

# Mesure de la signature acoustique d'un foil de wingfoil et de sa perception par les tortues ou les mammifères marins

Hervé Glotin<sup>\*^</sup>, Lilou Dantin<sup>\*^§</sup>, Nicolas Deloustal<sup>\*^</sup>, Alain Barcelo<sup>§\*</sup>

\* Univ Toulon, CIAN, Toulon, France. Ctre. Int. d'IA en Acoustique Naturelle,  
<https://cian.univ-tln.fr>

<sup>^</sup> Univ Toulon, Aix-Marseille Univ, CNRS, LIS DYNI, Toulon, France

<sup>§</sup> Parc national de Port-Cros, Hyères, France

RR CIAN 202604



<https://cian.univ-tln.fr>



# Sommaire

Remerciements.....	2
Résumé scientifique.....	3
Résumé grand public.....	3
Scientific abstract.....	4
Abstract for citizen.....	4
Introduction.....	6
Matériel.....	7
Antennes acoustiques et site de test.....	7
Conditions de mer et montage de l'observatoire sur site.....	11
Estimation de la signature maximale d'un foil.....	13
Détectabilité acoustique par la faune.....	17
Estimation de la détectabilité par les tortues marines.....	17
Estimation de la détectabilité du foil par les cétacés.....	18
Effet à long terme (SEL).....	19
Discussion.....	20
Conclusion.....	23
Annexes.....	24
A1. Sensibilité en fréquence et angle de l'hydrophone C75.....	24
A2. Sensibilité en fréquence de l'hydrophone C57.....	26
A3. Sensibilité en fréquence de l'hydrophone SQ26.....	27
Références bibliographiques.....	28

**Mots clés:** foil, wingfoil, anthropophonie, tortue marine, cétacé, audiogramme.

## Remerciements

Nous remercions F. Artzner qui a fait évoluer avec expertise le wingfoil.

Merci à la Fondation Vilebrequin pour le financement exceptionnel de cette étude pionnière.

Nous remercions la Préfecture Maritime pour son accord d'écoute acoustique près de Toulon. Nous remercions la startup [Intelligent-acoustics.com](https://intelligent-acoustics.com) pour son prêt de matériel.

Nous remercions Dr Hugo Bourgogne, PNPC, expert en comportement de nage des tortues pour ses discussions sur la nage des tortues juvéniles.

## Résumé scientifique

Cette étude pionnière analyse la signature acoustique sous-marine générée par les foils de wingfoil et évalue leur perceptibilité par les tortues marines et les mammifères marins présents en Méditerranée. Des mesures acoustiques de différents foils ont été réalisées à leur passage devant hydrophones et caméra. Une navigatrice experte a effectué douze passages de wingfoil à vitesse modérée (10 à 20 km/h) afin de caractériser la signature sonore des foils dans des conditions de mer calme et de faible bruit ambiant.

Les analyses spectrales montrent l'existence d'une signature acoustique faible mais identifiable, principalement concentrée entre 1 et 1,4 kHz, avec une émergence d'environ +10 dB au-dessus du bruit de fond local. Les émissions acoustiques observées restent très inférieures aux niveaux connus pour provoquer des perturbations auditives ou physiologiques chez la faune marine.

La comparaison avec les audiogrammes indique que les tortues marines adultes, notamment la tortue caouanne (*Caretta caretta*), n'entendent pas ces signaux, car leur sensibilité auditive chute fortement au-delà de 700 Hz. Les juvéniles pourraient éventuellement percevoir faiblement des foils évoluant à vitesse élevée. Les cétacés (odontocètes et mysticètes) sont capables de détecter acoustiquement le passage d'un foil à moyenne distance.

Les tortues adultes, très peu sensibles aux fréquences émises, dépendraient davantage de la détection visuelle du foil, ce qui pourrait être une perspective. Les auteurs suggèrent également d'étudier l'effet cumulatif de nombreux wingfoils dans une même baie, et par vitesse plus élevée.

## Résumé grand public

Des chercheurs de l'ONG Vilebrequin, du PNPC, et du Centre int. d'IA en Acoustique Naturelle du CNRS Université de Toulon, ont voulu savoir si les foils de wingfoil produisent un bruit sous l'eau et si ce bruit peut être entendu par les tortues marines ou les cétacés. Pour cela, ils ont installé un observatoire acoustique sous-marin et une championne du monde de wingfoil y a effectué plusieurs passages afin d'enregistrer précisément le son produit par différents foils de wingfoil.

Les résultats montrent que les foils de wingfoil émettent bien un bruit sous-marin, surtout autour de fréquences proches de 1 kHz. Ce bruit reste très faible comparé aux sons générés par les bateaux, les sonars ou les travaux maritimes. Le niveau sonore dans tous les cas est bien trop faible pour provoquer des dommages auditifs chez les animaux marins.

Les tortues marines adultes n'entendent pas ces sons ; les très jeunes tortues pourraient éventuellement les percevoir. Les dauphins et les baleines peuvent entendre le foil à moyenne distance. Pour les tortues, qui entendent mal ces fréquences, les chercheurs suggèrent de rendre les mâts des foils plus visibles sous l'eau. Il serait intéressant d'évaluer l'impact potentiel d'un grand nombre de wingfoils évoluant simultanément dans une même zone côtière.

## Scientific abstract

This pioneering study investigates the underwater acoustic signature generated by wingfoil foils and assesses their detectability by marine turtles and marine mammals inhabiting the Mediterranean Sea. Acoustic measurements of different foils were carried out during passages in front of hydrophones and video cameras. An expert rider performed twelve wingfoil runs at moderate speeds (10 to 20 km/h) in order to characterize the acoustic signature of the foils under calm sea conditions and low ambient noise.

Spectral analyses reveal the existence of a weak but identifiable acoustic signature, mainly concentrated between 1 and 1.4 kHz, with an emergence of approximately +10 dB above the local background noise. The observed acoustic emissions remain far below levels known to induce auditory or physiological disturbances in marine fauna.

Comparison with published audiograms indicates that adult marine turtles, particularly the loggerhead turtle (*Caretta caretta*), are unable to hear these signals because their auditory sensitivity decreases sharply above 700 Hz. Juveniles, however, might weakly perceive foils operating at higher speeds. Cetaceans (odontocetes and mysticetes) are capable of acoustically detecting the passage of a foil at moderate distance.

Adult turtles, which are poorly sensitive to the emitted frequencies, would rely more on visual detection of the foil, which could represent a possible mitigation perspective. The authors also recommend investigating the cumulative effect of multiple wingfoils operating simultaneously within the same bay, as well as the effects associated with higher navigation speeds.

## Abstract for citizen

Researchers from the Vilebrequin Foundation, the Parc national de Port-Cros, and the Centre International d'IA en Acoustique Naturelle sought to determine whether wingfoil foils produce underwater noise and whether this noise can be detected by marine turtles or cetaceans. To investigate this question, they deployed an underwater acoustic observatory, while a world champion wingfoil rider performed several passes in order to accurately record the sounds generated by different wingfoil foils.

The results show that wingfoil foils do emit underwater noise, mainly around frequencies close to 1 kHz. However, this noise remains very weak compared with sounds produced by boats, sonars, or marine construction activities. In all cases, the measured sound levels are far too low to cause hearing damage to marine animals.

Adult marine turtles do not hear these sounds, although very young turtles might possibly detect them. Dolphins and whales are able to hear the foil at moderate distance. Because turtles have poor sensitivity to these frequencies, the researchers suggest making wingfoil masts more visible underwater. It would also be valuable to assess the potential impact of large numbers of wingfoils operating simultaneously within the same coastal area.

# Introduction

Le développement exponentiel des équipements nautiques incluant des foils représente potentiellement une menace pour la biodiversité marine car cet équipement est particulièrement contondant.

Cette étude s'inscrit dans la réalisation de l'objet de la Fondation Vilebrequin et notamment la préservation de la faune et des écosystèmes aquatiques, des fonds marins, et la protection de la biodiversité. Dans le cadre de son attention prioritaire portée à la protection des tortues aquatiques, la Fondation collabore avec différentes organisations dans la recherche et les actions limitant les effets de l'activité humaine sur la vie et le développement des tortues aquatiques. C'est pourquoi la Fondation a totalement financé cette étude pionnière.

Depuis plusieurs années, le nombre de tortues marines est en très nette augmentation dans les eaux du Parc national de Port-Cros et de Pelagos et les pontes sur les plages sont devenues fréquentes.

À ce jour, aucune recherche n'a été conduite pour déterminer l'existence éventuelle d'une signature acoustique de ces équipements à propulsion vélique, ni si une telle signature existait, pour en estimer leur détectabilité sur la base de leur niveau sonore et gammes de fréquences, par les tortues marines et les mammifères marins situées dans le Sanctuaire Pelagos.

Cette étude vise donc à (1) déterminer s'il existe une signature acoustique d'un foil de wingfoil, (2) si oui, à analyser ses caractéristiques acoustiques (fréquence et niveau dB), (3) à estimer si ces niveaux sont détectables pour la tortue caouanne et étendues aux autres espèces de tortues, et aux cétacés (dauphins, baleine à bec, et orqual commun).

Cette étude repose sur la question de la détection ou non par l'audition du risque de collision avec un foil. Elle diffère des études classiques plus larges de la pollution sonore, ou pollution acoustique, qui désigne de manière générale les vibrations sous-marines d'origine anthropique sur un large éventail d'activités humaines qui provoquent des perturbations acoustiques. On peut les diviser en trois grandes catégories : (i) trafic maritime : les navires de transport et de tourisme utilisent des moteurs qui émettent des vibrations sous l'eau. (ii) exploration sonore : utilisée pour la navigation sous-marine (sonar) ou les études sismiques (canons à air), le son est un moyen puissant d'obtenir des informations sur l'environnement, en particulier sous l'eau. (iii) travaux : l'installation de structures (éoliennes, plateformes pétrolières, etc.), l'exploitation minière et de nombreux travaux de construction ou de démolition sont réalisés sous l'eau et constituent aussi des sources de vibrations puissantes.

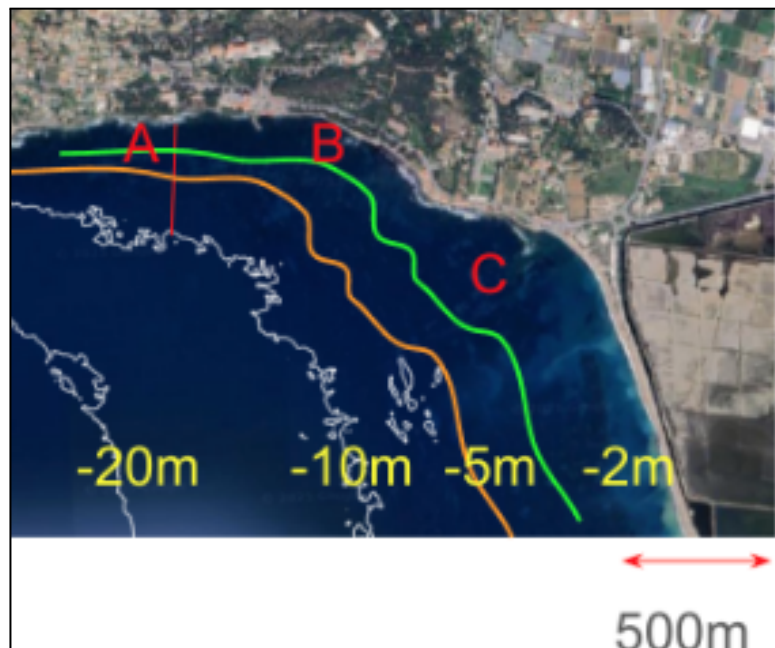
Nous verrons que ce rapport démontre que (i) les émissions acoustiques du foil d'un wingfoil sont bénignes en comparaison aux pollutions anthropophoniques, (ii) elles sont inaudibles pour les tortues, ou très faiblement jusqu'à leur 2 ans, (iii) elles sont audibles pour tous les mammifères marins.

## Matériel

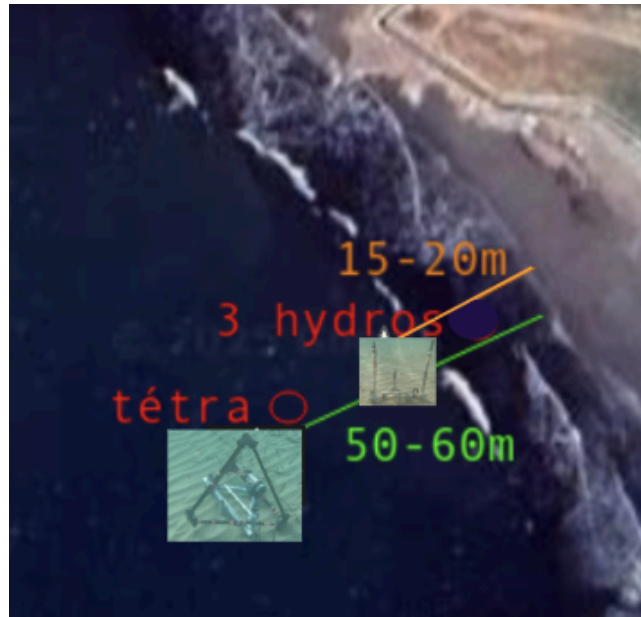
### Antennes acoustiques et site de test

Le protocole original de cette étude consiste à filmer le passage d'un wingfoil entre deux bouées placées au-dessus de deux antennes acoustiques. Ces antennes sont redondantes pour assurer les mesures en double et à la meilleure qualité possible, et composées respectivement 4 versus 3 hydrophones chacune, à 256 kHz Fe 24 bits sur les cartes QHBv3 de [Intelligent-acoustics.com](http://Intelligent-acoustics.com), plus un 7<sup>ème</sup> hydrophone sur un moniteur acoustique continu F6 à 96 kHz Fe et 32 bits.

Le choix du site et du jour a été étudié par Flora Artzner et Hervé Glotin pour assurer une qualité acoustique maximale, c'est-à-dire avec un fond mat (caractéristique acoustique comme une chambre sourde), c'est à dire du sable et non pas du roc, ni des algues ou récif qui ont une activité biophonique ou géophonique importante. Le site choisi se situe au nord-ouest de la plage de l'Almanarre (hot spot de wingfoil), à Port Hélène, à Hyères, dans le Var.



*Figure 1 : Bathymétrie de la zone choisie à Port Hélène, Hyères. La zone A était intéressante mais trop protégée du vent, c'est finalement entre B et C que se situait le compromis entre le vent et la bathymétrie.*



*Figure 2 : Disposition des deux antennes, l'une câblée sur 30 m, composée de 3 hydrophones, et l'autre câblée sur 50 m environ pour le retour de l'hydrophone maître de l'expérience plus 4 hydrophones en tétraèdre régulier (autonome par tube acoustique sous-marin) pour une éventuelle vérification des gisements.*

La disposition des antennes a été définie de telle sorte que F. Artzner, championne du monde 2022 de wingfoil, puisse naviguer entre les deux antennes démarquées chacune par un flotteur inoffensif, et au plus proche du flotteur le plus Sud, assurant donc à chaque passage une mesure parfaite d'un éventuel signal acoustique du foil de wingfoil par l'hydrophone maître de l'antenne Sud, et si nécessaire des contres mesures de contrôle avec les capteurs supplémentaires.

Chacune des deux antennes est d'environ 1 m de diamètre et est posée sur le fond entre -2 m et -5 m. Les hydrophones sont câblés (50 m et 30 m) vers la plage afin de mesurer en temps-réel les signaux et vérifier le bon déroulement du protocole.

Chaque antenne est connectée à une carte son QHBV3 de Intelligent-Acoustics. Un hydrophone (C75) est connecté en plus à un Zoom F6 profitant de 32 bits de dynamique pour assurer une parfaite acquisition avec un contrôle en direct.

Les hydrophones déployés sont les C75 et C57 (Cetacean Research, USA) et SQ26 (Sensor Tech, CA). Leur sensibilité est donnée en annexe. Le premier est très large bande et à sensibilité sphérique, assurant une parfaite réception dans tous les axes de la source. Les autres sont cylindriques donc à sensibilité directionnelle au-dessus de 10 kHz, mais toujours à sensibilité sphérique sous 10 kHz.



Figure 3 : Placement des antennes par N. Deloustal et L. Dantin.

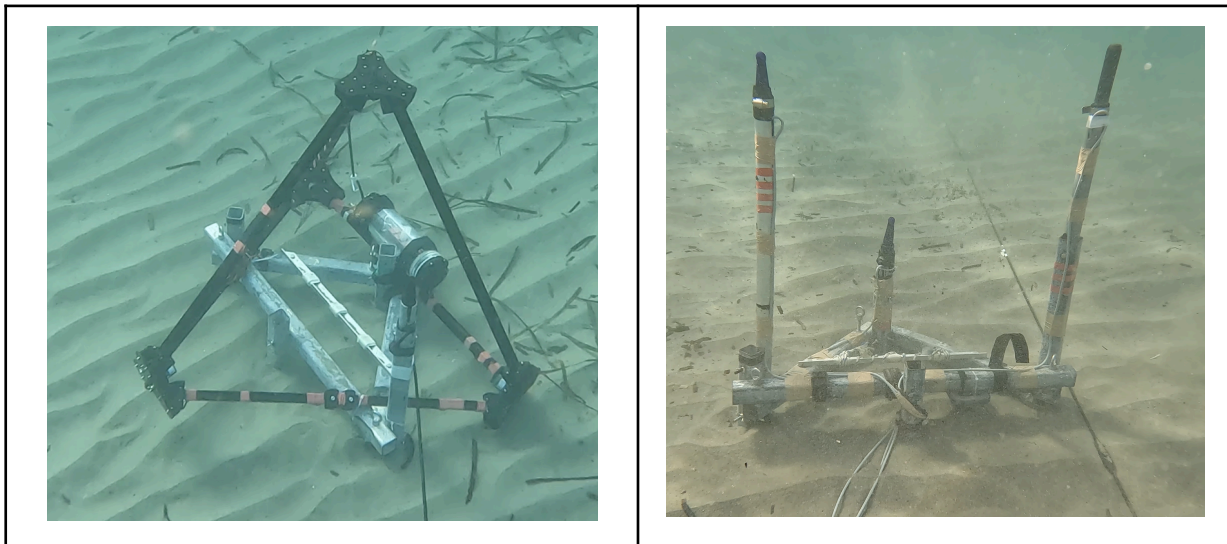


Figure 4 : Les deux antennes acoustiques, posées en fonctionnement sur site. (Gauche) L'antenne 'Tetra' la plus éloignée est le tétraèdre (4 SQ26) plus l'hydrophone C75 sphérique de référence. (Droite) L'antenne 'Tripode' avec ses 3 hydrophones câblés, dont 2 C75 (omnidirectionnel) et un C57, en double pour parer à toute dysfonction et assurer les mesures de cette rare expérience.

Une antenne nommée "Tétra" (Fig.4) est environ à 50 m de distance du trait de côte, à une profondeur de -4 m à -5 m. Elle a 4 SQ26 et 1 C75. L'autre, 'Tripode' a 3 hydrophones (2 C75 + 1 C57), à 20 m de la côte, à -1.8 m de fond. Ce dispositif était ainsi double pour lever toute ambiguïté éventuelle sur les signaux reçus, et sélectionner ceux de meilleure qualité. Il en ressort que l'hydrophone "maître" C75 sur l'antenne Tétra, de par sa profondeur et sa pose sur le sable, a le signal le plus clair et sera donc la mesure de référence. La vidéo permet une parfaite assignation de chaque passage aux sons, donc l'analyse audio-visuelle de cet hydrophone maître est discriminante. Chaque bouée de marquage (Fig.5) était placée au-dessus de son antenne. Ainsi un passage proche de la bouée Sud, est à moins de 10 m de l'hydrophone maître.



Figure 5 : Les 2 bouées, au-dessus de chaque antenne, et F.A. évoluant entre elles.  
D'après les vidéos, les passages sont à des vitesses entre 10 et 20 km/h.

Les équipements voiles, foils et wingfoils (Fig.6) ont été proposés et mis à disposition par l'experte Flora Artzner, championne du monde de la discipline. Elle est passée trois fois à des allures modérées à moyennes entre les antennes. Elle a exploité plusieurs fois chaque équipement en diverses combinaisons pour en tirer la signature acoustique si existante.



Figure 6 : Les 2 foils testés avec 2 planches, suivant ces combinaisons :  
 (A) foil ENSIS MANIANC INFINITY ACE 1140 span : 92.5 cm + planche ENSIS 5'7" 21" 72L  
 (B) foil PHANTOM CARBON 1280 span : 87 cm + planche CHASE.  
 (C) foil ENSIS MANIANC INFINITY ACE 840 span : 79.5 cm + planche ENSIS 5'7" 21" 72L  
 (D) foil PHANTOM CARBON 740 span : 69,5 cm + planche ENSIS 5'7" 21" 72L.

## Conditions de mer et montage de l'observatoire sur site

Les conditions de mer ont été de Beaufort 1 (vers 11:00) forcissant à 2 en fin de session (15:15). Les conditions de vent étaient de 5 km/h forcissant à 10 km/h, condition de vent assez faible, demandant habilité à la navigatrice, mais permettant une écoute fine des phénomènes acoustiques (priorité de ce protocole) dans un faible bruit de mer.

Le matériel acoustique et son installation ont été préparés par l'équipe CIAN Univ Toulon : H. Glotin avec pour la pose et dépose les doctorants de CIAN en acoustique sous-marine Nicolas Deloustal et Lilou Dantin. Il aura fallu environ 4h pour la pose complète en repérant la zone la plus profonde permettant le déploiement des antennes et de leurs câbles.

Le matériel foil, wingfoil et voile a été préparé et géré par Flora Artzner et son collègue.

Pour certifier l'origine de l'éventuelle signature maximale d'un foil, et non pas un artéfact ou un signal biophonique ou géophonique, les passages de bateaux au large ont été surveillés (= aucun à plus de 3 milles), et chaque passage du wingfoil a été filmé en continu, assurant l'instant quand le passage du wingfoil est au plus près de chaque antenne (Fig.7, 8, 9, 10).

La bonne synchronisation entre les vidéos (GoPro10 sur pied), prises en continue<sup>1</sup>, et les enregistrements acoustiques eux aussi continues, permet une analyse directe et simple, qui assure que chaque défilement du wingfoil entre les balises permettra l'identification de sa signature propre.

Les passages, entre les balises, sont constants en direction et distance aux hydrophones, justifiant ainsi la caractérisation de cette source acoustique. La distance des passages à l'hydrophone maître est entre 4 et 8 m. Les niveaux dB qui suivront sont donc des niveaux à 6 m de la source en moyenne.

---

<sup>1</sup> Ces vidéos sont disponibles sur <https://sabiody-lis-lab.fr/pub/Vilebrequin>

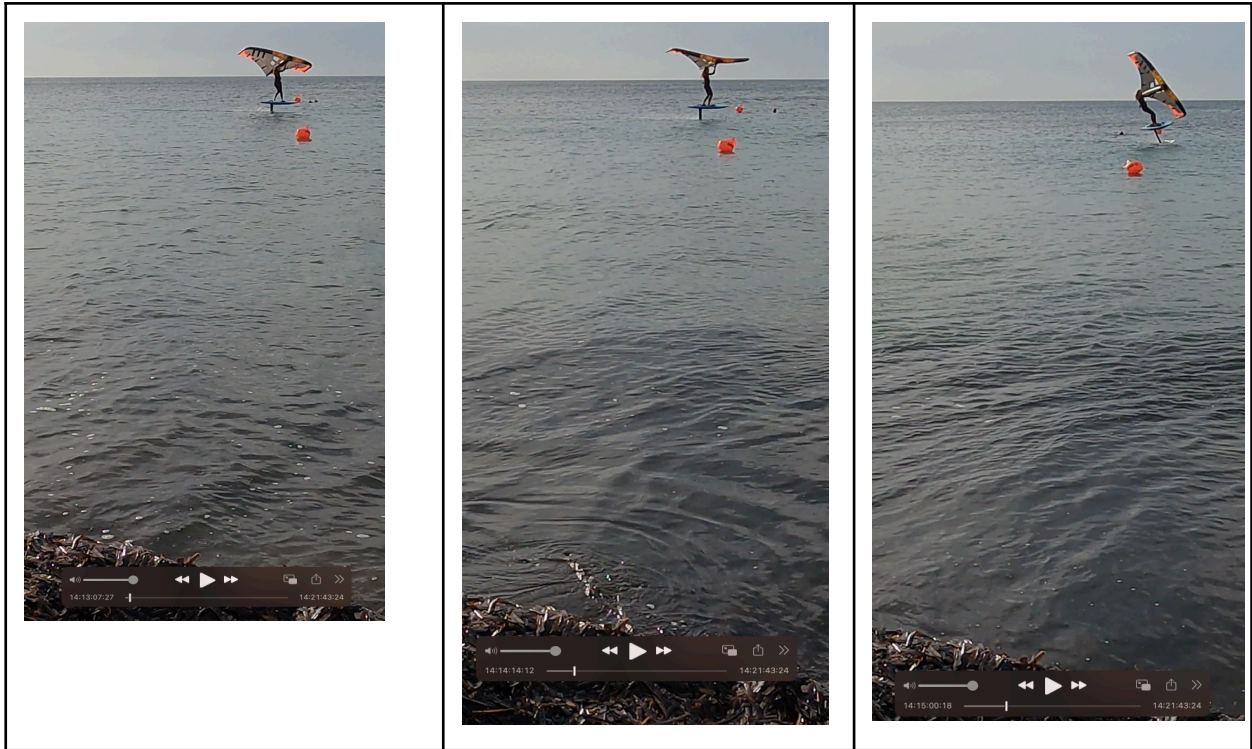


Figure 7 : Les 3 premiers passages, combinaison A : 14:13 à 14:15.

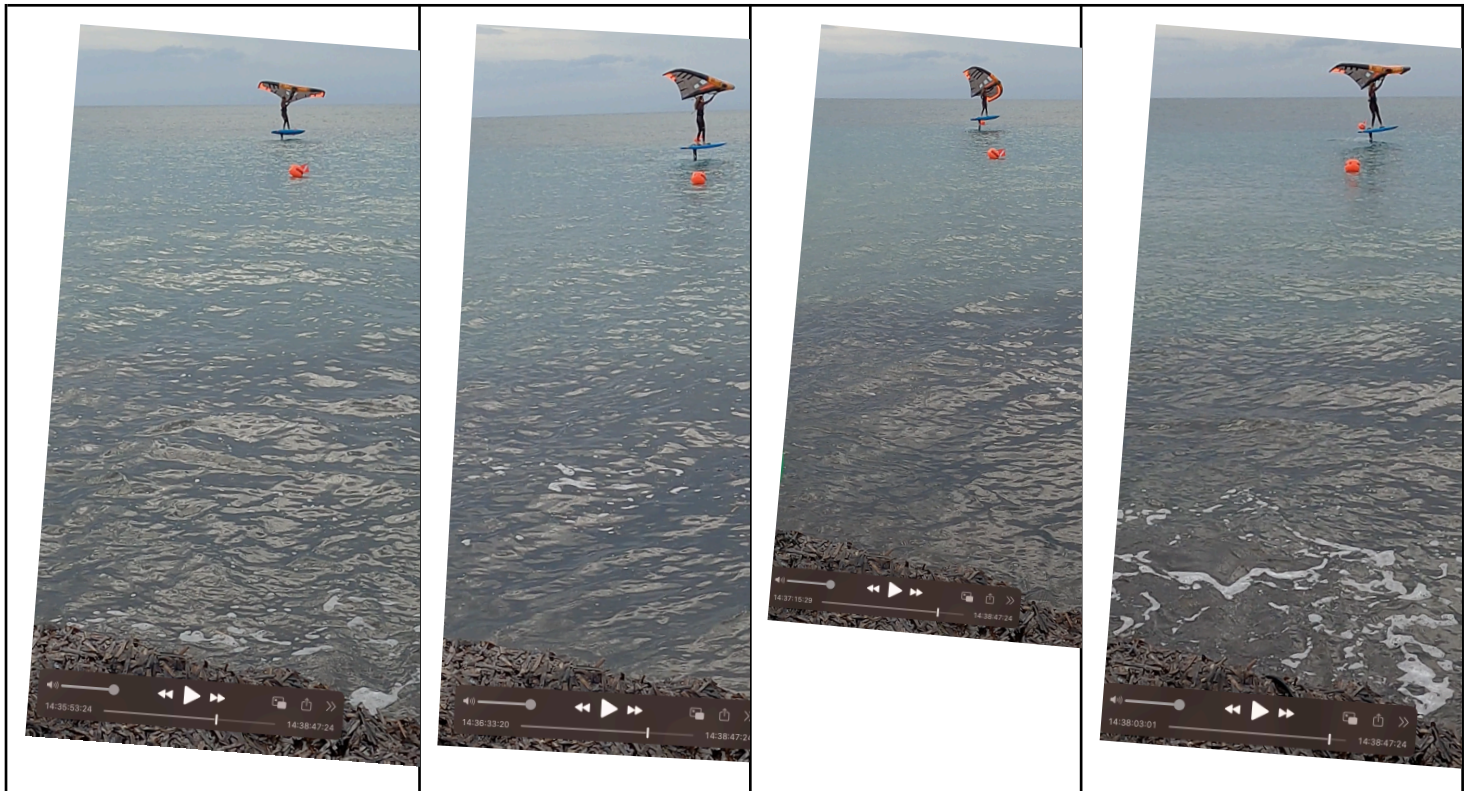


Figure 8 : Les 4 passages, combinaison B : 14:35 à 14:38.

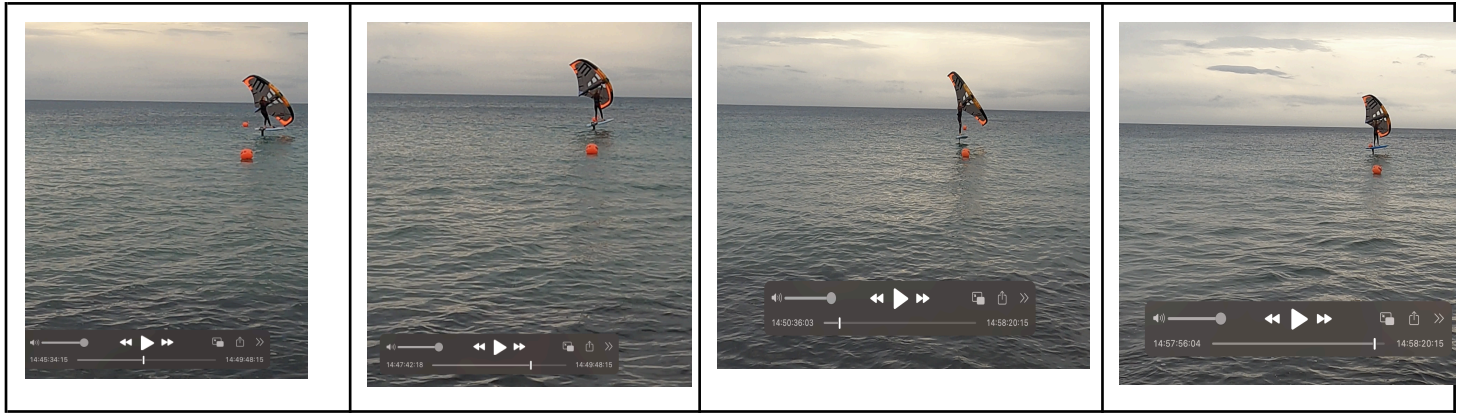


Figure 9 : Les 4 passages, combinaison C : 14:45 à 14:57.

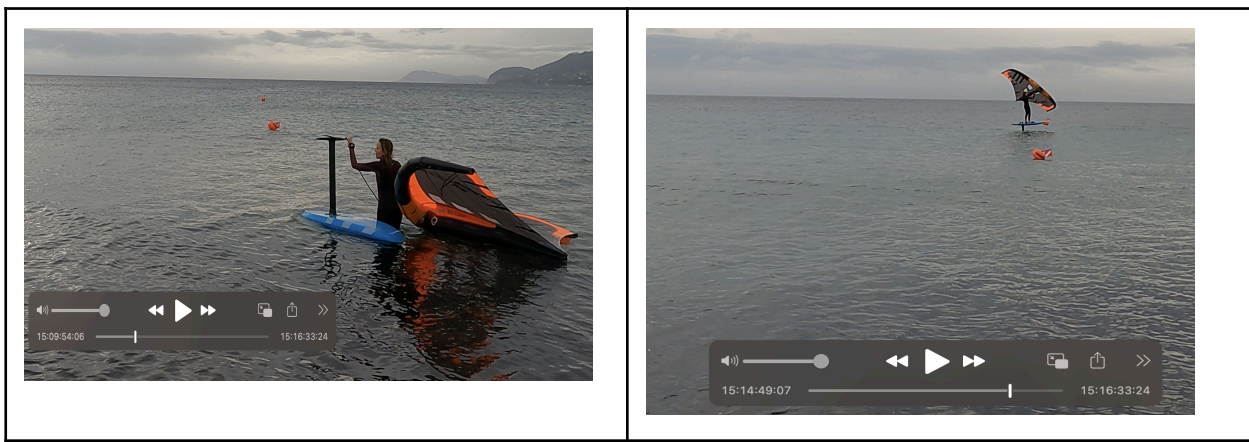


Figure 10 : Dernier passage, combinaison D : 15:09 à la fin 15:17.

## Estimation de la signature maximale d'un foil

Le traitement du signal consiste en la détermination de la signature la plus forte d'un foil, pour savoir s'il est audible par la faune. L'intensité maximale est calculée sur l'ensemble des 12 passages de wingfoil (Fig.7, 8, 9, 10).

Les caractéristiques de la signature principale sont données ci-dessous.

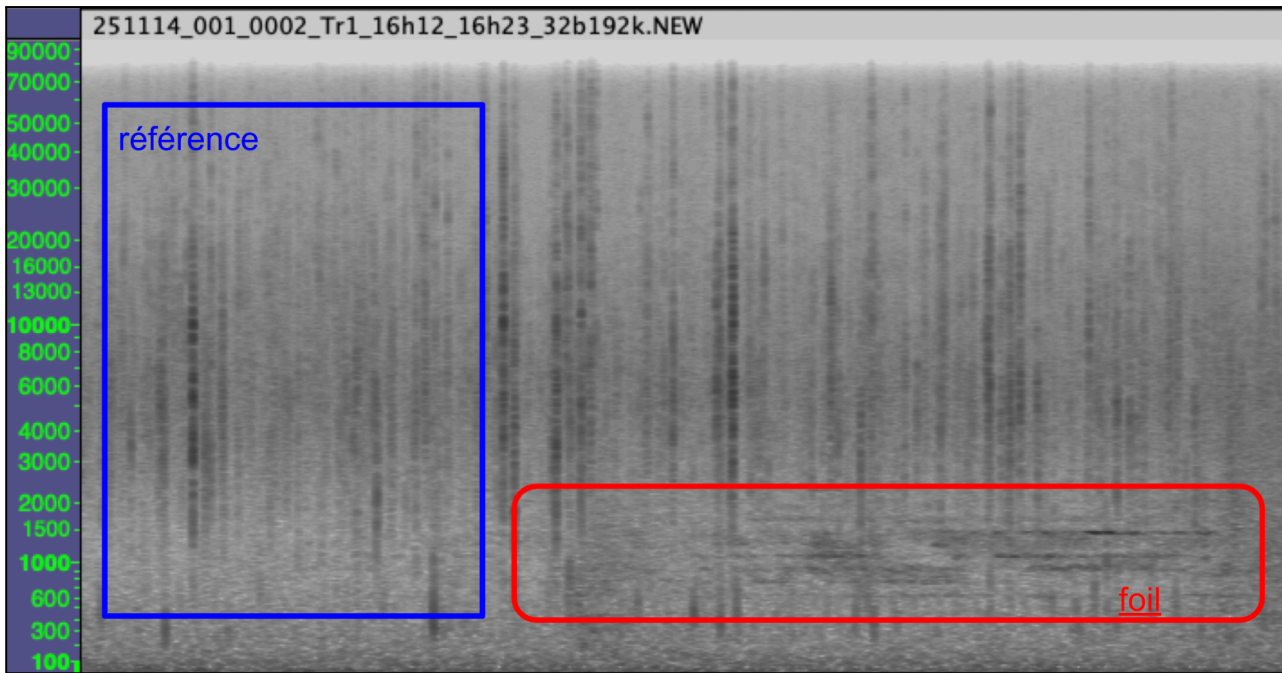


Figure 11 : Spectrogramme du passage vers 15:16 (Combinaison D) avec bruit le fond en référence et la signature encadrée en rouge (heure enregistreur H+1).

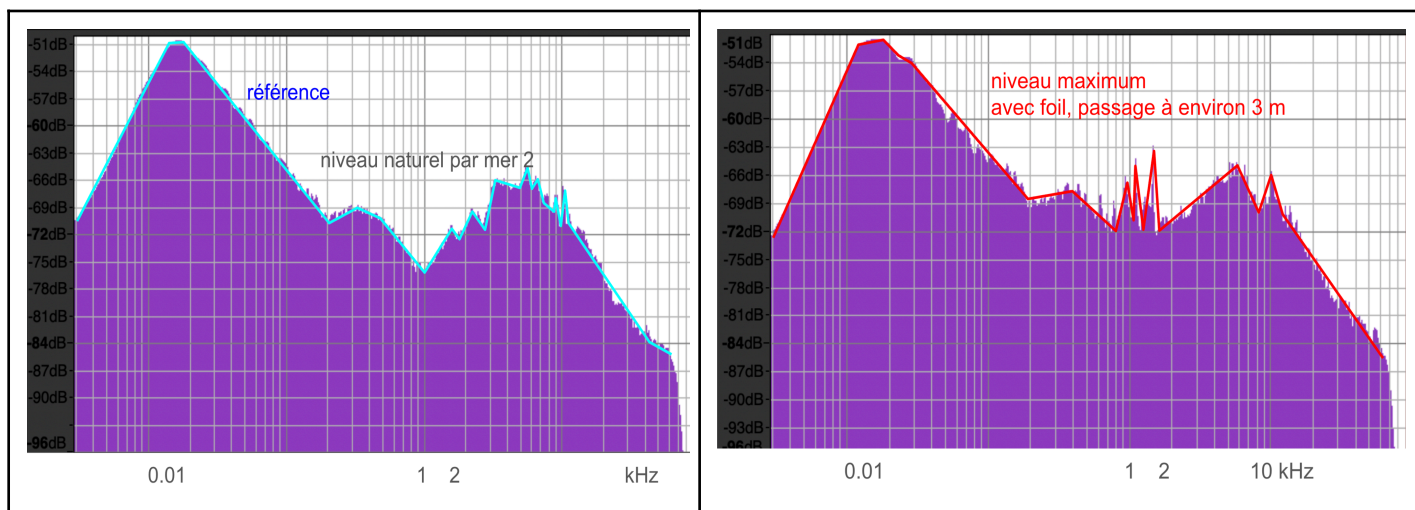


Figure 12 : Analyse des spectre du fond naturel (Gauche), versus de la signature (Droite) du foil (niveaux en dB relatifs).

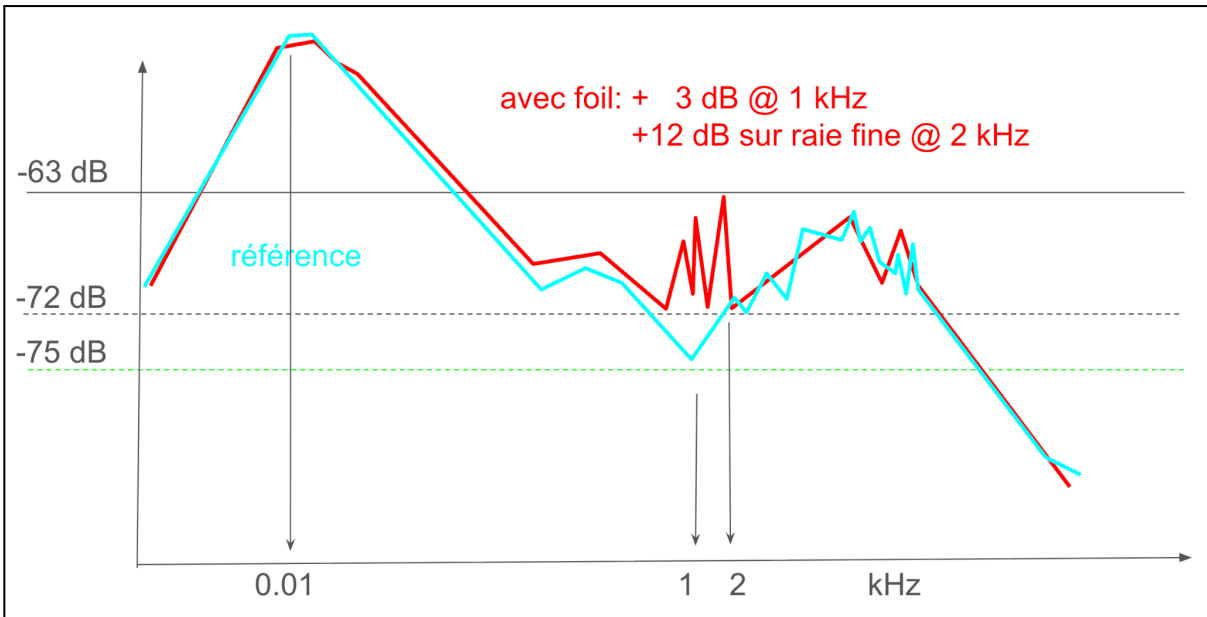


Figure 13 : Le niveau relatif (bas courbe bleue) se distribue naturellement en fréquence et en énergie, depuis 10 Hz (fréquence de coupure du système) vers 1 kHz (minimum), puis remonte vers 10 kHz (bruits de crustacés) avant de rechuter. (Bas) En rouge la courbe maximale atteinte sur tous les foil testés avec un niveau relatif de -63 dB contre -75 dB (+11 dB).

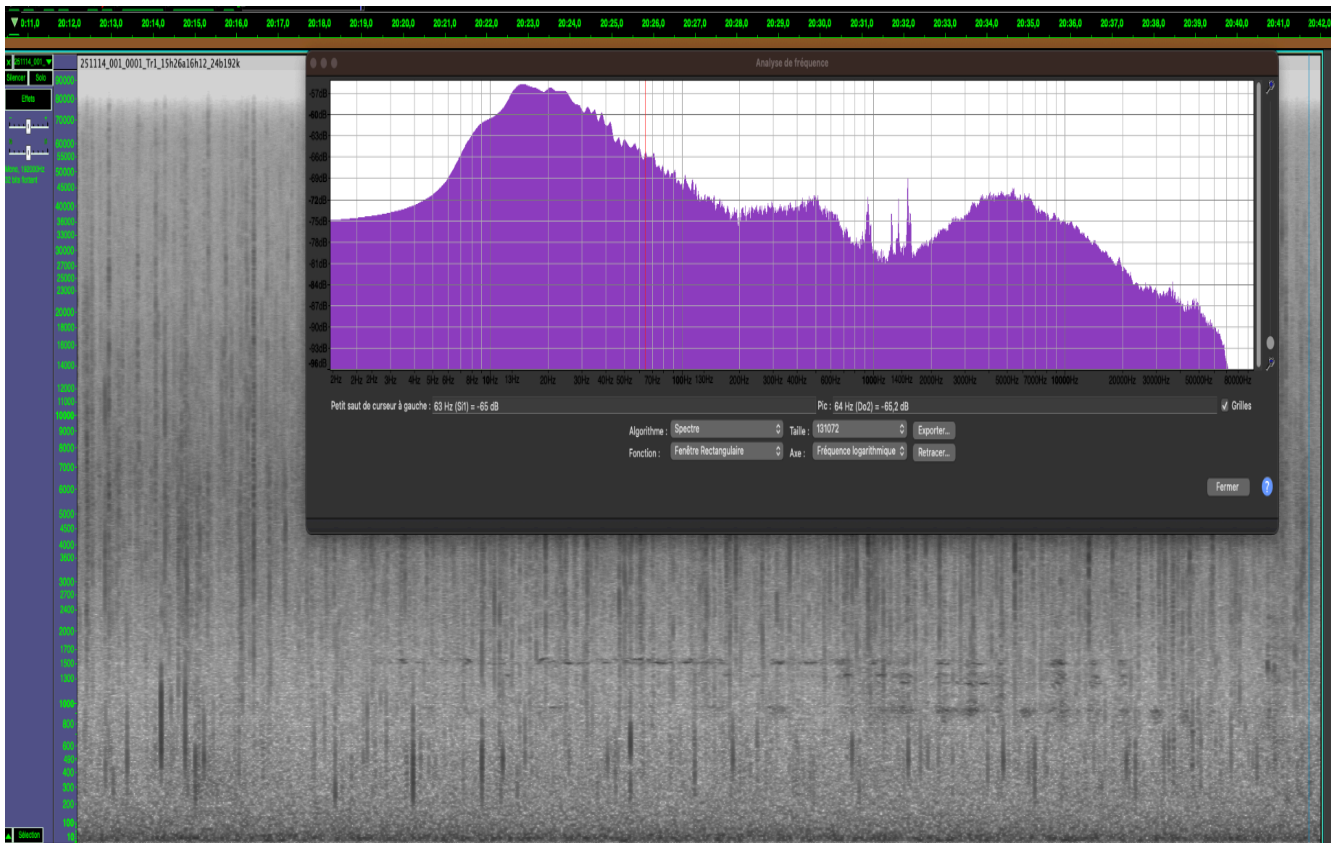


Figure 14 : Autre exemple signature, pour la combinaison C. Le pic à 1400 Hz est +10 dB (14:46 heure locale, heure enregistreur H+1).

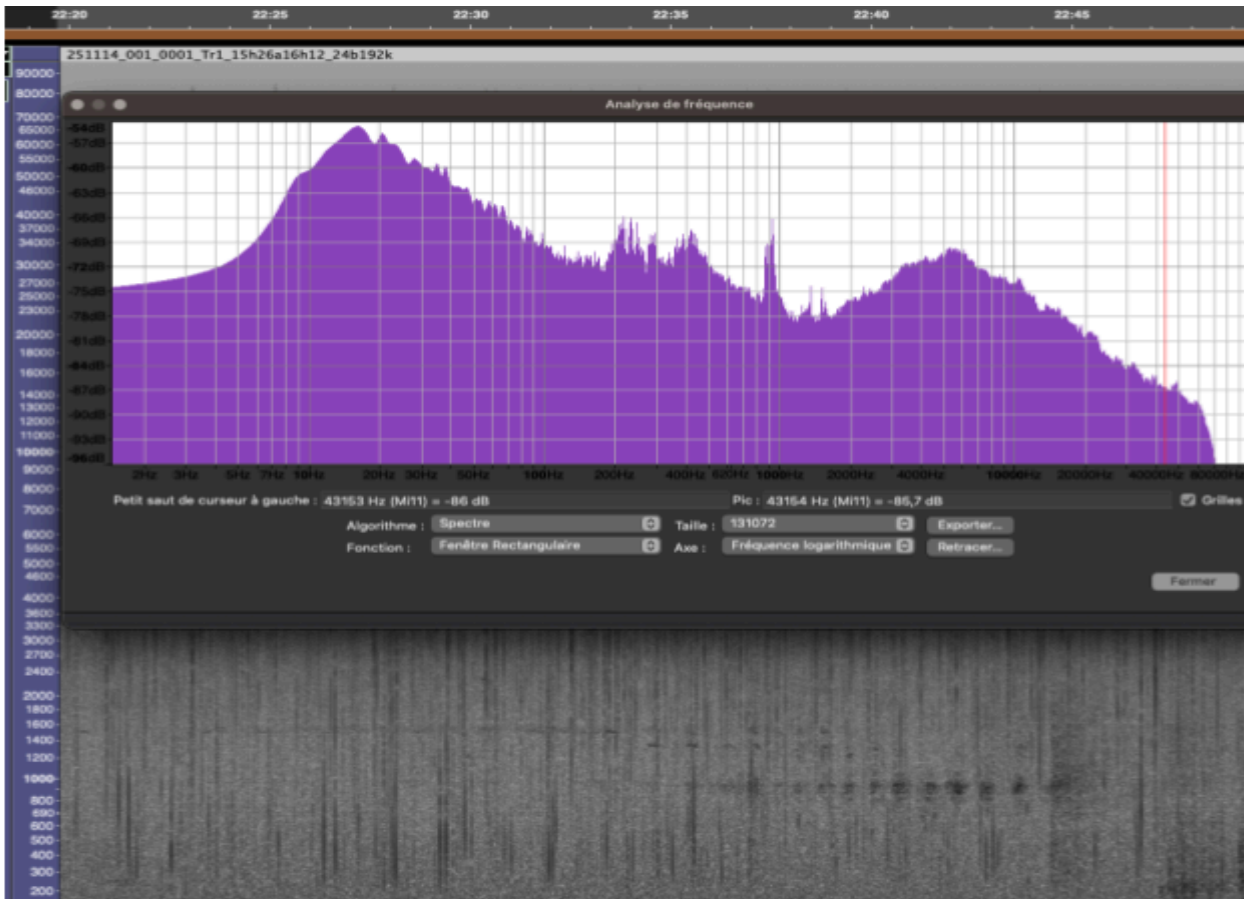


Figure 15 : Autre exemple de signature de la combinaison C, qui produit une séquence de pulses à intervalle de 1 s environ. Le pic à 1 kHz est à +10 dB (14:46 locale, heure enregistreur H+1).

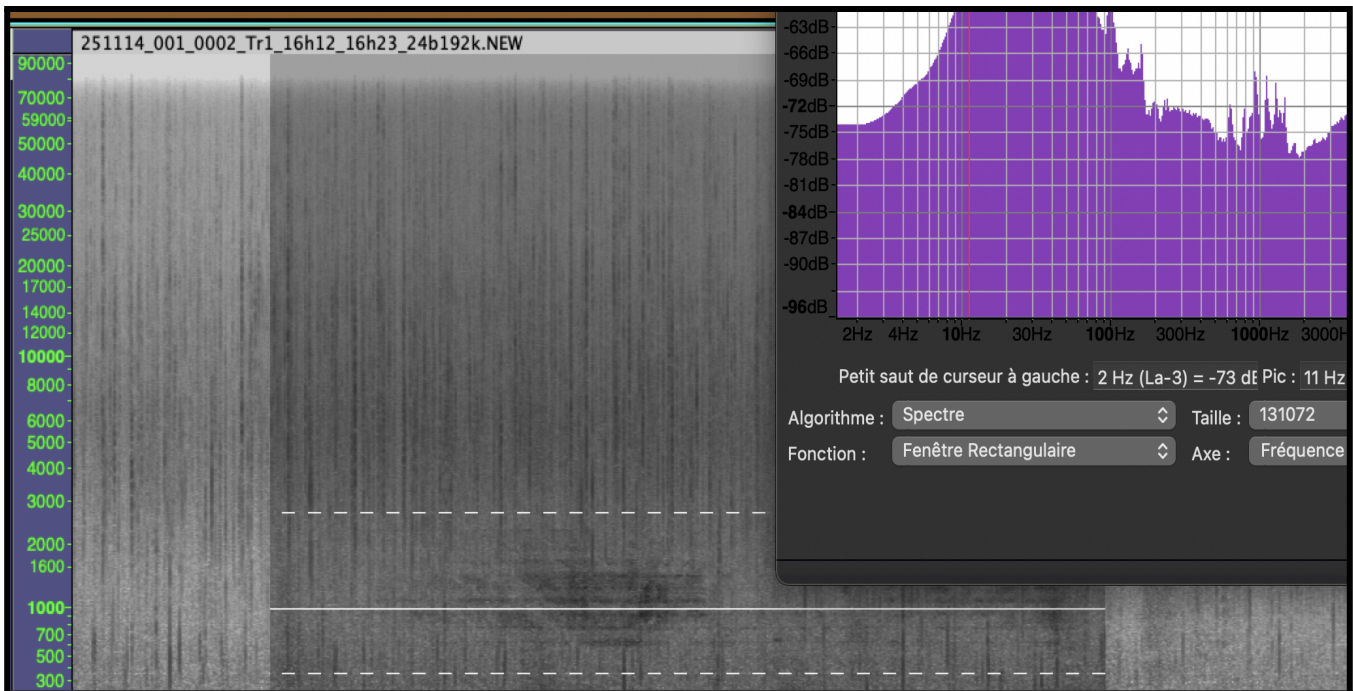


Figure 16 : Autre exemple de signature pour la combinaison C. Le pic à 1 200 Hz est à +10 dB (15:14 locale, heure enregistreur H+1).

# Détectabilité acoustique par la faune

## Estimation de la détectabilité par les tortues marines

Les mesures de la section précédente sont reportées dans les audiogrammes, après calibration de la chaîne d'acquisition.

La première comparaison (Fig.17) est sur l'état de l'art de la sensibilité de l'audition de la tortue marine la plus fréquente en Méditerranée: la Tortue Couanne.

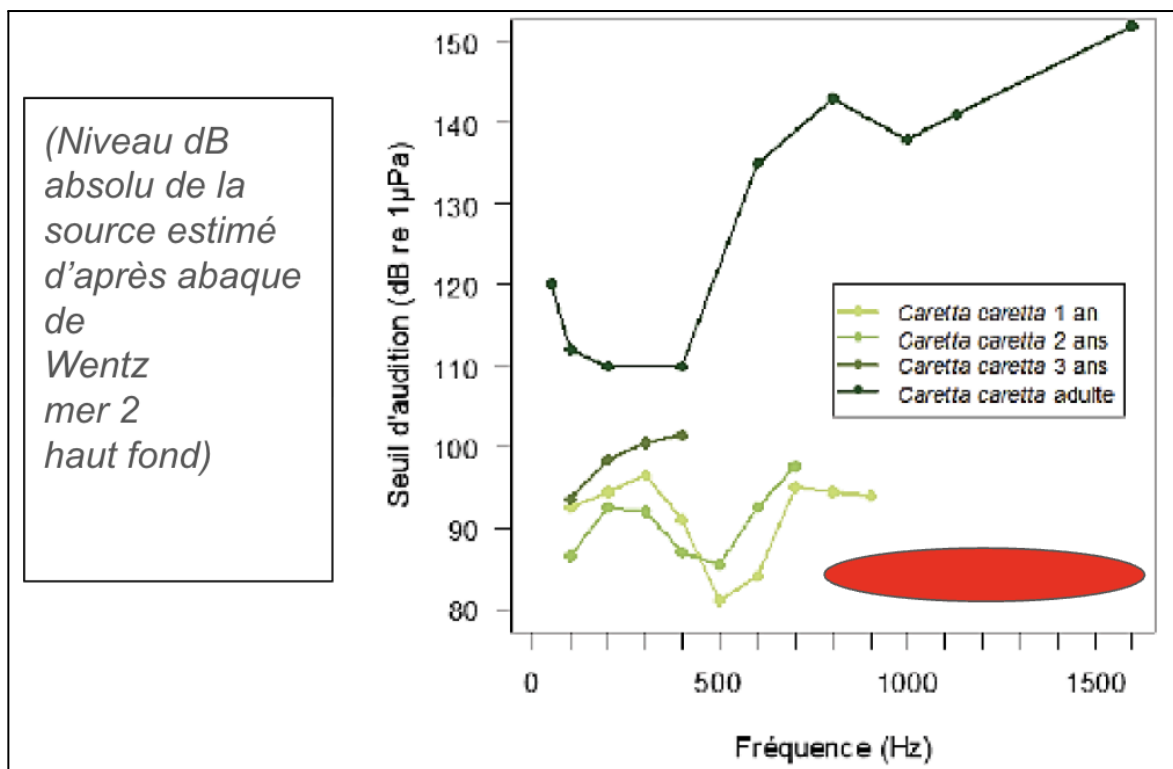


Figure 17 : Audiogrammes de tortue Caouanne suivant son âge de 1 an à l'adulte (Piniak, 2012). Nous avons rajouté (zone rouge) l'émission maximale estimée par nos enregistrements d'un foil de wingfoil. Cette zone est sous le seuil d'audition de cette espèce, à tout âge, donc l'espèce est sourde à ces signaux. Au mieux, à forte vitesse, la signature du foil pourrait gagner grandir en dB et frôler le seuil des tortues de moins de 2 ans, qui pourraient alors l'entendre.

Les audiogrammes d'autres tortues marines (Fig.18) sont similaires à celui de la tortue Caouanne, c'est-à-dire qu'elles sont sourdes dès 700 Hz. Les sources du foil du wingfoil sont supérieures à 1 kHz, elles sont donc inaudibles pour les tortues marines.

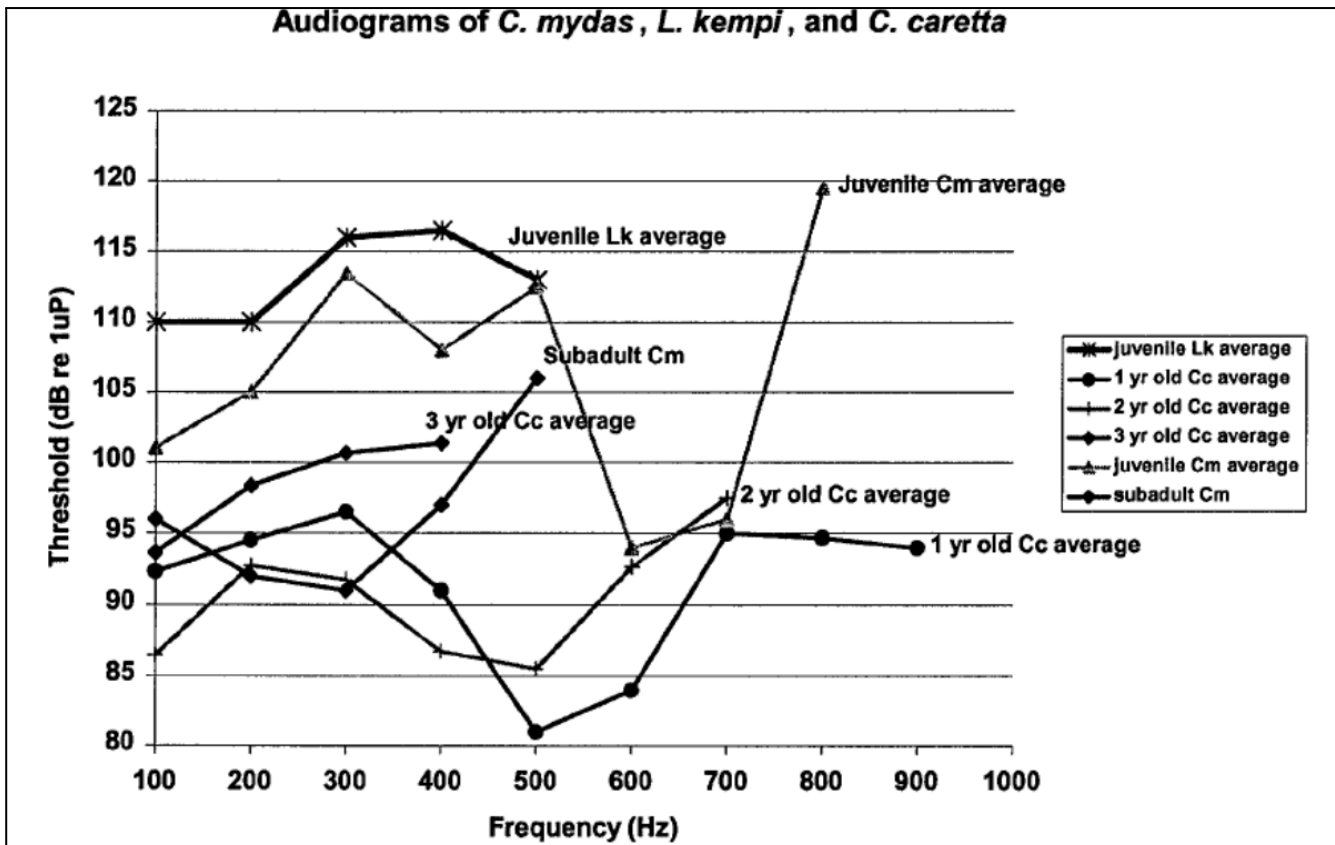


Figure 18 : Audiogrammes d'autres tortues marines démontrant leur surdité d  s 800 Hz (Bartol & Ketten, 2006).

## Estimation de la détectabilité du foil par les cétacés

L'estimation de la détection par l'audition des cétacés, mysticètes (Rorqual) et odontocètes (delphinid   notamment) est donnée par l'audiogramme de référence (tiré de Best *et al.*, 2019, lui-même de la NOAA, 2016, Fig.18). Il démontre que la signature est en fréquence et dB au-dessus des seuils d'audition des cétacés.

Tous les cétacés, et les pinnipèdes, perçoivent la source.

  tant donnée les niveaux mesurés dans cette expérience, en augmentant la distance de la source à 50 m environ, les odontocètes pourraient ne plus percevoir ce bruit du foil.

En revanche, le rorqual continuerait de le percevoir à 100 m au moins.

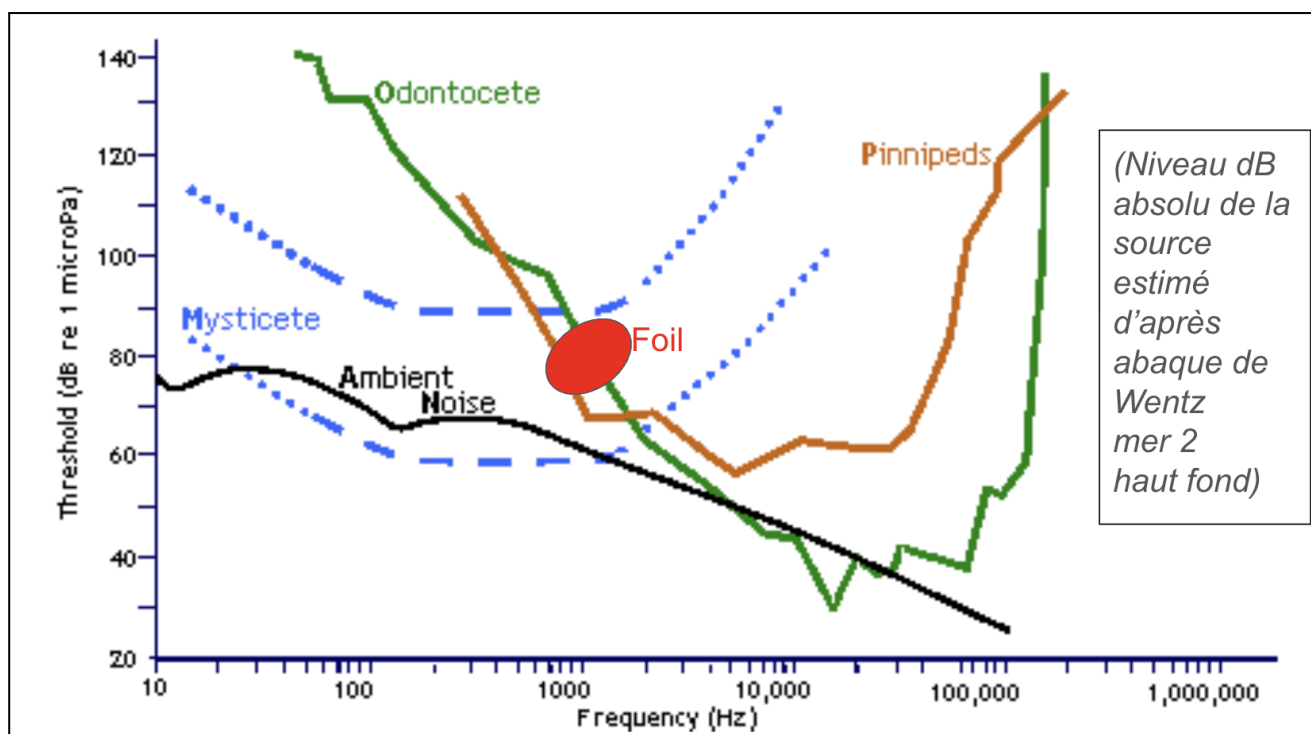


Figure 19 : Audiogrammes de mammifères marins (delphinidé et ziphiidae = odontocètes), rorqual (mysticète), phoque (pinnipède), et courbe du niveau de bruit ambiant (par état de mer 2 en haut fond), et niveau en fréquence et dB de la source foil d'un wingfoil (d'après Best et al., 2019 et NOAA, 2016).

## Effet à long terme (SEL)

Nous ajoutons ici une analyse du risque de l'exposition à long terme à ce type de signal stationnaire. La mesure s'appelle le SEL : mesure de référence d'exposition à long terme de la faune à une source acoustique, c'est à dire le "Cumulative Sound Exposure Level (SEL)" dont la définition, et les seuils en dB, par groupe de faune (basse à haute fréquences d'audition), sont donnés pour un impact temporaire sur le système auditif de l'animal (TTS), versus un impact permanent (PTS) (Tab.1).

Cette table démontre, quel que soit le groupe d'audition considéré, le seuil SEL au plus bas de 153 dB. Ce seuil est bien plus haut que le plus haut niveau de relevé dans les mesures d'émissions du foil de wingfoil de cette expérience. Cela resterait vrai même en doublant la vitesse du wingfoil. Cette comparaison permet d'affirmer que le foil de wingfoil ne peut pas engendrer de perturbation du système auditif de la mégafaune (tortues ou cétacés).

Table 1 : Niveaux des seuils dB SEL engendrant par type d'espèce (LF : audiogramme Low Frequency, Medium MF, High HF) des lésions temporaires TTS versus permanentes PTS de leur système auditif (d'après Best et al., 2019 reprenant National Marine Fisheries Service 2016-2018).

$W(f) = C + 10 \log_{10} \left\{ \frac{(f/f_1)^{2a}}{\left[1 + (f/f_1)^2\right]^b \left[1 + (f/f_2)^2\right]^b} \right\}$						Non-impulsive	
						TTS Threshold	PTS Threshold
Group	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>f</i> <sub>1</sub> (kHz)	<i>f</i> <sub>2</sub> (kHz)	<i>C</i> (dB)	SEL (Weighted)	SEL (Weighted)
LF	1	2	0.20	19	0.13	179	199
MF	1.6	2	8.8	110	1.20	178	198
HF	1.8	2	12	140	1.36	153	173
SI	1.8	2	4.3	25	2.62	186	206
OW	2	2	0.94	25	0.64	199	219
PW	1	2	1.9	30	0.75	181	201

## Discussion

Les niveaux acoustiques relevés du foil de wingfoil sont très faibles comparés aux niveaux dérangeants (Tab.2).

Le foil de wingfoil ne présente donc aucun risque de traumatisme acoustique pour la faune.

D'autre part, il est très clairement entendu à faible (et encore mieux à grande) vitesse par les cétacés (mysticètes et odontocètes). Les réflexes de nage rapide de cette faune à cette source acoustique incongrue dans leur milieu (c'est-à-dire un signal acoustique qui se détache bien du bruit ambiant) leur permettrait une manœuvre suffisante pour éviter une collision.

Table 2 : Les niveaux dB et durée des émissions de pollution anthropophonique usuelle (Best et al., 2019, reprenant National Marine Fisheries Service 2016-2018). Les mesures, par la nature impulsive ou stationnaire des signaux, sont en Peak to Peak ou en RMS. Le niveau le plus faible est celui des répulsifs acoustiques pour repousser la faune, et est de l'ordre de 132 dB pour une fréquence de 5 kHz.

Activity	Source	Source level (dB re 1µPa m)*	Bandwidth (Hz)	Major amplitude (Hz)	Duration (ms)	Directionality
Sonar	Military sonar low frequency	235 Peak	100 – 500		6000 – 100,000	Horizontally focused
	Military sonar mid frequency	223 – 236 rms	2800 – 8200	3500	500 – 2000	Horizontally focused
	Echosounders	235 Peak	Variable	Variable 1500 – 36000	5 – 10 ms	Vertically focused
Seismic	Airgun array	260 – 262 P-to-P	10 – 100 000	10 – 120	30- 60	Vertically focused
Coastal and offshore works	TNT (0.5 – 50 kg)	272 – 287 Peak	2 – 1000	6 – 21	1 - 10	Omnidirectional
	Pile driving	228 Peak / 243 – 257 P-to-P	20 – 20 000	100 – 500	50	Omnidirectional
	Dredging (CSD)	172 – 185 rms	30 – 20 000	100 – 500	Continuous	Omnidirectional
	Drilling	145 – 190 rms**	10 – 10 000	< 100	Continuous	Omnidirectional
	Dredging (TSHD)	186 – 188 (rms)	30 – 20 000	100Hz-500Hz	Continuous	Omnidirectional
Shipping	Small boats and ships	160 – 180 rms	20 – 10 000	> 1000	Continuous	Omnidirectional
	Large vessel	180 – 190 rms	6 – 30 000	> 200	Continuous	Omnidirectional
Other activities	Acoustic deterrent / harassment devices	132 – 200 Peak	5000 – 30 000	5000 – 30 000	Variable 15 – 500 ms	Omnidirectional
	Tidal and wave energy devices	165 – 175 rms***	10 – 50 000		Continuous	Omnidirectional

Au niveau du risque de collision pour les tortues, il faut analyser la question suivant leur âge. En effet, le comportement de nage des tortues diffère suivant leur âge. Ainsi l'expert de ce sujet, Dr Hugo Bourgogne au PNPC, précise que la tortue Caouanne (espérance de vie moyenne d'environ 70 ans), a une maturité sexuelle tardive (atteinte entre l'âge de 15 à 30 ans selon les sources). Elle présente une évolution ontogénique de ses habitats de vie : après l'éclosion, les nouveau-nés rejoignent les espaces pélagiques où ils dérivent essentiellement passivement en la quasi-absence de réelles capacités de déplacements actifs, pendant environ 10 ans. Une fois une taille de carapace d'environ 30 cm atteinte, les juvéniles sortent des courants océaniques majeurs et rejoignent des habitats côtiers où ils s'installent et adoptent leur régime alimentaire spécifique. La Caouanne est majoritairement carnivore (crustacés et mollusques). Une fois la maturité sexuelle atteinte, mâles et femelles participent à des migrations pour aller se reproduire à proximité des plages où ils sont nés.

Il en est de même pour la tortue verte *Chelonia mydas*, avec des juvéniles qui mènent une vie pélagique où ils dérivent passivement sur de longues distances, le plus souvent sur des radeaux d'algues qui leur servent de refuge, et ne fréquentent les côtes qu'une fois adultes. Les juvéniles s'installent sur les côtes à partir d'environ 10 ans, et il peut donc se passer 5 à 20 ans avant qu'ils ne deviennent sexuellement matures (et donc adultes). A noter cependant des déplacements actifs de jeunes tortues pour *Chelonia mydas* mis en évidence récemment (Putman & Mansfield, 2015), et pour *Caretta caretta* (Mansfield *et al.*, 2017). Une autre étude récente (Phillips *et al.*, 2025) questionne la distribution uniquement pélagique de cette phase de vie, avec des suivis télémétriques de juvéniles Cm et Cc qui ont mis en évidence une présence dans les eaux pélagiques et dans les zones de moins de 200 m de profondeur.

Pour la tortue Luth, elle reste inféodée à l'écosystème pélagique toute sa vie, ne s'approchant des littoraux que pour des activités de reproduction. On peut supposer que les juvéniles dérivent également au large de manière essentiellement passive au cours des premières années de vie.

Donc, par rapport aux résultats de l'étude, si une tortue juvénile pouvait entendre le foil, elle vit au large loin des activités de wingfoil. Donc le fait qu'elle ait peu de capacités d'évitement par la nage n'est pas un risque accru pour les juvéniles, en dehors des premières heures après leur naissance.

En revanche, les adultes retournent pour la ponte vers les plages proches de leur naissance. On donc va retrouver dans ces habitats côtiers non seulement les adultes sur leurs habitats de reproduction, mais également des juvéniles âgés d'au moins 10 ans et des adultes sur leurs habitats d'alimentation. Les plus âgées (> 3 ans) ne peuvent pas entendre le foil du wingfoil, mais seraient capables de nager et d'éviter une collision s'ils perçoivent visuellement ce foil, dans le temps imparti, qui peut n'être que de quelques secondes pour une vitesse de 10 km/h du wingfoil.

Il pourrait donc être intéressant d'augmenter la visibilité du foil d'un wingfoil durant la saison de ponte pour favoriser une réaction des tortues adultes. Par exemple, il pourrait être discuté avec les experts de cette pratique, de peindre suivant le spectre de vision des tortues, ou en clair brillant, le mat sous-marin du wingfoil, ou de lui fixer une mini led flash clignotante qui serait un signal visible à 10 m environ. Il n'y a pas de risque de confusion entre de foil et leurs proies qui sont des crustacés et mollusques sur les herbiers marins.

# Conclusion

L'existence d'une signature acoustique du foil de wingfoil est démontrée dans cette étude pionnière. Elle y est caractérisée pour des vitesses de navigation faible à moyenne dans une mer calme. Les conditions de vent et de mer avaient été choisies pour assurer une mesure acoustique sans perturbation géophonique (bruit des vagues et vent). Si cela limita un peu en vitesse les évolutions du wingfoil, sa fréquence d'émission ne devrait pas évoluer significativement en fonction de sa vitesse, en revanche son énergie acoustique est corrélée non linéairement à sa vitesse comme tout phénomène de traînée.

Les niveaux dB mesurés ici sont attendus supérieurs de quelques dB pour une évolution par 15 km/h de vent. Ce gain en vitesse ne modifiera pas les conclusions de cette expérience.

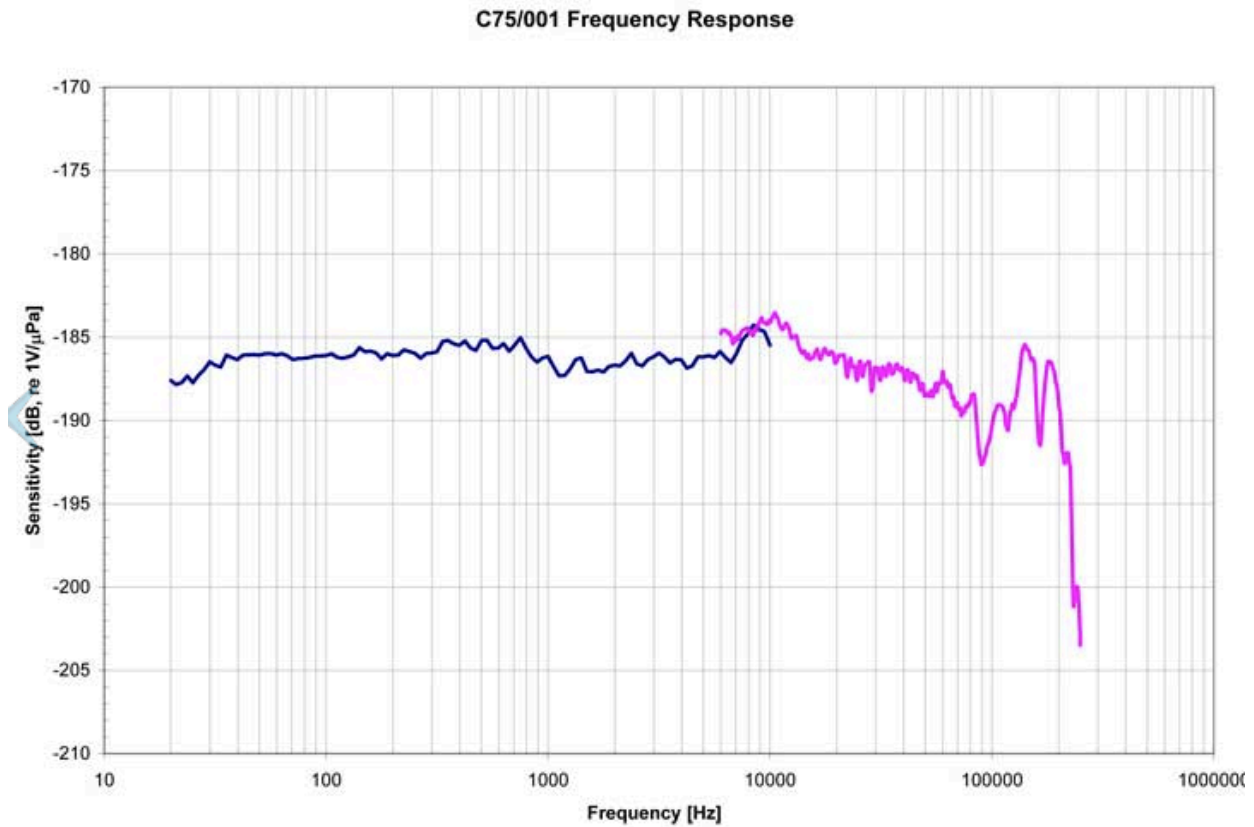
D'autre part ce signal est audible par tous les cétacés, mais ne génère aucun impact acoustique sur les cétacés, ni temporaire ni létal. Les cétacés sont donc alertés de ce passage.

La signature d'un foil de wingfoil est donc inaudible pour les tortues marines adultes, mais pourrait être légèrement audible pour les juvéniles. En revanche, un grand nombre de foils de wingfoils évoluant dans une même zone pourraient conduire à une somme de leur niveau sonore qui deviendrait audible. Ce phénomène serait d'autant plus probable par fort vent. En se basant sur cette étude qui détermine la fréquence d'émission d'un unique foil de wingfoil, il nous est maintenant possible de mettre en place un protocole simple pour estimer la résultante acoustique d'une pluralité de foils de wingfoils dans une baie à forte activité, par vents moyen à fort, comme celle de l'Almanarre à Hyères l'été.

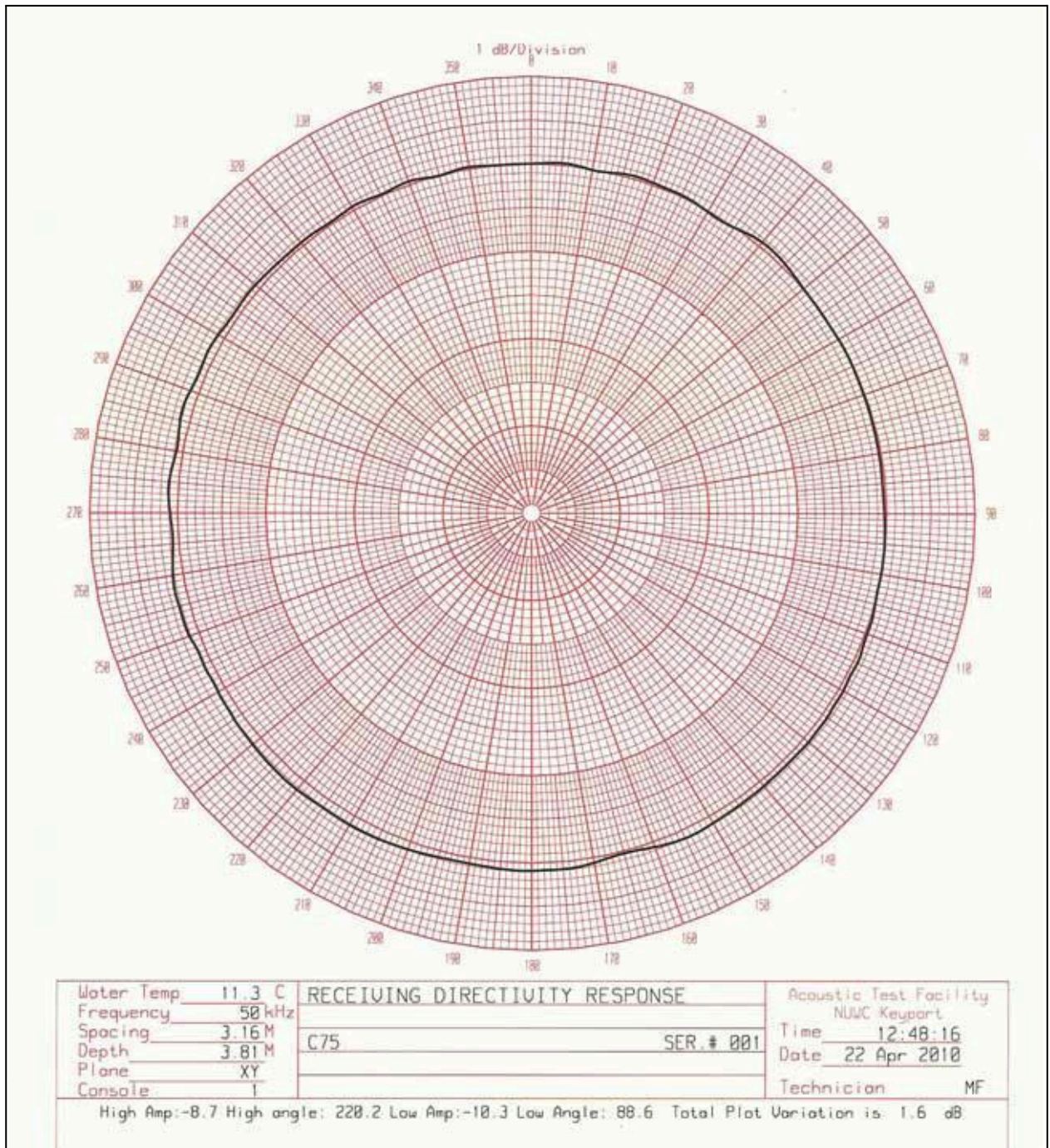
Ce protocole ne dérangerait pas les pratiquants de wingfoil, car il s'agirait de notre station acoustique tripode (Fig.4), immergée par -10 m environ, sans câble ni bouée surface. Cette mesure aurait un double intérêt : (i) estimer l'effet d'une activité de wingfoils plus rapides, concentrée dans une zone d'intérêt pour des tortues marines, et (ii) tester l'hypothèse de l'effet cumulatif d'émissions acoustiques simultanées de plusieurs pratiquants de wingfoils. Ces derniers seraient dénombrés sur une vidéo et par un observateur sur site, durant quelques jours à l'été par différentes conditions de vent.

# Annexes

## A1. Sensibilité en fréquence et angle de l'hydrophone C75



	<b>C75 / C75X</b>
<b>Linear Frequency Response Range (±3dB) [kHz]</b>	0.010 to 170
<b>Usable Frequency Range (+3/-12dB) [kHz]</b>	0.003 to 250
<b>Transducer Sensitivity* [dB, re 1V/μPa]</b>	-200
<b>Preamplifier Gain [db]</b>	20 / 33
<b>Effective Sensitivity* [dB, re 1V/μPa]</b>	-180 / -167
<b>SPL Equiv. Self Noise at 1kHz [dB, re 1μPa/√Hz]</b>	51
<b>Power Requirement [Vdc]</b>	5 to 32
<b>RMS Overload Acoustic Pressure [dB, re 1μPa]</b>	184 to 201 / 171 to 188
<b>Directionality</b>	omnidirectional



Cet hydrophone est omnidirectionnel jusqu'à plus de 50 kHz.

## A2. Sensibilité en fréquence de l'hydrophone C57

UNIVERSITY OF WASHINGTON - APPLIED PHYSICS LABORATORY

R/V HENDERSON ACOUSTIC TEST FACILITY

DATE: 5/14/2018

TIME: 14:34:54

Cetacean Research

NOIT

C57-1K 3-35kHz SN807

TRANSMIT WINDOW START POSITION: 0.82 mS

TRANSMIT WINDOW SIZE: 0.71 mS

RECEIVE WINDOW START POSITION: 2.96 mS

RECEIVE WINDOW START POSITION: 0.71 mS

DATA FILE NAME: C:\Projects\Cetacean Research\2018-05-14 C57-1K4 C57-1K-807\C57-1K-807 3-150kHz.FVS

REFERENCE TRANSDUCER: F37 Transducer

REFERENCE TRANSDUCER S/N: A51

REFERENCE TRANSDUCER CAL TEMPERATURE: 20.0 deg C

ARBITRARY WAVEFORM VOLTAGE: 1.00 Vrms

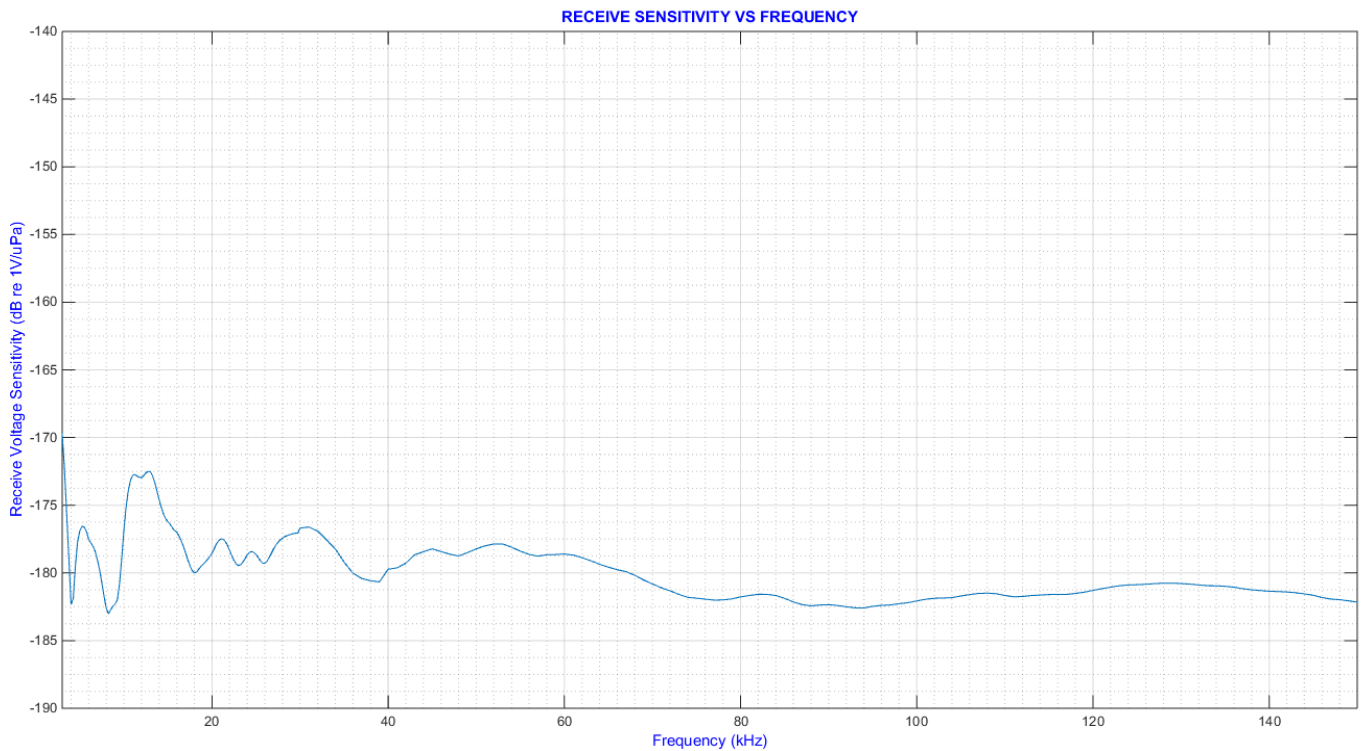
RECEIVER GAIN: 0.0dB

RANGE: 3.17 meters

DEPTH: 2.13 meters

WATER TEMPERATURE: 17.8 deg C

AVERAGE PING COUNT: 3



Cet hydrophone n'est omnidirectionnel que jusqu'à 10 kHz.

### A3. Sensibilité en fréquence de l'hydrophone SQ26

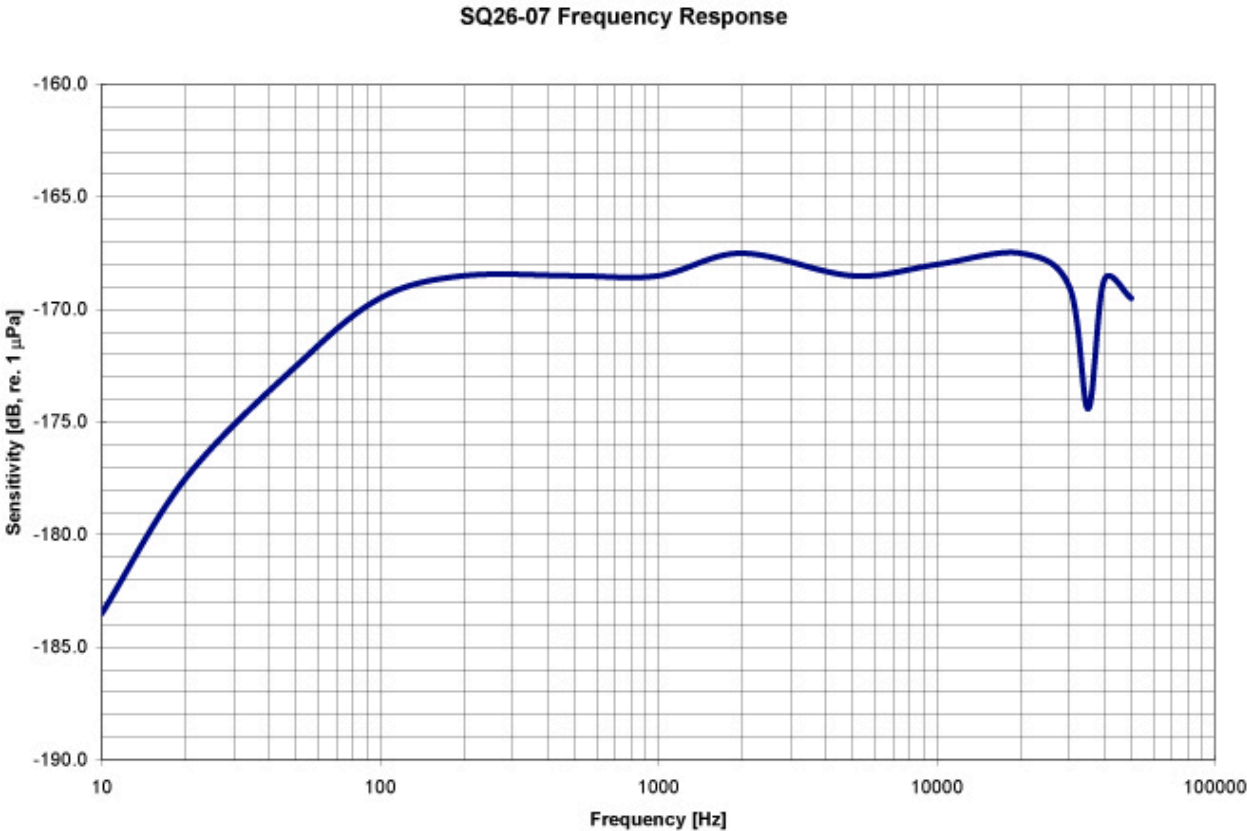


Figure : sensibilité SQ26-07 d'après Cetacean Research  
Cet hydrophone n'est omnidirectionnel que jusqu'à 10 kHz.

## Références bibliographiques

ACCOBAMS (2013). Anthropogenic noise & marine mammals: review of the effort in addressing the impact of anthropogenic underwater noise in the ACCOBAMS & ASCOBANS areas

ANSI (American Nat. Standards Inst.) (2013). Acoustic Terminology (ANSI S1.1-2013). Acoustical Soc. of America

Best, P., Ferrari M., Glotin H., Poupard M. (2019). Impact of Anthropogenic Sounds on Marine Mammals, Monitoring. Techniques & Application to the Abyssound Project. Research Report, Univ. Toulon. hal03211896

Bartol and Ketten (2006). Functional Measures of Sea Turtle Hearing, ONR Report, USA

Bourgogne H (2024). Caractérisation et enjeux de conservation d'une zone de ponte de tortues caouannes (*Caretta caretta*) appartenant à la population en danger critique d'extinction du pacifique sud - le Grand Lagon Sud de Nouvelle-Calédonie, Univ. Nouvelle Calédonie

Dekeling, R.P.A. *et al.* (2014). Monitoring Guidance for Underwater Noise, in European Seas, Part III: Background Information and Annexes, JRC Scientific and Policy Report EUR 26556 EN, Pub. Office of the European Union, doi:10.2788/2808

Finneran (2016). Auditory Weighting Functions and TTS/PTS Exposure Functions for Marine Mammals Exposed to Underwater Noise.

IUCN (2016). Marine mammals and sea turtles of the Mediterranean and Black Seas, Gland, Switzerland and Malaga, Spain. IUCN, 32p

Mansfield K. L., Mendilaharsu M.L. *et al.* (2017). First satellite tracks of South Atlantic sea turtle 'lost years': seasonal variation in trans-equatorial movement. *Proc Biol Sci*; 284 (1868) <https://doi.org/10.1098/rspb.2017.1730>

National Marine Fisheries Service (2016-2018), Tech. Guidance for Assessing the Effects of Anthropogenic Sound on Marine Mammal Hearing: Underwater Acoustic Thresholds for Onset of Permanent & Temporary Threshold Shifts. Tech. Memorandum NMFS-OPR-55 (V1) & -59 (V2) U.S. dpt. of Commer., NOAA, Silver Spring, MD

Phillips K.F., Putman N.F., Mansfield K.L. (2025). New insights on sea turtle behaviour during the 'lost years'. *Proc Biol Sci*; 292 (2040): <https://doi.org/10.1098/rspb.2024.2367>

Piniak D. (2012). Acoustic Ecology of Sea Turtles: Implications for Conservation, Phd thesis

Putman N., Mansfield K. (2015). Direct Evidence of Swimming Demonstrates Active Dispersal in the Sea Turtle “Lost Years”, in *Current Biology*. 25, 1221-1227

Stöber, F. Thomsen (2019). Effect of impact pile driving noise on marine mammals: A comparison of different noise exposure criteria. *The Journal of the Acoustical Society of America* 145, 3252 (2019); doi: 10.1121/1.5109387.