus d'eux avant de remonter, et risqueraient alors une collision. L'identification des ces zones corrélée avec les lignes de passage des bateaux peut alors être utilisée pour créer des zones de protection de cétacés dans lesquelles les bateaux devraient ralentir.

6. Conclusion et perspectives

Le sujet de ma thèse est assez vaste et présente de nombreuses possibilités. La création du simulateur SeGaMas est la première étape, et peut-être la plus importante, car plus il est réaliste, plus son utilisation en sera pertinente. Sa validation sera donc essentielle. Son utilisation par la suite répond à d'importants objectifs du laboratoire car cela permettrait d'aller plus loin dans la compréhension des cétacés.

Le projet SeGaMas s'intègre parfaitement aux enjeux actuels du domaine et permettrait de nombreuses avancées éthologiques sur les mammifères marins. La connaissance de la position des animaux offre de nombreuses pistes de développements des connaissances sur leurs comportements et leurs réactions en présence d'activité humaine. De plus, les récents développements en électronique permettent d'embarquer les estimateurs de position directement sur le capteur. Cela pourrait servir à tracer la trajectoire des animaux en temps réel et avertir les bateaux lorsqu'une collision est possible.

7. Références bibliographiques

- Jens Martin Hovem (2011). Ray trace modeling of underwater sound propagation. Documentation and use of the PlaneRay model.
- Robert E. Francois and Gerald R. Garrison (1982). Sound absorption based on ocean measurements. Part II: Boric acid contribution and equation for total absorption. *Journal of the Acoustical Society of America*, 72:1879–1890
- WASHINGTON UNIV SEATTLE, APPLIED PHYSICS LAB (1994). APL-UW High-Frequency Ocean Environmental Acoustic Models Handbook.
- Finn Jensen, William Kuperman, Michael Porter, and Henrik Schmidt (2011). *Computational Ocean Acoustics*, 2nd edn. Springer, New York.
- H. R. Hall and W. H. Watson (1967). An empirical bottom reflection loss expression for use in sonar range prediction
- Glotin, Thellier, Best, Poupard, Ferrari, et al. (2020). Rapport Mission Sphyrna Odyssey : Découvertes Ethoacoustiques de Chasses Collaboratives de Cachalots en Abysses & Impacts en Mer du Confinement COVID19.
http://sabiod.lis-lab.fr/pub/Sphyrna_Odyssey_Report_v1_2.pdf
- Whitehead H. (2003). *Sperm whales: social evolution in the ocean*. Chicago, USA: University of Chicago Press.
- Similä T. & F. Ugarte (1993). Surface and underwater observations of cooperatively feeding killer whales in northern Norway, *Can. J. Zool.*, 71(8):1494-1499
- Similä T. (1997). Sonar observations of killer whales (*Orcinus orca*) feeding on herring schools, *Aquatic Mammals*, 23.3, 119–126
- Simon M, McGregor PK, & Ugarte F. (2007). The relationship between the acoustic behavior and surface activity of killer whales (*Orcinus orca*) that feed on herring (*Clupea harengus*). *Acta ethologica*, 10(2), 47-53.
- Maxence Ferrari (2020). Study of a biosonar based on the modeling of a complete chain of emission-propagation-reception with validation on sperm whales. *General Mathematics [math.GM]*. Université de Picardie Jules Verne. English. NNT : 2020AMIE0006 tel-03626254
- Jay Paul Morgan, Adeline Paiement, Christian Klinke (2023). Domain-informed graph neural networks: A quantum chemistry case study, *Neural Networks*, Volume 165, Pages 938-952, ISSN 0893-6080, <https://doi.org/10.1016/j.neunet.2023.06.030>