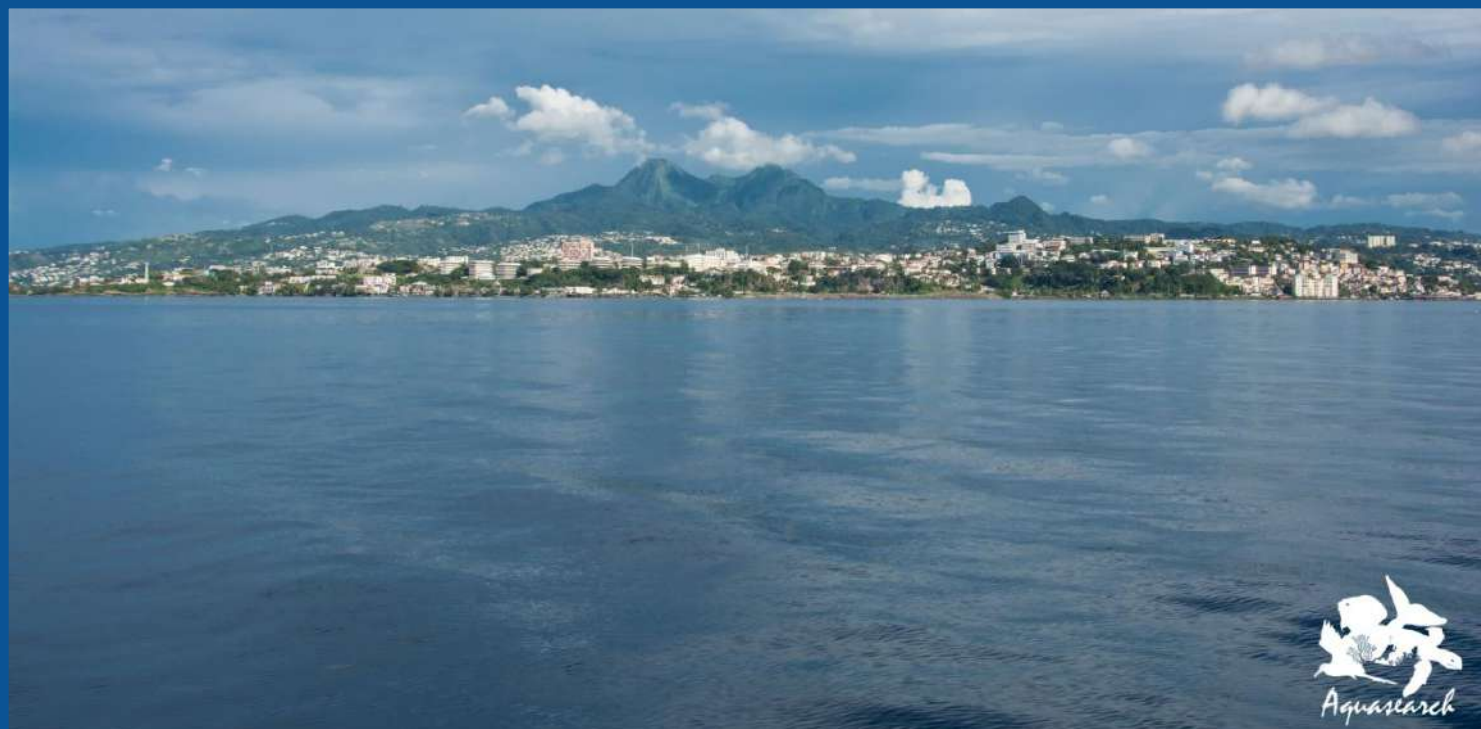




CARACTÉRISATION DES NIVEAUX DE BRUITS DE LA BAIE DE FORT-DE-FRANCE



Juillet 2024



CARACTÉRISATION DES NIVEAUX DE BRUITS DE LA BAIE DE FORT-DE-FRANCE

Rapport final

Juillet 2024

Mots clés : Martinique, Mesure dB, acoustique, impact anthropique, cétacés

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :

Poupard M., Ortole C., Gros-Martial A., Safi. M. & de Montgolfier B. (2024) *Caractérisation des niveaux de bruits de la baie de Fort-de-France, Rapport Final, 53 pages.*

TABLE DES MATIÈRES

| | | |
|-----------|--|-----------|
| 1. | CONTEXTE | 5 |
| 1.1 | LE BRUIT AMBIANT | 5 |
| 1.2 | LA BAIE DE FORT-DE-FRANCE | 6 |
| 2. | MATÉRIEL ET MÉTHODES | 8 |
| 2.1 | MOYEN NAUTIQUE | 8 |
| 2.2 | MATÉRIEL ACOUSTIQUE | 9 |
| 2.2.1 | CARTOGRAPHIE DE LA BAIE DE FORT-DE-FRANCE | 9 |
| 2.2.2 | MESURES DE BRUITS DURANT LE TOUR DES YOLES ET LA MERCURY BEACH | 12 |
| 2.3 | CALCULS DU NIVEAU D'ÉNERGIE | 13 |
| 2.4 | INTERPOLATION ET CARTE DES NIVEAUX SONORES | 13 |
| 3. | RÉSULTATS | 14 |
| 3.1 | EFFORT D'ÉCHANTILLONNAGE | 14 |
| 3.2 | ÉVÉNEMENTS ACOUSTIQUES ANTHROPIQUES | 15 |
| 3.2.1 | NAVETTES MARITIMES | 15 |
| 3.2.2 | NAVIRES DE COMMERCE | 17 |
| 3.2.3 | PASSAGE D'UN AVION | 18 |
| 3.3 | ANALYSE DES NIVEAUX DE BRUITS | 19 |
| 3.3.1 | NIVEAUX DE BRUIT DURANT LE JOUR | 19 |
| 3.3.2 | NIVEAUX DE BRUIT DURANT LA NUIT | 22 |
| 3.3.3 | COMPARAISON JOUR/NUIT | 25 |
| 3.3.4 | COMPARAISON SAISON HAUTE ET SAISON BASSE | 27 |
| 3.3.5 | RÉSULTATS DE LA MERCURY BEACH | 28 |
| 3.3.6 | RÉSULTATS DU TOUR DES YOLES | 30 |
| 4. | DISCUSSION | 34 |
| 4.1 | NIVEAUX DE BRUITS DANS LA BAIE | 34 |
| 4.2 | NIVEAUX DE BRUITS DES ÉVÈNEMENTS NAUTIQUES | 36 |
| 4.3 | POLLUTION SONORE ET IMPACTS SUR LES CÉTACÉS | 36 |
| 5. | CONCLUSION ET PRÉCONISATIONS | 39 |
| 6. | BIBLIOGRAPHIE | 41 |
| 7. | ANNEXES | 43 |
| | Annexes A: Spécificité de l'hydrophone utilisé (CR3) | 43 |
| | Annexe B - Listes des bandes de fréquences en tiers d'octave | 45 |
| | Annexe C - Résultats des tests statistiques | 46 |

| | |
|--|----|
| Tests statistiques durant le jour | 46 |
| Tests statistiques durant la nuit..... | 46 |
| Tests statistiques jours/nuit..... | 46 |
| Tests statistiques saison haute/basse | 46 |
| Annexe D - Cartographies des niveaux dB | 47 |
| Annexe E – Caractéristiques techniques du matériel..... | 51 |
| Annexe F – Représentation du parcours de l'étape 4 | 52 |

LISTE DES FIGURES

| | |
|--|----|
| Figure 1: Composition du paysage sonore sous-marin. | 6 |
| Figure 2: Carte du trafic maritime de la baie de Fort-de-France (2022). Données issues des AIS, intégrant uniquement les navires équipés d'émetteurs. Source : Marine Traffic..... | 7 |
| Figure 3: Le bateau d'Aquasearch | 8 |
| Figure 4: Carte représentant les 21 points acoustiques échantillonnés dans la baie. | 11 |
| Figure 5: Gauche : Hydrophone CR3 avec ses 30m de câble. Droite : la carte d'acquisition SpectraDaQ-200..... | 12 |
| Figure 6: Exemple du parcours réalisé durant une sortie en partant des Trois-Îlets. | 14 |
| Figure 7: Carte représentant les trajets des deux types de navettes fréquentant la baie de Fort-de-France. | 16 |
| Figure 8: Gauche : moyenne des dB avec et sans la navette. Droite : Évolution du niveau de bruit sur les 5 minutes d'enregistrements. | 17 |
| Figure 9: Gauche : moyenne des dB avec et sans le porte-conteneur (PC). Droite : Évolution du niveau de bruit sur les 5 minutes d'enregistrements..... | 17 |
| Figure 10: Occurrence des différents types de navires qui ont fait escale au port de Fort-de-France du 1er Novembre 2023 au 2 Février 2023 (93 jours) (Source : Grand Port Maritime de La Martinique - Capitainerie). | 18 |
| Figure 11: Comparaison de deux enregistrements avec et sans le passage d'un avion à une profondeur de 10 m. | 19 |
| Figure 12: Histogramme des Niveaux dB durant le jour et comparaisons du niveaux de bruits en fonction de la profondeur de l'hydrophone..... | 19 |
| Figure 13: Évolution du SPL en fonction des différentes fréquences et de la profondeur durant le jour. | 20 |
| Figure 14: Cartographie des niveaux dB pour la fréquence 160 Hz durant le jour. | 21 |
| Figure 15: Cartographie des niveaux dB pour la fréquence 18500 Hz durant le jour. | 22 |
| Figure 16: Histogramme des Niveaux dB durant la nuit et comparaisons du niveau de bruit en fonction de la profondeur de l'hydrophone. | 23 |
| Figure 17: Évolution du SPL en fonction des différentes fréquences et de la profondeur durant la nuit. | 23 |
| Figure 18: Cartographie des niveaux dB pour la fréquence 160 Hz durant la nuit..... | 24 |
| Figure 19: Cartographie des niveaux dB pour la fréquence 185000 Hz durant la nuit..... | 25 |
| Figure 20: Évolution des niveaux de bruits en fonction des fréquences et de la période (jour/nuit). | 26 |
| Figure 21: Évolution de la différence des niveaux dB entre le jour et la nuit en fonction des fréquences. | 26 |

*Caractérisation des niveaux de bruits de la baie de Fort-de-France, Rapport Final
Aquasearch - 2024*

| | |
|---|----|
| Figure 22: Comparaison des niveaux dB pendant la nuit (gauche) et pendant le jour (droite) pour la fréquence 160. | 27 |
| Figure 23: Comparaison des niveaux dB pendant la nuit (gauche) et pendant le jour (droite) pour 18 500 Hz. | 27 |
| Figure 24: Évolution des niveaux de bruits en fonction des fréquences et de la phase (basse/haute). .. | 28 |
| Figure 25: Comparaison des niveaux dB pendant la période touristique basse (gauche) et pendant la période touristique haute (droite) pour l'ensemble des fréquences. | 28 |
| Figure 26: Évolution des niveaux dB du 25/07 à 16h jusqu'au 27/07 à 22h pour les fréquences comprises entre de 2,5 kHz et 5 kHz. La période en rouge correspond à l'événement de la Mercury Beach, et la période verte correspond à l'arrivée des bateaux sur le site. | 29 |
| Figure 27: Évolution des moyennes des niveaux dB pour les fréquences comprises entre 2,5kHz à 5 kHz durant la Mercury Beach et avant l'événement. | 30 |
| Figure 28: Carte du passage des Yoles à 11h37 le 18 Juillet (Source : https://player.georacing.com) avec la position de l'hydrophone. | 31 |
| Figure 29: Évolution des niveaux dB du 11/07 à 16h jusqu'au 22/07 à 13h pour les fréquences comprises entre de 2,5 kHz et 5 kHz. La période en rouge correspond à l'arrivée des Yoles dans la baie de Grande Anse (11h à 13h le 21/07). | 31 |
| Figure 30: Évolution du niveau de bruit moyen par heure du 11/07 à 16h jusqu'au 22/07 à 13h pour les fréquences comprises entre de 5 kHz et 7.5 kHz. | 32 |
| Figure 31: Évolution des moyennes des niveaux dB pour les fréquences comprises entre 20 Hz à 2,5 kHz durant le passage des Yoles et sans l'événement. | 33 |
| Figure 32: Diagramme de Wenz (Miksis-Olds, Bradley, et Maggie Niu 2013). | 35 |
| Figure 33: Schéma des différents impacts potentiels des émissions sonores d'origines anthropiques (d'après Richardson, Greene, et Malme 2013). | 38 |

LISTE DES TABLEAUX

| | |
|--|----|
| Tableau 1 : Spécifications techniques du bateau. | 8 |
| Tableau 2: Positions des 21 points acoustiques dans la baie et des profondeurs associées | 10 |
| Tableau 3: Tableau récapitulatif des sorties réalisées | 15 |

1. CONTEXTE

La baie de Fort-de-France, située au Sud-Ouest de la Martinique est un lieu d'échanges où le trafic maritime est très important. Quotidiennement, des dizaines de navires fréquentent ces eaux et peuvent émettre des niveaux de bruits plus ou moins importants, provoquant une ambiance sonore bien particulière.

Dans ce contexte, le Grand Port Maritime de La Martinique (GPMLM) a mandaté le bureau d'étude Aquasearch pour réaliser une étude des niveaux de bruits de la baie de Fort-De-France ainsi que des propositions de mesures de gestion des navires, afin de limiter l'impact de ces derniers sur les cétacés.

L'objectif de cette étude est donc de caractériser le niveau de bruit de la baie en réalisant plusieurs missions durant le jour et la nuit et à différentes périodes de l'année.

1.1 LE BRUIT AMBIANT

Le bruit ambiant peut être très variable au niveau temporel, spatial et fréquentiel, particulièrement dans les milieux peu profonds (inférieur à 100m). Le premier phénomène qui va induire du bruit dans l'environnement est le phénomène météorologique. En effet, la houle, la marée, le vent, ou encore les précipitations vont provoquer un bruit important, la géophonie. Par exemple, l'étude de (Mathias, Gervaise, et Di Iorio 2016) a montré qu'à partir de 9 nœuds, le bruit induit par le vent pouvait couvrir des sons biologiques comme certains bivalves.

Le deuxième type de sons qui prend part dans un paysage sonore sous-marin est la biophonie, qui est le son émis (de manière volontaire ou non) par les organismes marins. Ces sons peuvent être produits par différents taxons (Hildebrand 2009), comme les invertébrés (bivalves, crustacés) (Schmitz 2002), par les poissons ou encore les mammifères marins (Melinger et al. 2007). Particulièrement dans les milieux peu profonds l'activité acoustique des poissons peut être très importante, et plus de 800 espèces de poissons ont déjà été identifiées comme émettant des sons (Rountree et al. 2006).

Le troisième et dernier type de son est l'anthropophonie, qui fait référence aux sons produits par les activités humaines dans l'environnement. Ces sons incluent une variété de sources générées par l'homme, et peuvent avoir un impact négatif sur la faune. Ces différents sons peuvent être associés à des activités particulières :

- Activité de navigation/transport (navettes, ferries, bateaux de croisières)
- Activité industrielle (pétroliers, forages, ...)
- Activités touristiques (jet ski, *whale-watching*, plaisance)
- Activités militaires (sonars, sous-marins, ...)

La géophonie, la biophonie et l'anthropophonie composent donc ce qu'on appelle le paysage sonore et sont cumulées dans l'environnement marin (Figure 1).

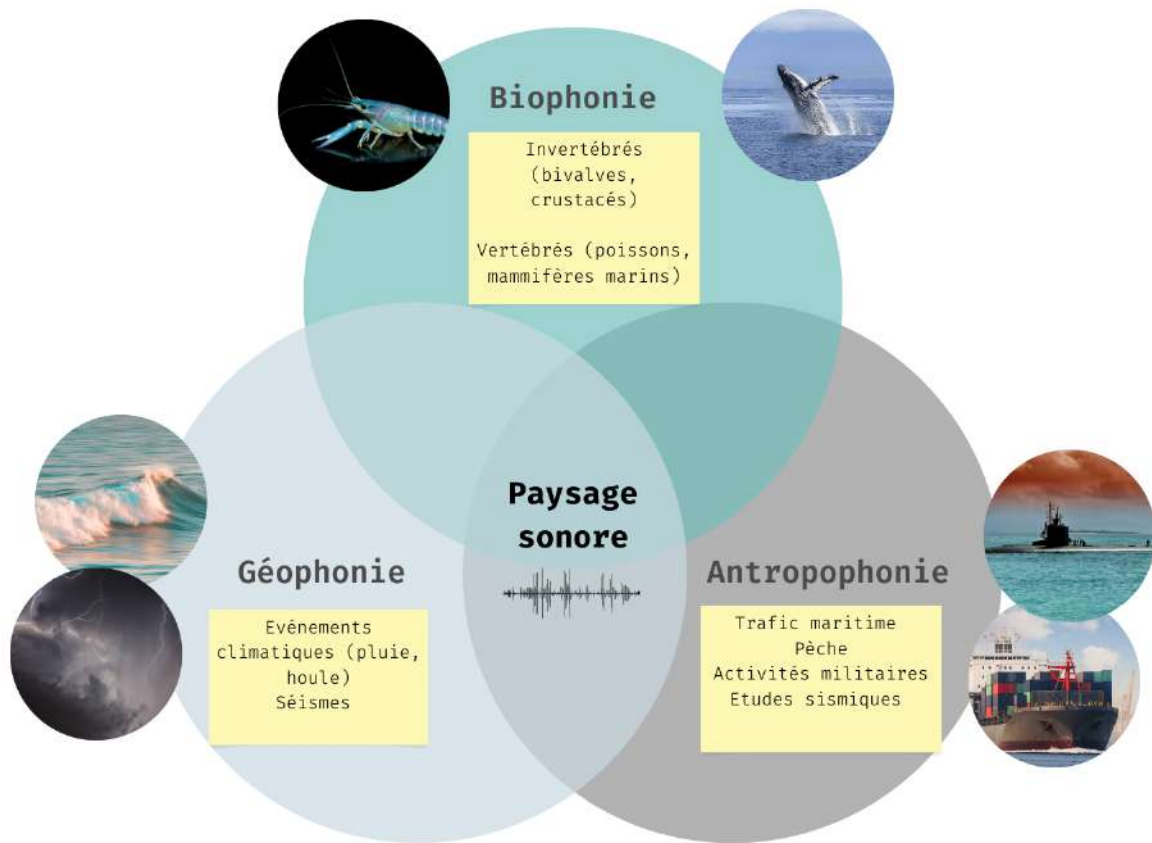


Figure 1: Composition du paysage sonore sous-marin.

1.2 LA BAIE DE FORT-DE-FRANCE

La baie de Fort-de-France est une zone de plus de 70 km² et comprend différents types d'écosystèmes comme des récifs coralliens, des mangroves, ou encore des fonds meubles (Durand et Saffache 2002). La profondeur de la baie varie de quelques mètres en fond de baie à plus de 500m de profondeur en entrée de baie. La zone est relativement peu profonde avec plus de 80% des fonds compris entre 0 et 20 m de profondeur. La baie est un milieu ouvert, peu profond qui est soumis à des conditions météorologiques très variables, la géophonie est donc très présente ainsi que la biophonie (présence de crustacés et de poissons). En plus de ces deux composantes, l'anthropophonie est également présente (Figure 2), car la baie abrite l'un des plus grands ports de la Caraïbe. La baie est donc très fréquentée par les porte-conteneurs, les pétroliers, mais également par le transport de passagers et les activités touristiques.

L'objectif de cette étude est d'enregistrer les bruits présents dans la baie, à différentes périodes temporelles et géographiques afin de catégoriser les niveaux de bruits émis dans la zone.

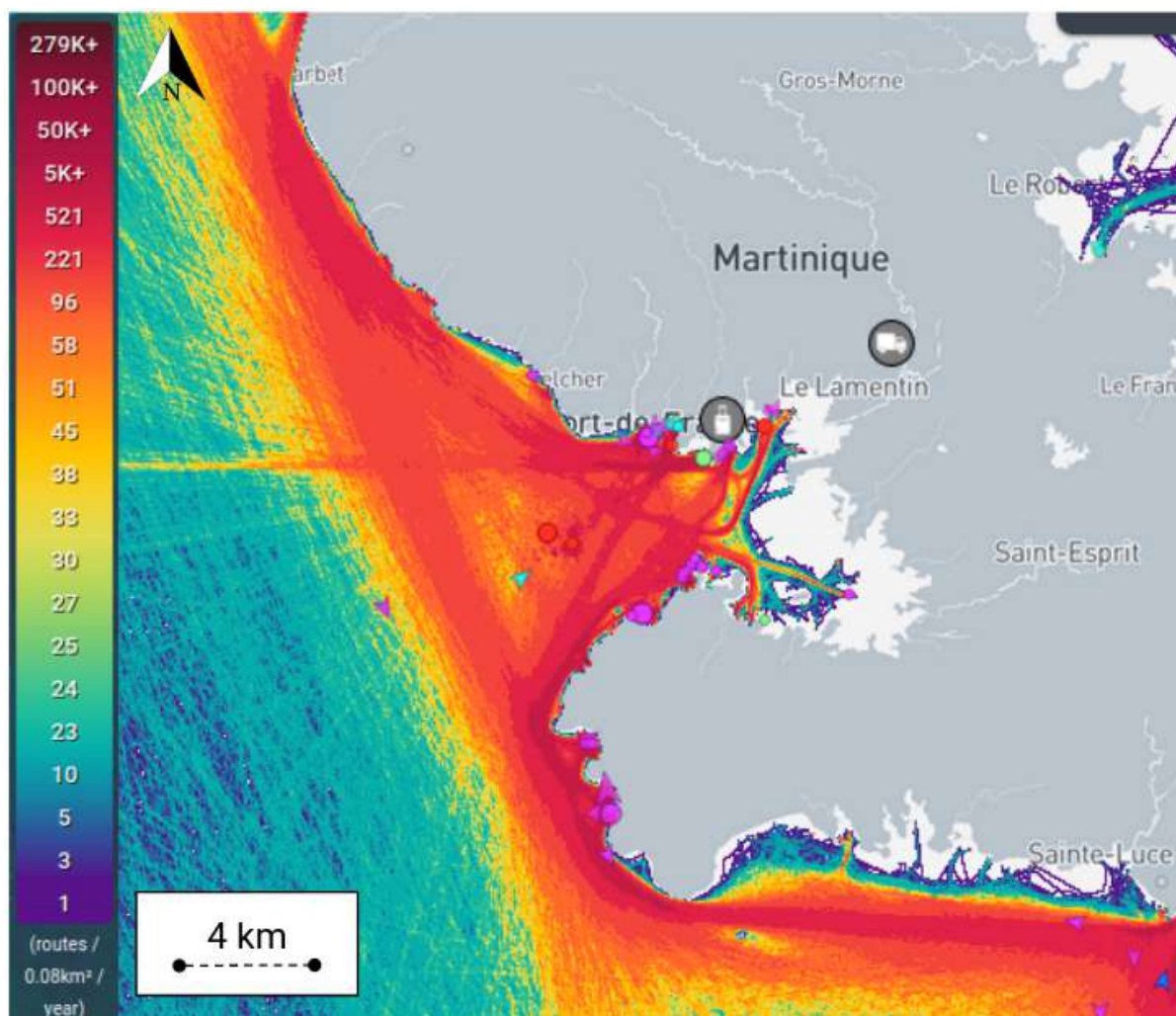


Figure 2: Carte du trafic maritime de la baie de Fort-de-France (2022). Données issues des AIS, intégrant uniquement les navires équipés d'émetteurs. Source : Marine Traffic.

2. MATÉRIEL ET MÉTHODES

2.1 MOYEN NAUTIQUE

L'acquisition des enregistrements a été effectuée à l'aide du semi-rigide d'Aquasearch (Figure 3). Les caractéristiques du bateau sont décrites dans le Tableau 1.



Figure 3: Le bateau d'Aquasearch

Tableau 1 : Spécifications techniques du bateau

| | |
|-----------------------------------|--------------|
| Longueur | 6 m |
| Largeur | 2,5 m |
| Tirant d'eau | 0.7 m |
| Propulsion | 110Ch |
| Vitesse maximum et moyenne | 20nd, 8nd |
| Capacité maximum | 14 personnes |

Durant les missions de nuit, pour des raisons de sécurité, l'équipage était équipé obligatoirement d'un gilet de sauvetage avec une lampe accrochée au gilet.

2.2 MATÉRIEL ACOUSTIQUE

2.2.1 CARTOGRAPHIE DE LA BAIE DE FORT-DE-FRANCE

Afin de cartographier le niveau sonore de la baie de Fort-de-France, 21 points d'échantillonnage ont été définis pour diviser la baie en secteurs équidistants et enregistrer l'énergie acoustique à des endroits stratégiques comme le milieu du chenal (points 6 et 10), l'Anse Mitan qui est très touristique (point 21) et le Grand Port Maritime (points 6 et 9). Ces trois types de points sont acoustiquement très actifs : le milieu du chenal est très fréquenté par les navires de commerce qui peuvent accéder à la baie uniquement par cette zone en raison de leur tirant d'eau important : l'Anse Mitan est largement utilisée par les touristes, notamment pour les activités de Jet-ski et le mouillage ; enfin, toutes les navettes de passagers qui traversent la baie. L'ensemble des points est présenté dans le Tableau 2 et localisé Figure 4. La plupart des relevés acoustiques ont été effectués à 10 et 20 m de profondeur, excepté les points 2, 4 et 5 où la profondeur n'était pas suffisante.

*Caractérisation des niveaux de bruits de la baie de Fort-de-France, Rapport Final
Aquasearch - 2024*

Tableau 2: Positions des 21 points acoustiques dans la baie et des profondeurs associées

| Point GPS | Latitude | Longitude | Profondeurs enregistrées (m) |
|------------------|-----------------|------------------|-------------------------------------|
| 1 | 14.557565 | -61.018333 | 10 et 20 |
| 2 | 14.577458 | -61.035929 | 10 |
| 3 | 14.592576 | 61.030948 | 10 et 20 |
| 4 | 14.562906 | -61.040076 | 10 |
| 5 | 14.556396 | -61.057341 | 2 |
| 6 | 14.56866 | -61.057482 | 10 et 20 |
| 7 | 14.581286 | -61.052703 | 10 et 20 |
| 8 | 14.590732 | -61.055061 | 10 et 20 |
| 9 | 14.562795 | -61.069101 | 10 et 20 |
| 10 | 14.576189 | -61.069501 | 10 et 20 |
| 11 | 14.584151 | -61.080558 | 10 et 20 |
| 12 | 14.597352 | -61.071724 | 10 et 20 |
| 13 | 14.556132 | -61.082979 | 10 et 20 |
| 14 | 14.579434 | -61.091692 | 10 et 20 |
| 15 | 14.542042 | -61.095472 | 10 et 20 |
| 16 | 14.564385 | -61.109242 | 10 et 20 |
| 17 | 14.589992 | -61.109943 | 10 et 20 |
| 18 | 14.530479 | -61.114624 | 10 et 20 |
| 19 | 14.556681 | -61.124926 | 10 et 20 |
| 20 | 14.581773 | -61.130615 | 10 et 20 |
| 21 | 14.607606 | -61.134209 | 10 et 20 |

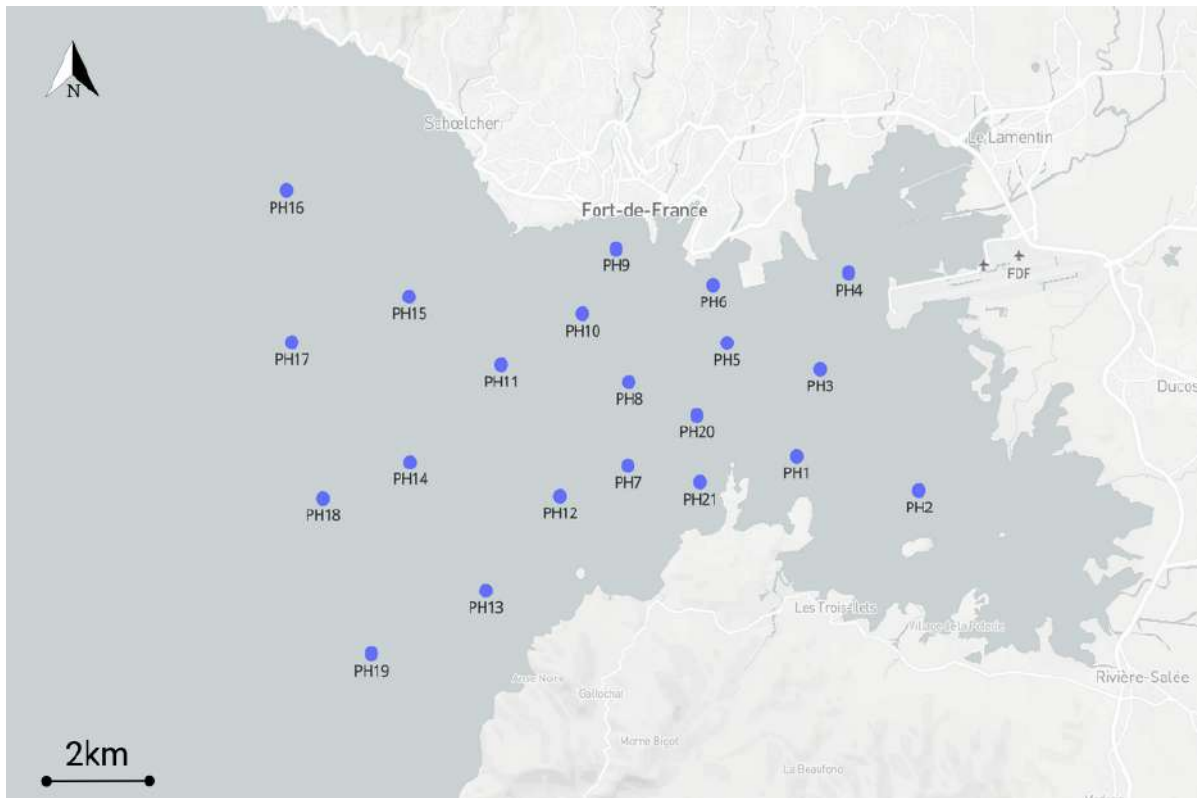


Figure 4: Carte représentant les 21 points acoustiques échantillonnés dans la baie.

L'hydrophone déployé était un [CR3](#) calibré (Cetacean research, Figure 5). La calibration de l'hydrophone pour calculer des niveaux sonores absolus est essentielle afin d'obtenir des mesures significatives des habitats acoustiques et de les comparer avec d'autres sites et d'autres études. La calibration, réalisée par la société Cetacean Research, permet de quantifier la pression sonore enregistrée par l'hydrophone avec un signal contrôlé et émis aux différentes gammes de fréquences. Les spécifications et la calibration de l'hydrophone sont présentées en Annexe A. La sensibilité moyenne de l'hydrophone est de -208,7 dB (1V/uPa). La carte d'acquisition est une [SpectraDaQ-200](#) connectée en USB à un ordinateur portable HP. Le logiciel d'acquisition utilisé était [SpectralPlus](#) permettant de visualiser en direct la qualité des enregistrements et leurs spectrogrammes.

Les paramètres des enregistrements définis étaient les suivants :

- Fréquence d'échantillonnage : 192 000 Hz
- Sampling format : 24 Bit
- Temps d'enregistrement : 1 minute par point GPS et par profondeur
- Input range : +/- 625 mV



Figure 5: Gauche : Hydrophone CR3 avec ses 30m de câble. Droite : la carte d'acquisition SpectraDaQ-200.

Une fois le point GPS atteint, le moteur du bateau était coupé, ainsi que tout autre matériel pouvant émettre du bruit (téléphone portable, sondeur du bateau). Une minute d'enregistrement a été réalisée à chaque point GPS et à chaque profondeur (10 et 20 m).

2.2.2 MESURES DE BRUITS DURANT LE TOUR DES YOLES ET LA MERCURY BEACH

Le déploiement du matériel a été réalisé par l'équipe du Parc Naturel Marin de la Martinique. Le matériel utilisé pour cette étude était le pack HighBlue du projet CARI'MAM. Les caractéristiques techniques du matériel sont présentées en Annexe E.

L'hydrophone a été placé à 40m de profondeur au milieu de la baie de Grande Anse sur la commune des Anses d'Arlets (Latitude : 14.502117, longitude: -61.092017). L'acquisition était en continue, avec une fréquence d'échantillonnage de 256 kHz, la durée des enregistrements était de 60 minutes.

Afin de faciliter les calculs des niveaux de bruit, les enregistrements d'une heure ont été découpés automatiquement en segments de 5 minutes. L'hydrophone n'étant pas calibré, les niveaux de dB relatifs ont été calculés pour les bandes de fréquences suivantes (correspondant aux fréquences des bruits de bateaux) :

- Bande 1: 20 Hz à 2,5 kHz
- Bande 2: 2,5 kHz à 5 kHz

Le calcul des niveaux en décibels relatifs permet de suivre l'évolution du bruit au fil du temps sur le même hydrophone. Cependant, il ne permet pas de comparer ces niveaux avec ceux de la littérature existante. Ainsi, seule la variation des niveaux en décibels sera considérée, et non leurs valeurs absolues.

2.3 CALCULS DU NIVEAU D'ÉNERGIE

Différentes mesures peuvent être possibles pour mesurer le bruit dans un environnement. Mais la plus commune est de calculer le Sound Pressure Level (SPL) (Kinsler, Frey, et Coppens 1999).

Niveaux de pressions acoustiques (SPL, Sound Pressure Level)

Afin de mesurer le niveau de bruit dans la baie de Fort-de-France, le SPL a été calculé. Le SPL est la mesure logarithmique de la pression acoustique d'un son et est exprimée en décibels (dB). Il est possible de calculer le SPL sur l'ensemble du spectre mais également de le calculer par bandes de fréquences (voir Annexe B). Le SPL est donc mesuré pour chaque bande filtrée, produisant ainsi une série de niveaux de pression acoustique pour différentes bandes de fréquence (Merchant et al. 2015). Les fréquences choisies étaient les suivantes : 160 Hz, 320 Hz, 640 Hz, 1280 Hz, 5113 Hz, 8116 Hz, 12885 Hz et 18500 Hz afin de couvrir une large partie du spectre et de pouvoir évaluer les niveaux sonores correspondant aux diverses sources de bruits décrites précédemment (géophonie, biophonie et anthropophonie):

$$SPL = 20 \log_{10}\left(\frac{Pf}{Pref}\right)$$

- SPL est le niveau de pression sonore en dB SPL,
- $Pref$ est la pression acoustique de référence (1 μPa),
- Pf est la pression acoustique efficace (RMS) mesurée en μPa en intégrant l'ensemble de la mesure :

$$Pf = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T p^2(t) dt}$$

- T la période d'observation,
- $p(t)$ la pression acoustique instantanée

2.4 INTERPOLATION ET CARTE DES NIVEAUX SONORES

La cartographie des niveaux de bruit a été effectuée avec le logiciel QGIS®, par interpolation IDW (Inverse Distance Weight). Cette méthode utilise une matrice de points pondérés de telle sorte que l'influence d'un point par rapport à un autre diminue avec la distance par rapport à ce point. Cela permet de créer des cartes avec des colorations différentes selon la valeur dB de chaque point. L'interpolation IDW est généralement utilisée dans les mesures de valeurs réparties dans l'espace (Bartier et Keller 1996).

3. RÉSULTATS

3.1 EFFORT D'ÉCHANTILLONNAGE

Sur l'ensemble du projet, dix sorties ont été initiées. Pour quatre sorties, les données ne sont pas intégrées car les conditions environnementales ont trop fortement évolué durant l'échantillonnage, rendant l'analyse impossible.

En effet, malgré la vérification de la météo, nous avons eu pour deux sorties des conditions de vents qui sont passées de force 1 à force 5, avec un fort clapot (dates : 14/04/2022 et 15/03/2024) Pour les deux autres sorties (dates : 16/01/2024 et 16/05/2024), nous avons eu l'arrivée de grains violents avec des vents forts. Il nous était impossible de pouvoir enregistrer avec les mêmes conditions. Les niveaux de dB étaient trop différents.

Au total, six sorties ont été conservées, quatre pendant la journée et deux durant la nuit. Les enregistrements diurnes commençaient à partir de 8h, tandis que les enregistrements nocturnes débutaient à 21h. La durée des sorties variait entre 4 et 6 heures, selon les conditions météorologiques. La distance moyenne parcourue par sortie était de 61 km, avec une vitesse moyenne de 8 nœuds. La Figure 6 illustre le parcours réalisé lors des six sorties au départ des Trois-Îlets. Le parcours réalisé était toujours dans le même sens, commençant par les points au large de la baie, pour finir à côté des Trois-Îlets afin d'éviter la houle provenant de l'Est.



Figure 6: Exemple du parcours réalisé durant une sortie en partant des Trois-Îlets.

Au total, sur les 6 sessions, 256 minutes d'enregistrements ont été effectuées (soit 4h26min). Avant chaque sortie, les conditions météorologiques ont été vérifiées et les sorties étaient annulées lorsque le vent atteignait Force 5 .

Tableau 3: Tableau récapitulatif des sorties réalisées

| | Date | Heure de départ | Heure d'arrivée |
|-----------------|----------|-----------------|-----------------|
| Sortie 1 | 25/05/22 | 8h45 | 17h |
| Sortie 2 | 16/06/22 | 10h | 15h45 |
| Sortie 3 | 23/08/22 | 11h | 14h45 |
| Sortie 4 | 11/04/24 | 7h45 | 13h15 |
| Sortie 5 | 13/06/24 | 21h | 00h15 |
| Sortie 6 | 16/06/24 | 20h10 | 00h10 |

3.2 EVÉNEMENTS ACOUSTIQUES ANTHROPIQUES

Différents événements acoustiques d'origine anthropique se sont déroulés lors des acquisitions sur le terrain, comme le passage d'une navette, d'un porte-conteneur, ou d'un avion. Il a donc été possible d'enregistrer l'environnement pendant et après ces événements, et de les inclure dans l'analyse des données.

3.2.1 NAVETTES MARITIMES

La baie de Fort-de-France est quotidiennement fréquentée par des navettes de transport de passagers (voir Figure 7). Le premier type de navette est l'Express des Iles, au départ de Fort de France qui dessert Sainte Lucie, La Dominique, la Guadeloupe et les Saintes. Le second type de navire est les "*Vedettes tropicales*" qui réalise tous les jours (de 5h40 à 22h), différents trajets passant par Fort-de-France, les Trois-Îlets, l'Anse mitan, l'Anse à l'ane et Case-Pilote (Figure 7). Durant cette étude, une des *Vedettes Tropicales* a été enregistrée. En effet, lors de l'enregistrement acoustique au point GPS 6, une navette est passée à moins de 100m de l'hydrophone.

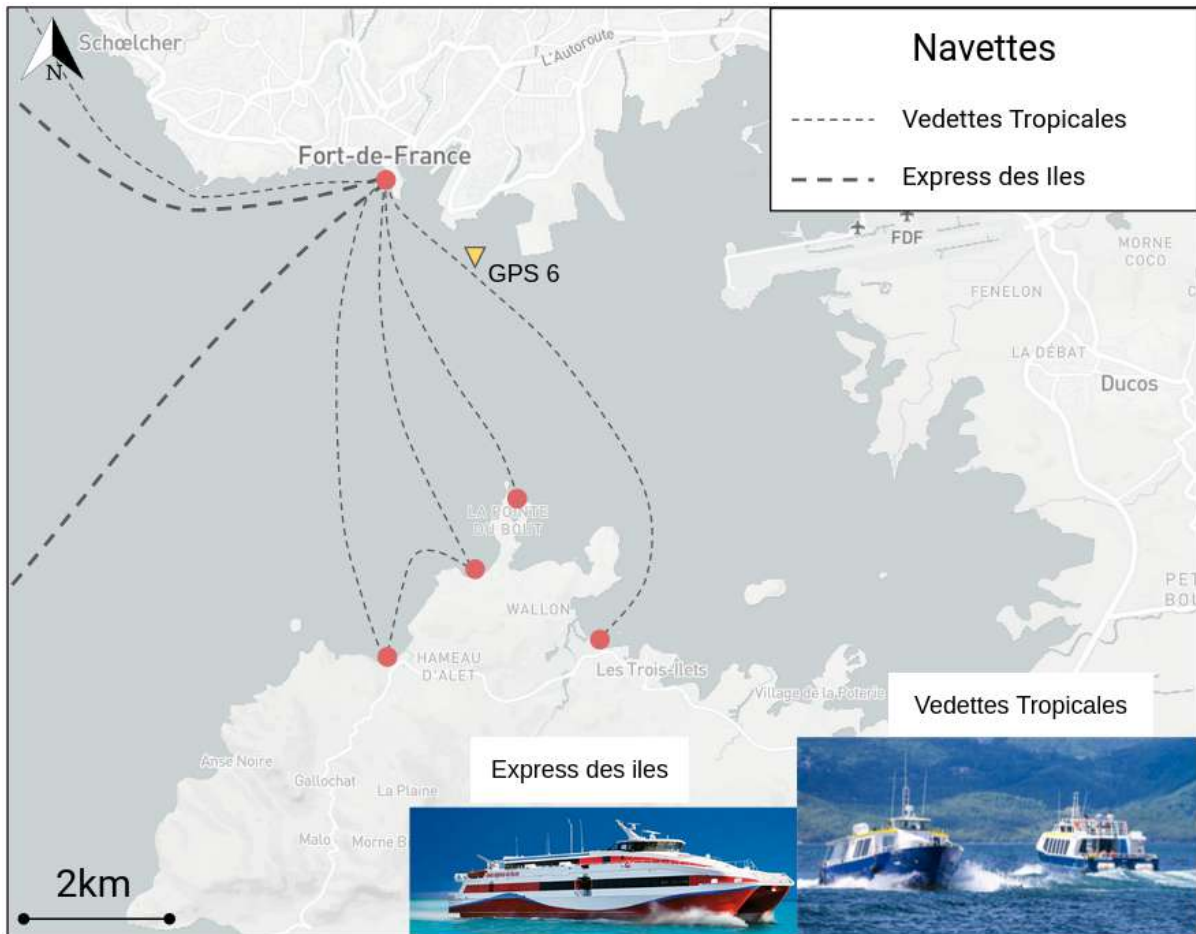


Figure 7: Carte représentant les trajets des deux types de navettes fréquentant la baie de Fort-de-France.

La Figure 8 présente le niveau de bruit enregistré au point GPS 6, avec et sans le passage de la navette, sur une période de 5 minutes. Avec la navette (courbe orange), le bruit atteint un maximum de 75 dB, tandis que sans la navette, il reste aux alentours de 57,5 dB. Cette augmentation de 17,5 dB est statistiquement significative. Étant donné que l'échelle des décibels est logarithmique, cette hausse sera perçue par l'oreille humaine comme un son environ 3,36 fois plus fort.

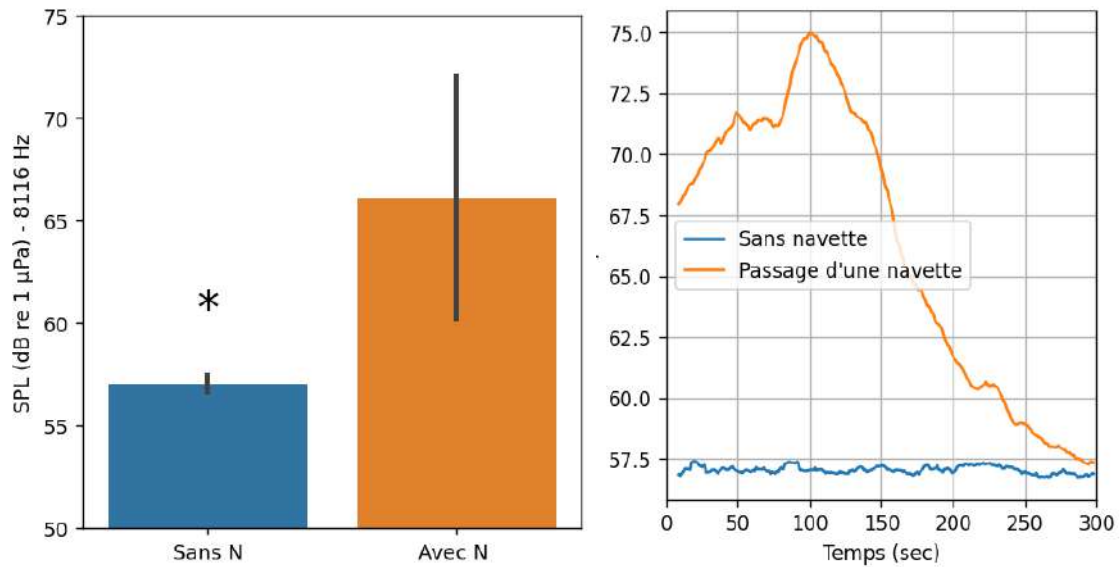


Figure 8: Gauche : moyenne des dB avec et sans la navette. Droite : Évolution du niveau de bruit sur les 5 minutes d'enregistrements.

3.2.2 NAVIRES DE COMMERCE

Le deuxième événement acoustique d'origine anthropique enregistré est le passage d'un navire de commerce à environ 200m de l'hydrophone. Ce navire ([MN Toucan](#)) mesure 115 mètres de longueur, et peut naviguer à plus de 15 nœuds. Le niveau de bruit moyen sans le navire était de 47 dB, tandis qu'avec ce navire à proximité la moyenne du bruit était de 80 dB (Figure 9). Une augmentation de 30 dB correspond approximativement à une multiplication par 8 du son perçu. En d'autres termes, si le son devient 30 dB plus fort, il est perçu comme étant environ 8 fois plus fort par l'oreille humaine.

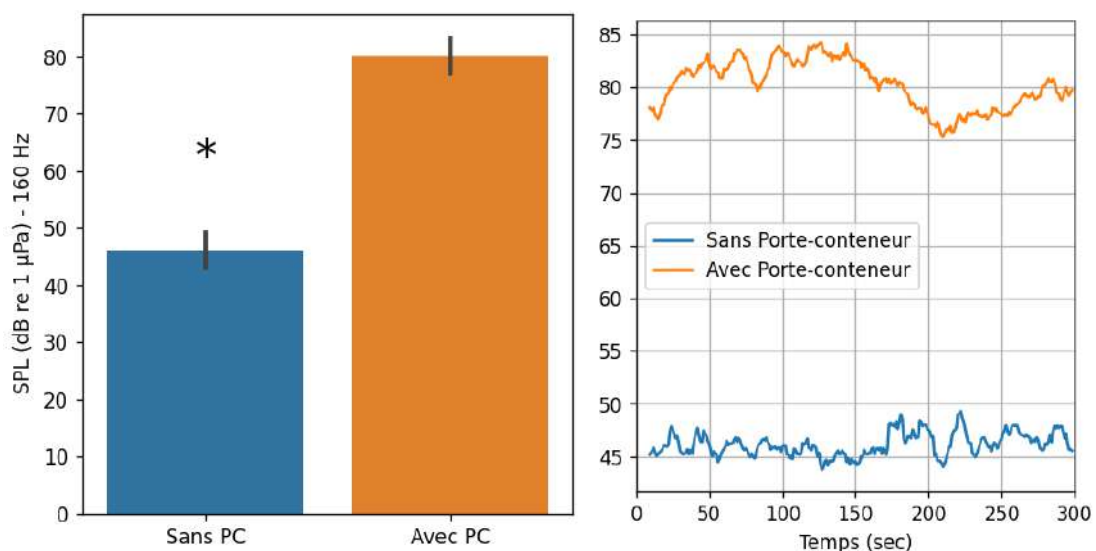


Figure 9: Gauche : moyenne des dB avec et sans le porte-conteneur (PC). Droite : Évolution du niveau de bruit sur les 5 minutes d'enregistrements.

Les événements présentés précédemment illustrent deux exemples parmi de nombreux autres navires pouvant fréquenter la baie de Fort-de-France. La Figure 10 montre le nombre et le type de navires enregistrés par la capitainerie de Fort-de-France ayant fait escale au Grand Port. En 93 jours, 500 bateaux ont accosté, traversant donc la baie. Les navires les plus fréquents étaient les vedettes (130), suivis des paquebots (104) et des pétroliers (65).

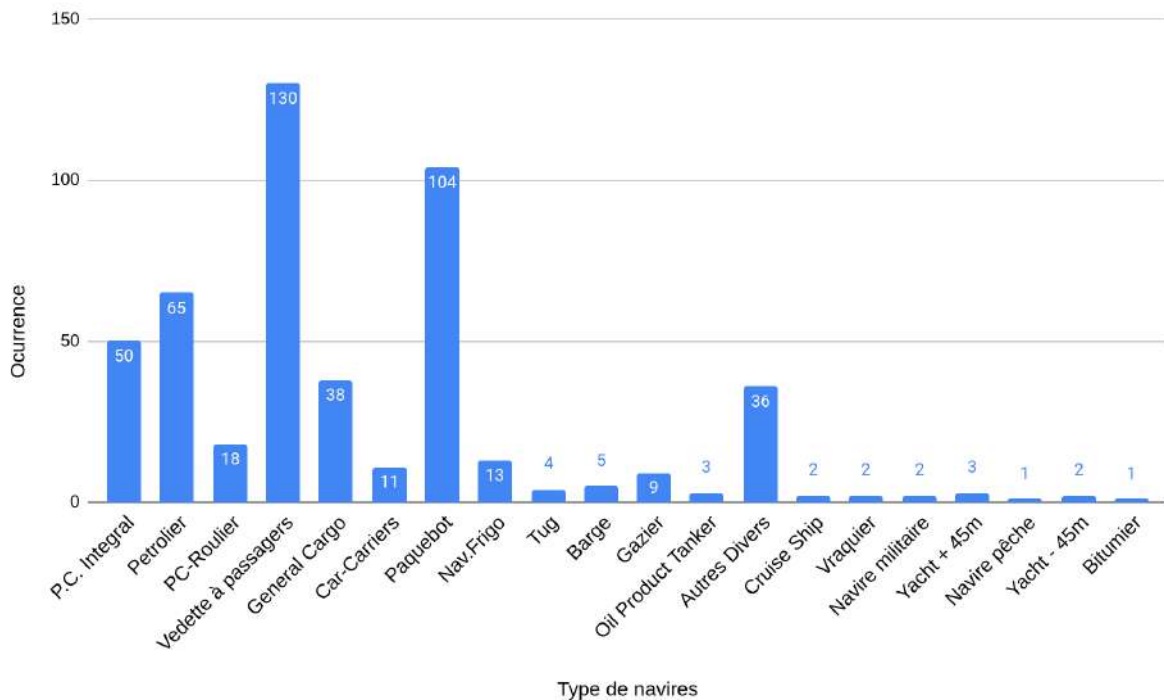


Figure 10: Occurrence des différents types de navires qui ont fait escale au port de Fort-de-France du 1er Novembre 2023 au 2 Février 2023 (93 jours) (Source : Grand Port Maritime de La Martinique - Capitainerie).

3.2.3 PASSAGE D'UN AVION

Durant la dernière session de nuit, au point GPS 20, un avion à destination de l'aéroport de Fort-de-France a survolé la zone. Un enregistrement contrôle a été effectué sans l'avion à 10 m de profondeur, et un autre a été effectué pendant le passage. Les résultats sont présentés Figure 11. Le passage de l'avion n'a pas fait augmenter les niveaux dB de manière significative (moyenne des dB avec l'avion 64,02 dB et sans l'avion à 64,42 dB). On peut donc supposer qu'à 10 m de profondeur, les avions survolant la baie de Fort-de-France n'ont pas d'impact sur le paysage sonore de la baie.

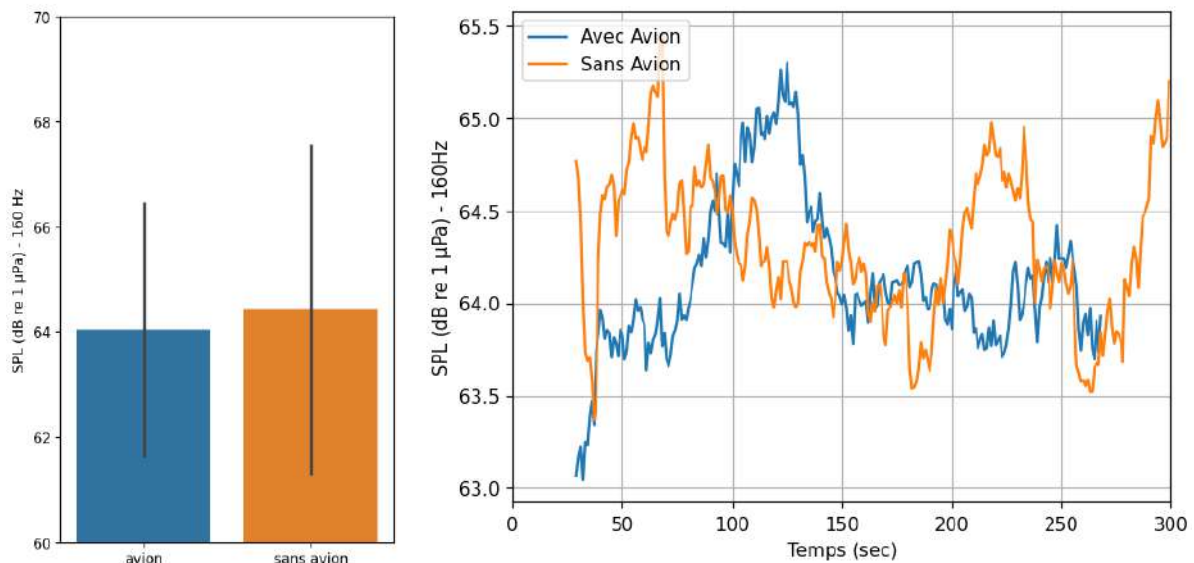


Figure 11: Comparaison de deux enregistrements avec et sans le passage d'un avion à une profondeur de 10 m.

3.3 ANALYSE DES NIVEAUX DE BRUITS

3.3.1 NIVEAUX DE BRUIT DURANT LE JOUR

Quatre sorties ont été réalisées durant la journée (25/05/2022, 16/06/2022, 23/08/2022, 11/04/2024).

Afin de comparer les niveaux de bruit en fonction des deux profondeurs (10 et 20 m), un test statistique a été réalisé. Les résultats montrent qu'il n'y a pas de différence significative entre les niveaux de bruit entre les deux profondeurs durant la journée. La moyenne du SPL est légèrement supérieure à 10 m de profondeur, avec 85,73 dB, contre 84,37 dB à 20 m de profondeur (voir tests statistiques en Annexe C). L'écart type est également plus important à 10m de profondeur.

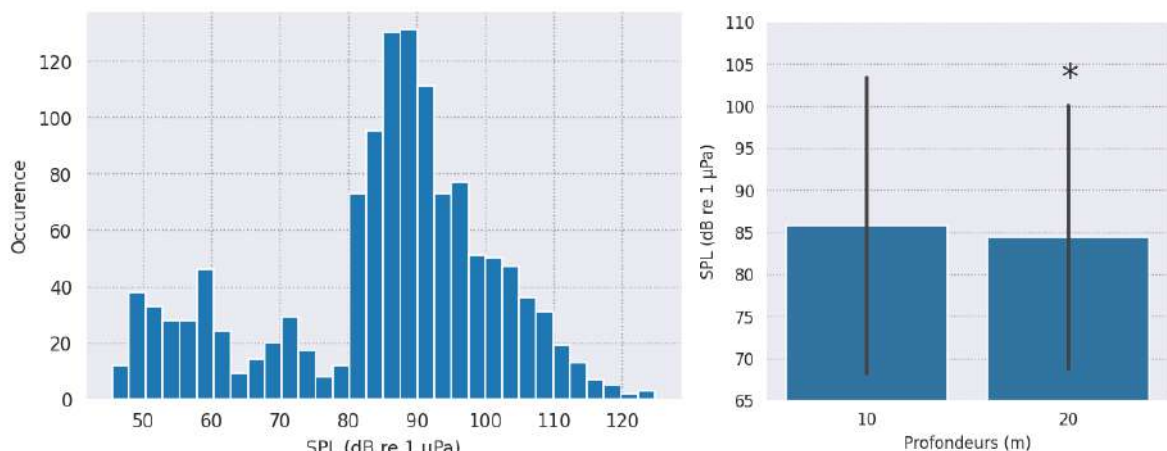


Figure 12: Histogramme des Niveaux dB durant le jour et comparaisons du niveaux de bruits en fonction de la profondeur de l'hydrophone.

La Figure 13 représente le niveau de bruit moyenné sur l'ensemble des points acoustiques durant le jour. Le SPL est le plus important pour les basses fréquences (160, 319, 639 Hz). Les écart-types sont très importants (± 20 dB) car lors des enregistrements, différents événements acoustiques (passages de navettes ou d'autres navires) ont fait augmenter brusquement les niveaux de bruits, et provoquent de grandes variabilités au sein des mesures à ces fréquences.

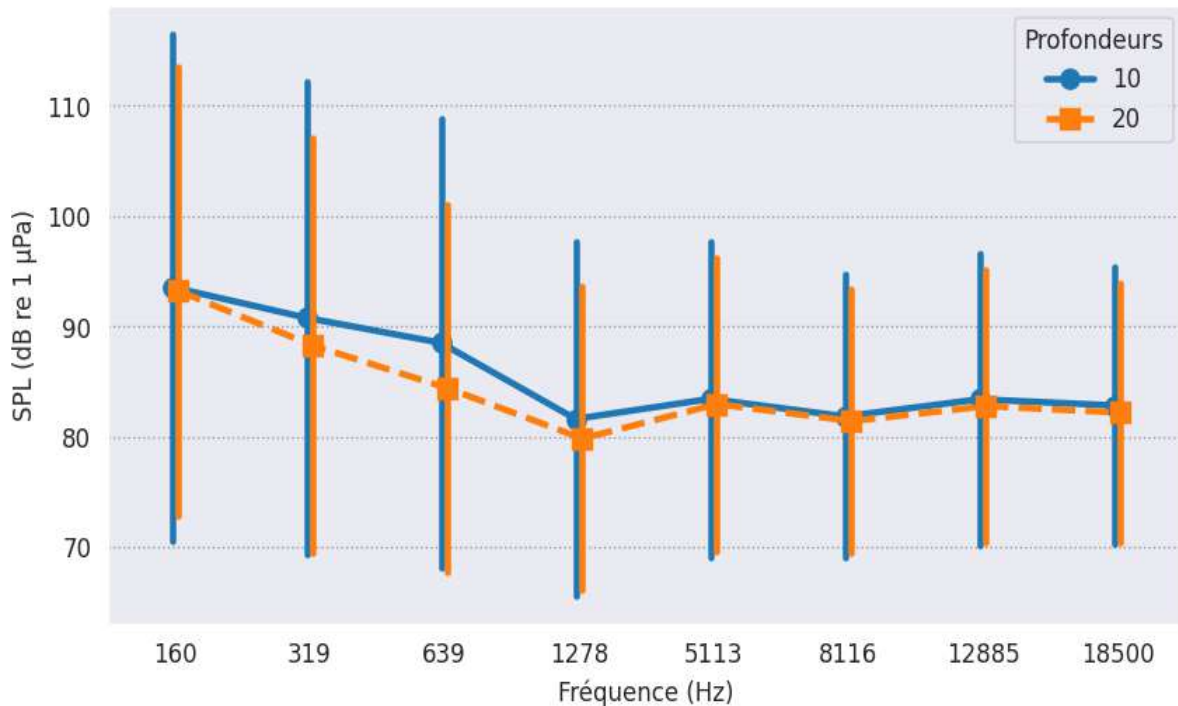


Figure 13: Évolution du SPL en fonction des différentes fréquences et de la profondeur durant le jour.

Le bruit en basses fréquences (160 Hz) est omniprésent sur toute la zone, avec une concentration particulièrement marquée entre Fort-de-France et les Trois-Îlets, ainsi qu'au Nord-Ouest de la baie (Figure 14). Ce couloir de bruit dans la baie correspond aux passages des navettes et à l'activité touristique autour de la Pointe du Bout.

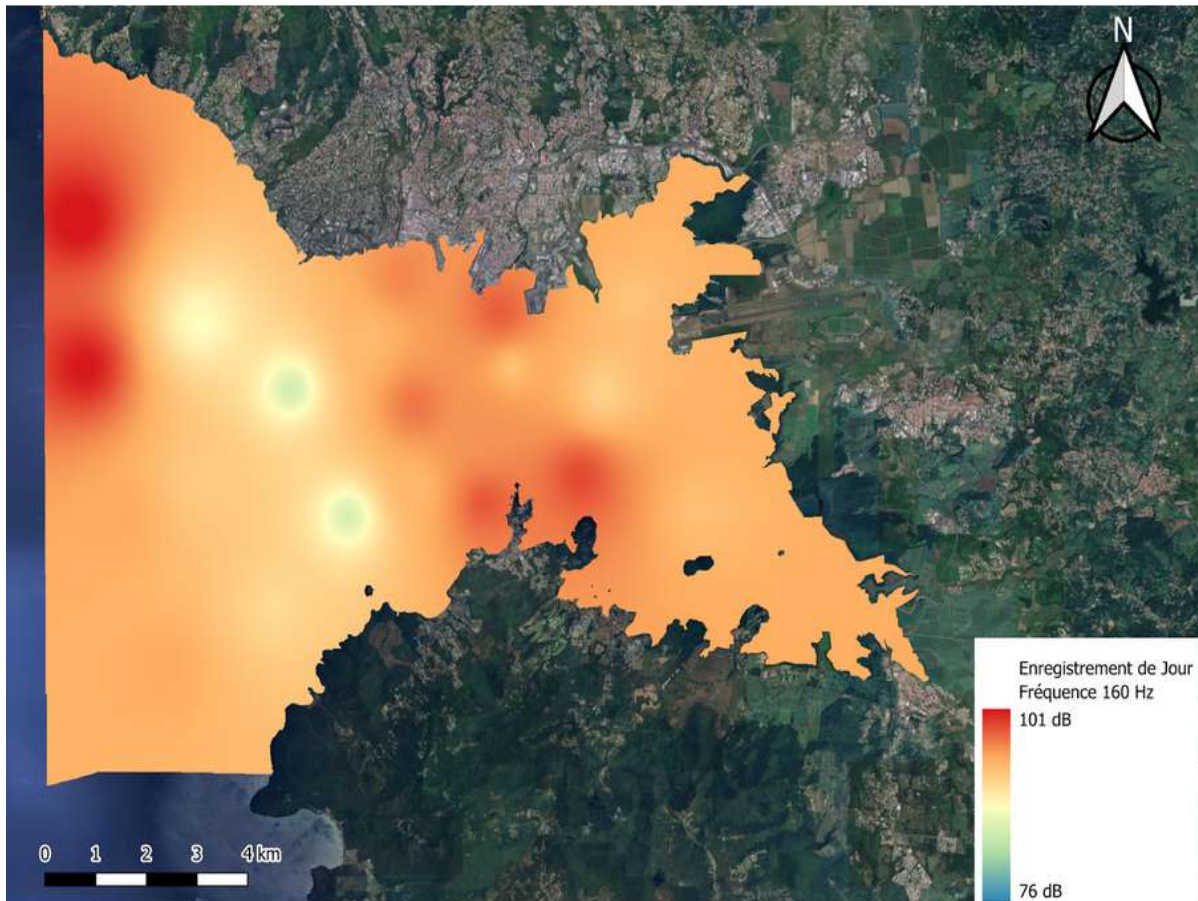


Figure 14: Cartographie des niveaux dB pour la fréquence 160 Hz durant le jour.

Pour les hautes fréquences (18 500 Hz) en journée, le niveau maximum est de 85 dB dans toute la baie (Figure 15). Au large, le niveau de bruit est plus faible qu'à l'intérieur de la baie, probablement en raison de la faune benthique qui émet à ces fréquences à l'intérieur de la baie. Le maximum du bruit est à proximité du port de France-de-France, ce qui montre que le trafic maritime peut être émis jusqu' aux hautes fréquences.

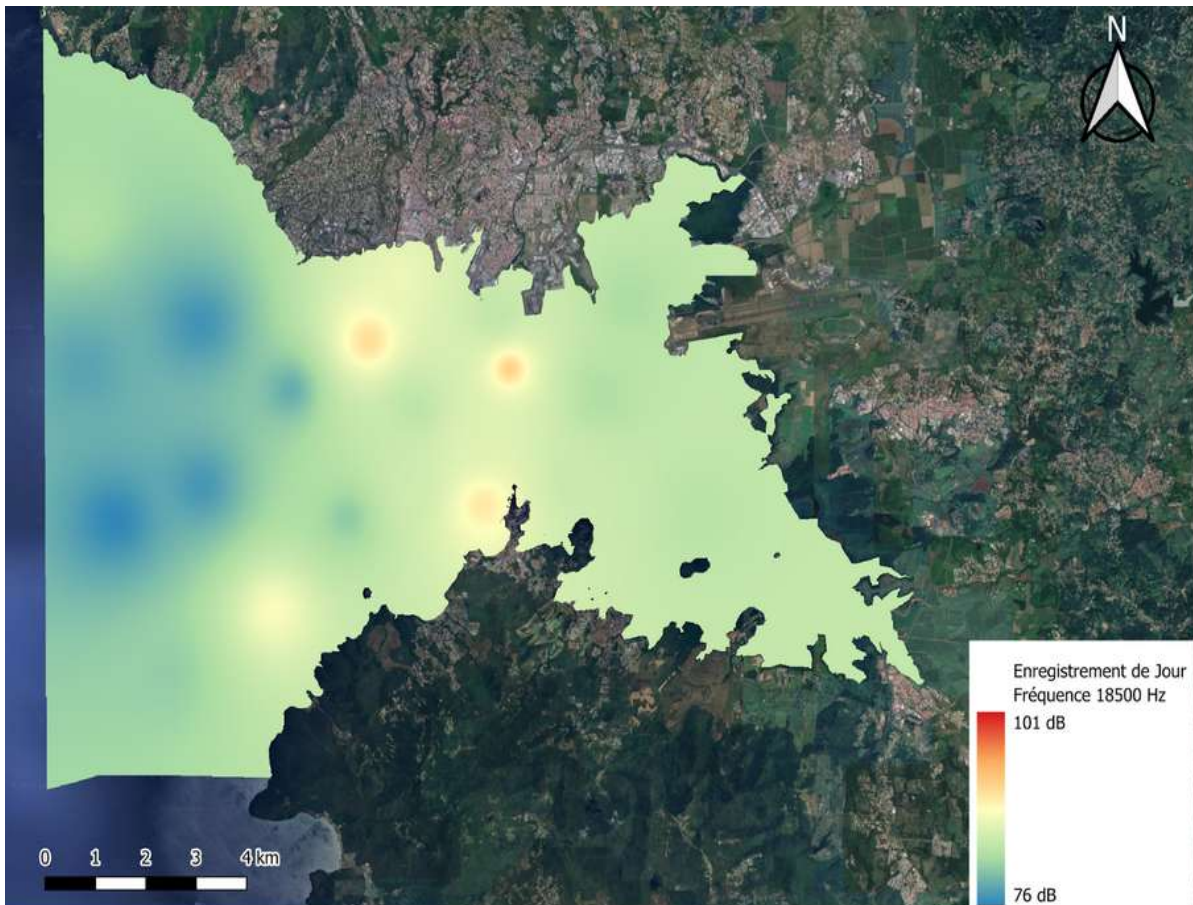


Figure 15: Cartographie des niveaux dB pour la fréquence 18500 Hz durant le jour.

En comparant les analyses à basses et hautes fréquences durant la journée, on peut déterminer les variations de bruit en fonction de la fréquence et d'identifier les sources potentielles de bruit (trafic maritime), ainsi que leurs impacts sur les différentes zones de la baie. On constate que le bruit est beaucoup plus important en basses fréquences, et ce sur l'ensemble de la baie. Cette observation permet de confirmer que le bruit du trafic maritime peut se propager sur l'ensemble de la zone.

3.3.2 NIVEAUX DE BRUIT DURANT LA NUIT

Deux sorties ont été réalisées durant la nuit (Figure 16). Les niveaux de bruit varient de 60 à 113 dB, avec un pic à 76 dB. Les moyennes des niveaux de bruit ont été comparées entre les profondeurs de 10 m et 20 m. Aucune différence significative n'a été constatée, indiquant que le niveau de bruit est identique la nuit à 10 m et 20 m de profondeur.

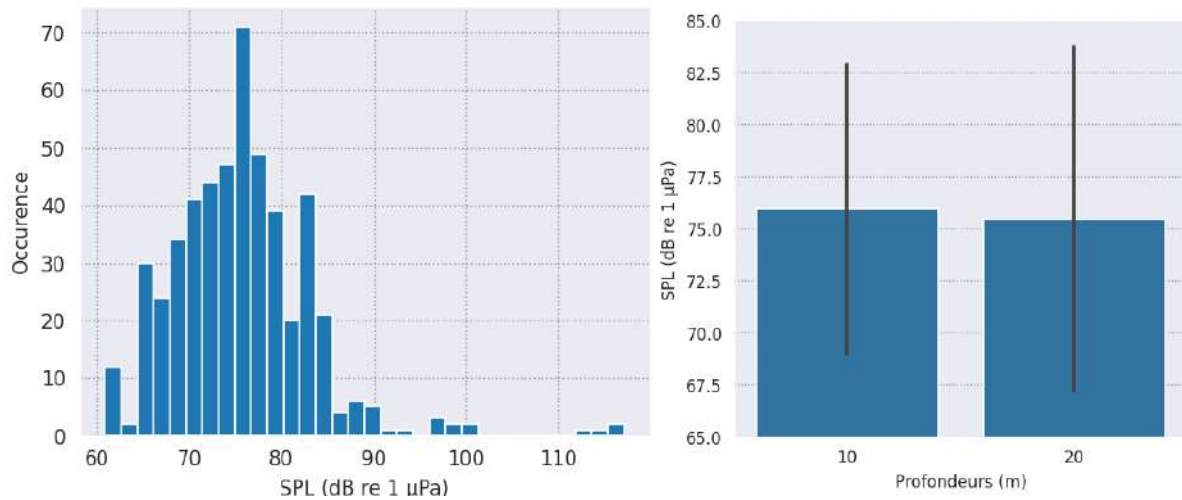


Figure 16: Histogramme des Niveaux dB durant la nuit et comparaisons du niveau de bruit en fonction de la profondeur de l'hydrophone.

À l'inverse du niveau de bruit pendant le jour, le niveau de bruit pendant la nuit augmente avec les fréquences. Il est d'environ 70 dB à 160 Hz et atteint les 80 dB à 18500 Hz (Figure 17). Cette augmentation des dB en haute fréquence est probablement dû à l'activité acoustique des crustacés qui est plus importante pendant la nuit (Buscaino et al. 2016).

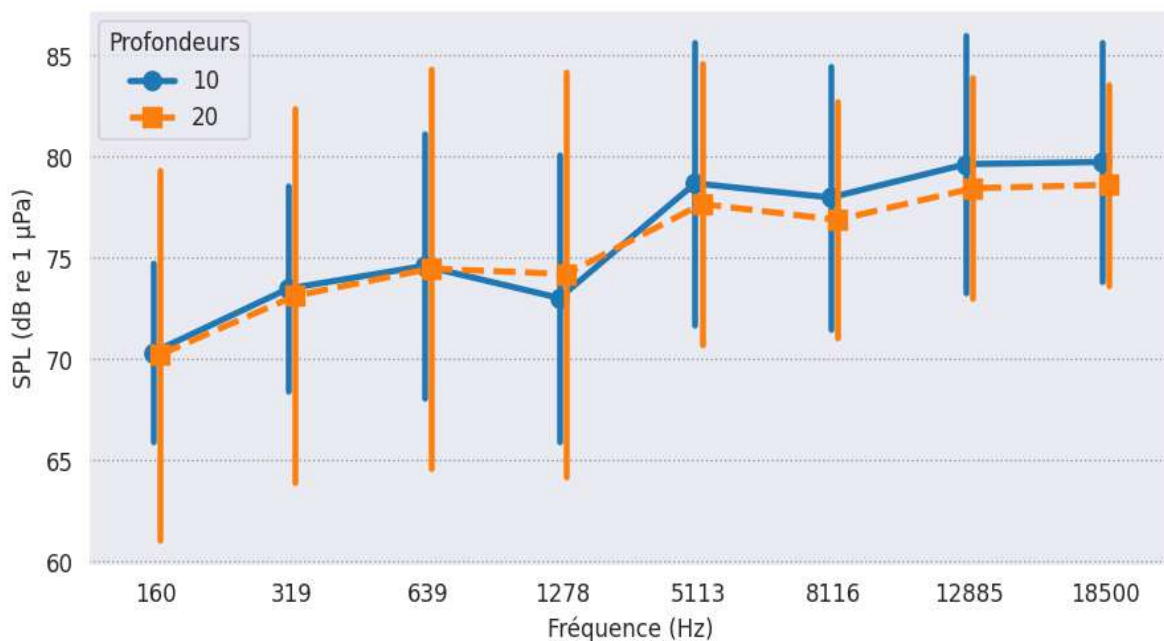


Figure 17: Évolution du SPL en fonction des différentes fréquences et de la profondeur durant la nuit.

Durant la nuit et le jour, la bande de fréquence à 1278 Hz est relativement faible en intensité. Cette diminution a déjà été observée dans l'étude de (Buscaino et al. 2016). Bien qu'ils n'aient pas déterminé la véritable cause de cette variation du niveau de bruit à cette fréquence, ils supposent que cette niche acoustique pourrait avoir une fonction particulière dans l'écosystème.

Le suivi du niveau de bruit durant la nuit pour les basses fréquences (160 Hz) montre que le niveau de bruit est assez homogène sur l'ensemble de la baie, avec un pic en face de l'Anse

à l'âne (Figure 18). Le niveau de bruit plus important à cet endroit pourrait correspondre aux gros navires qui stationnent la nuit dans cette zone.

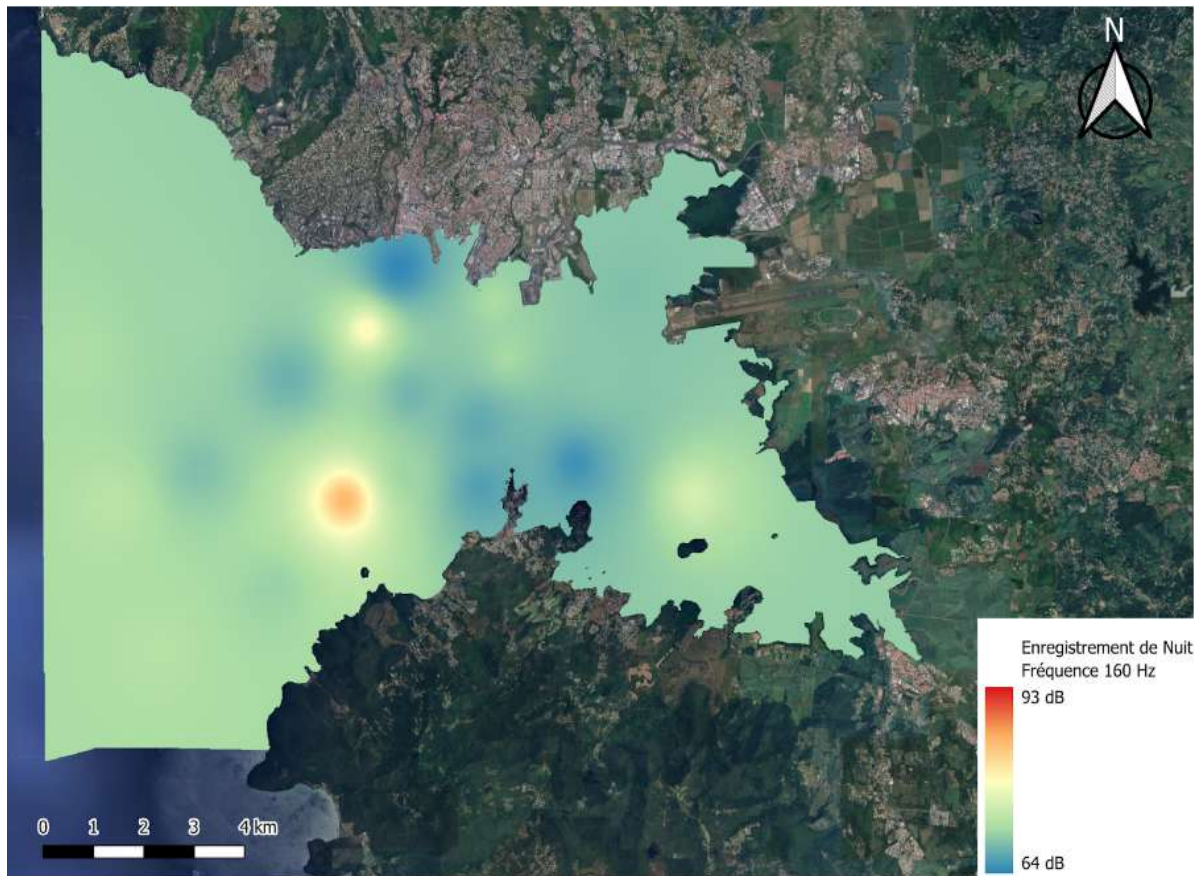


Figure 18: Cartographie des niveaux dB pour la fréquence 160 Hz durant la nuit.

En haute fréquence (Figure 19), le bruit est beaucoup plus important la nuit, avec des pics à 93 dB au niveau du port de Fort-de-France et au Sud-Ouest de la baie. À 18 500 Hz, il est possible que cette augmentation soit due à la faune benthique qui est active pendant la nuit (Buscaino et al. 2016).

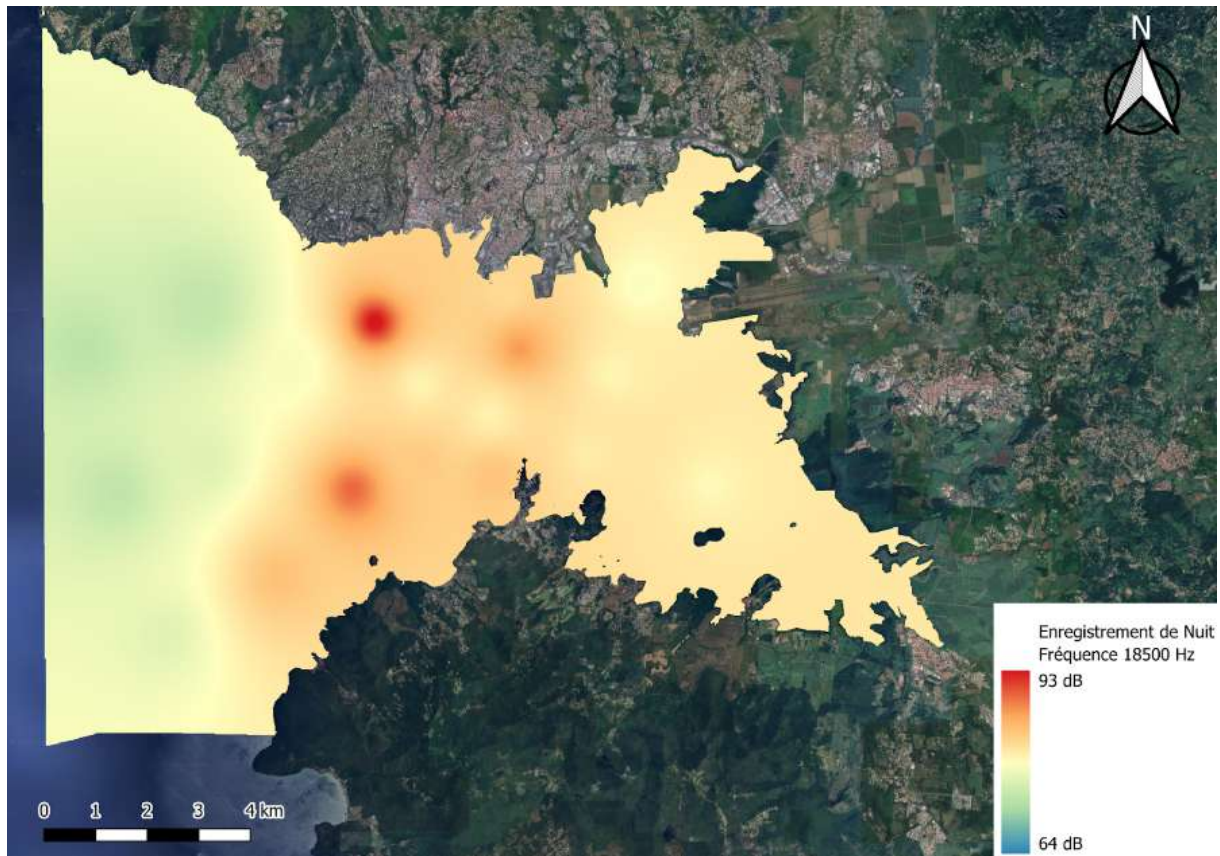


Figure 19: Cartographie des niveaux dB pour la fréquence 18500 Hz durant la nuit

3.3.3 COMPARAISON JOUR/NUIT

Le calcul du niveau de bruit a été moyenné pour tous les points, à la fois pour le jour et la nuit, pour chacune des bandes de fréquences (Figure 20). Globalement, ainsi que pour chaque fréquence individuellement, le niveau moyen en dB est statistiquement supérieur pendant la journée (Annexe C pour les tests statistiques). En effet, le niveau moyen la nuit est de 76 dB, tandis que le jour il atteint 86 dB. Cette augmentation est principalement due aux basses fréquences (inférieures à 5113 Hz). La différence la plus marquée entre le jour et la nuit concerne la fréquence la plus basse (160 Hz), avec 70 dB la nuit contre 95 dB le jour. Une augmentation de 70 dB à 90 dB correspond à une multiplication par 10 de la pression acoustique. Ainsi, le bruit est 10 fois plus intense le jour que la nuit pour les basses fréquences. À mesure que les fréquences augmentent, cette différence diminue : à 18500 Hz, le niveau en dB est de 79,56 la nuit et de 83,38 le jour.

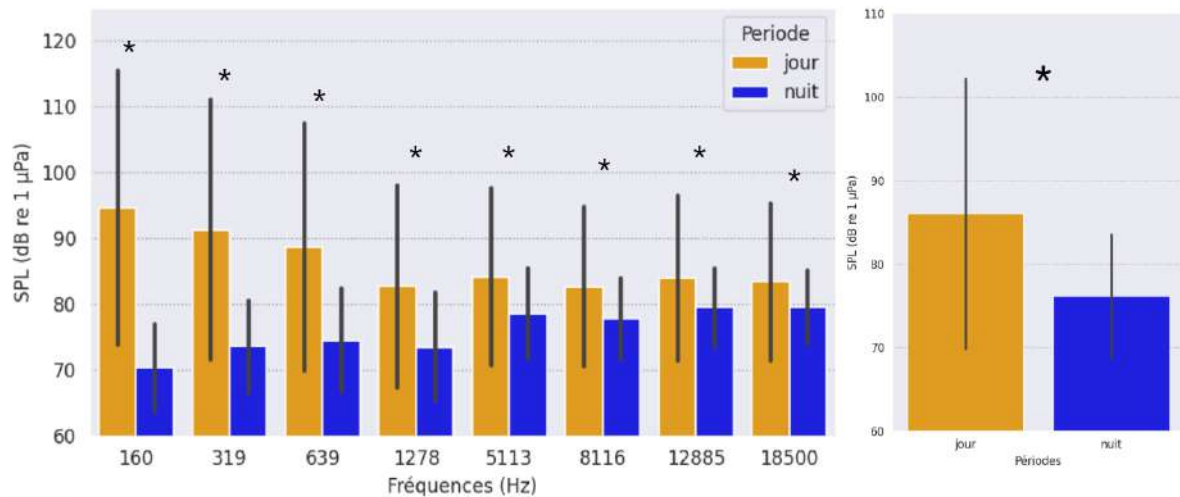


Figure 20: Évolution des niveaux de bruits en fonction des fréquences et de la période (jour/nuit).

La Figure 21 permet d'évaluer la différence des niveaux dB entre le jour et la nuit en fonction des fréquences. On peut voir qu'à partir de 10 000 Hz, la différence n'est plus que de 5 dB. Cela montre que la différence des niveaux dB est probablement due au trafic maritime qui émet essentiellement des basses fréquences.

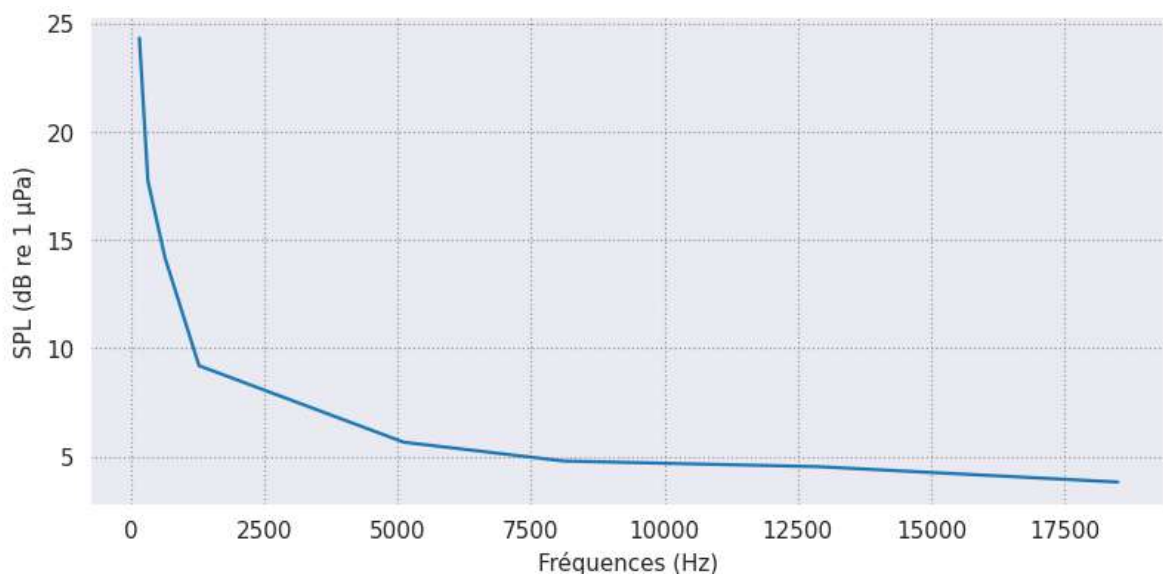


Figure 21: Évolution de la différence des niveaux dB entre le jour et la nuit en fonction des fréquences.

La Figure 22 présente la comparaison des niveaux de bruit dans la baie pour les basses fréquences entre le jour et la nuit (les autres fréquences sont présentées en Annexe D). Durant la journée, les niveaux de bruit sont très élevés pour l'ensemble des points mesurés. Ils sont compris entre 84 et 101 dB, tandis que la nuit, ils atteignent un maximum de 75 dB ce qui est significativement plus faible que ceux émis en journée. Les bruits les plus forts enregistrés la nuit sont plus faibles que les bruits les plus faibles enregistrés en pleine journée.

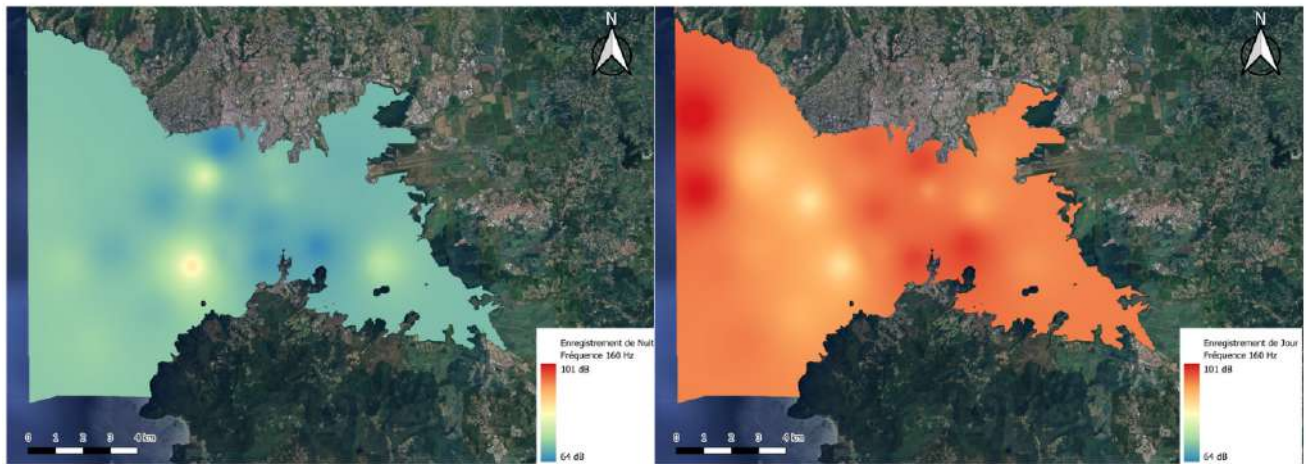


Figure 22: Comparaison des niveaux dB pendant la nuit (gauche) et pendant le jour (droite) pour la fréquence 160.

Concernant les hautes fréquences, la variation entre le jour et la nuit est moins marquée (Figure 23). En effet, à 18500 Hz la cartographie du niveau de bruit est relativement identique entre le jour et la nuit.

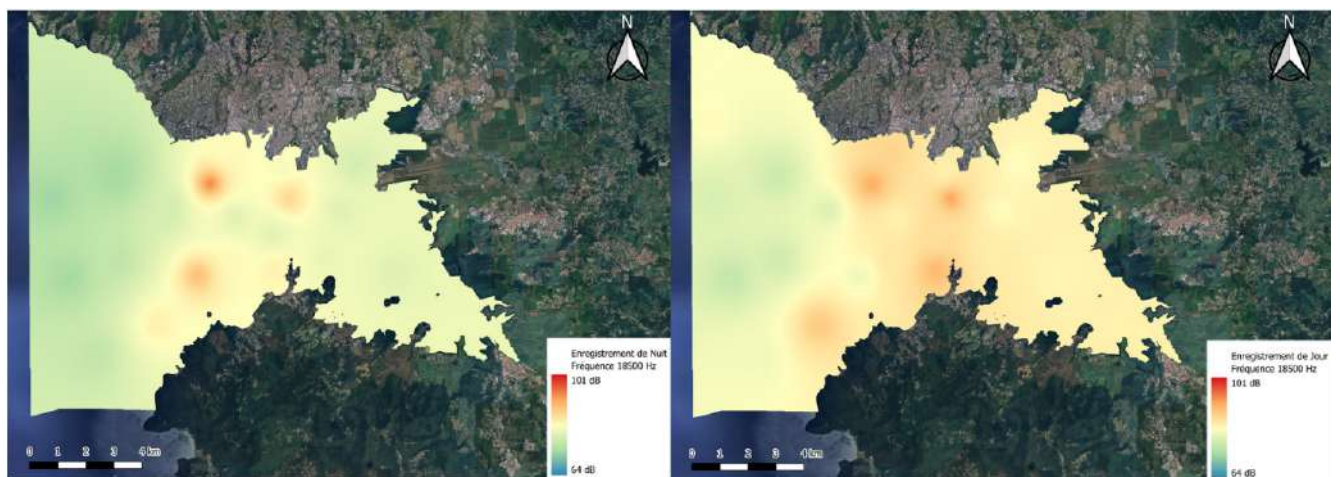


Figure 23: Comparaison des niveaux dB pendant la nuit (gauche) et pendant le jour (droite) pour 18 500 Hz.

3.3.4 COMPARAISON SAISON HAUTE ET SAISON BASSE

Parmi les quatre sessions d'enregistrements effectuées durant la journée, deux ont eu lieu pendant la haute saison touristique (14/04/24 et 23/08/22) et deux autres pendant la basse saison (16/06/22 et 25/05/22) et les niveaux dB pour ces deux périodes ont été calculés (Figure 24). On considère les périodes de décembre à avril puis juillet-août comme la haute saison touristique ; la fréquentation estivale étant faite essentiellement par des martiniquais habitant en France hexagonale. L'industrie de la récréation touristique marine (location bateau, clubs de plongée, excursionnistes, ...) réalise un très bon chiffre d'affaires durant cette période.

Pour l'ensemble des fréquences, le bruit était plus important pendant la basse saison. Il est important de noter que l'écart-type des niveaux dB est très élevé pendant la saison touristique (par exemple, 40 dB pour la fréquence 160 Hz), ce qui suggère de grandes variations de bruit

pendant cette période. Ce type de bruit est considéré comme aigu, c'est-à-dire de courte durée mais souvent très intense, tel que celui généré par le passage d'un navire. En revanche, les bruits durant la saison basse sont considérés comme chroniques, avec des écarts-types plus faibles.

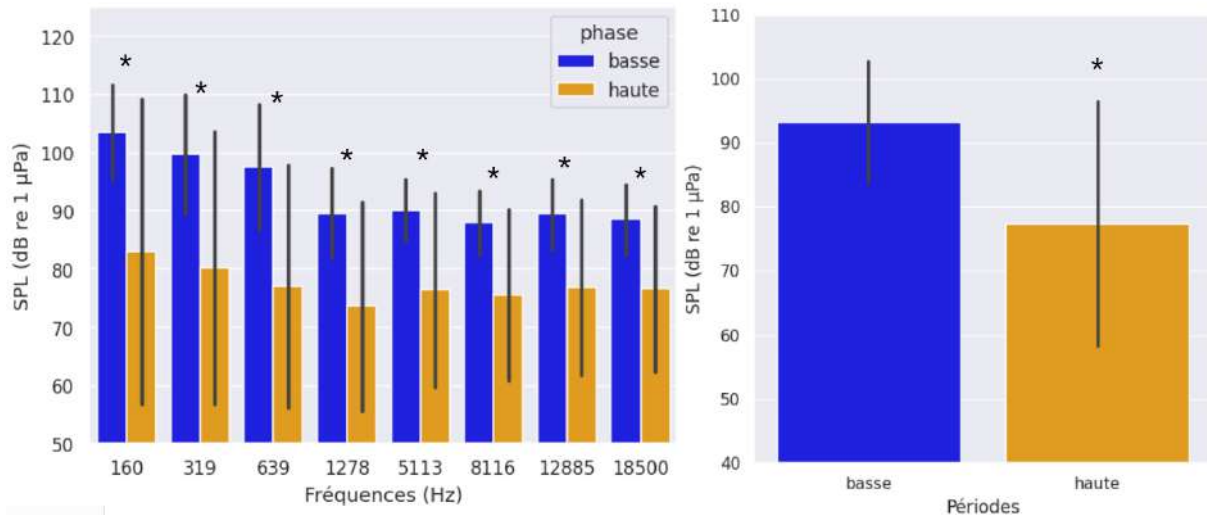


Figure 24: Évolution des niveaux de bruits en fonction des fréquences et de la phase (basse/haute).

La Figure 25 représente le niveau de bruits dans la baie moyenné sur toutes les fréquences, entre la période touristique basse et la haute période touristique. Les deux cartes sont relativement identiques, avec moins de bruits au large pour les deux périodes.

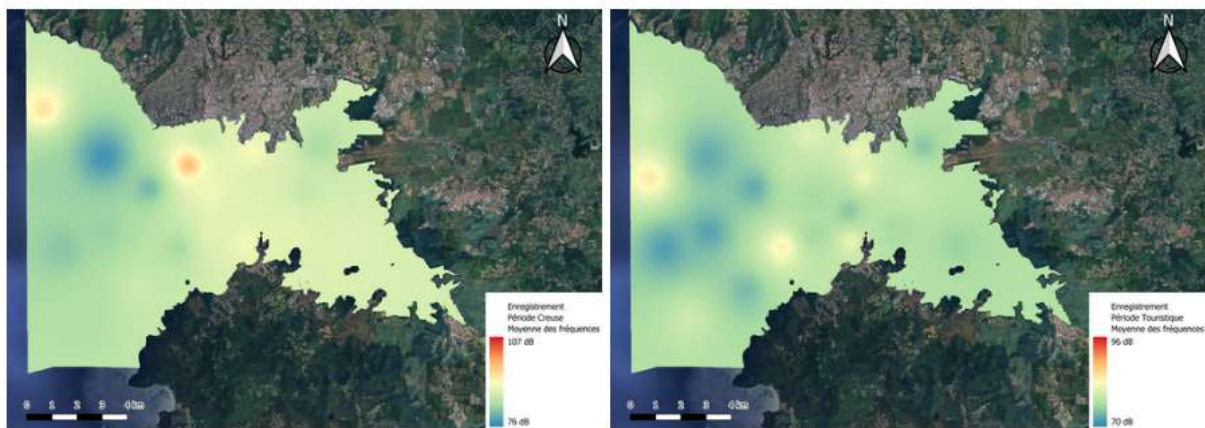


Figure 25: Comparaison des niveaux dB pendant la période touristique basse (gauche) et pendant la période touristique haute (droite) pour l'ensemble des fréquences.

3.3.5 RÉSULTATS DE LA MERCURY BEACH

La Mercury Beach est un événement qui s'est déroulé à Grande Anse, sur la commune des Anses d'Arlet, dans le sud de la Martinique, le 27 juillet (de 9h du matin jusqu'à tard dans la nuit). Plus de 12 000 personnes étaient présentes, accompagnées de 450 embarcations qui ont mouillé à proximité de la scène dans la baie. Les premiers bateaux sont arrivés à partir de 4h du matin.

L'hydrophone déployé a enregistré une partie de l'événement (jusqu'à 18h15 le 27/07).

La Figure 26 montre la variation des niveaux sonores au fil du temps (de 20 Hz à 2,5 kHz). Avant l'arrivée des bateaux pour la Mercury, les niveaux sonores sont relativement bas, oscillant autour de -55 dB. Les niveaux sonores sont relativement constants et faibles. À partir de 4h du matin le 27, on observe une augmentation significative des niveaux sonores, atteignant environ -15 dB. Cela correspond à l'arrivée des bateaux sur le site, causant une augmentation importante du bruit sous-marin.

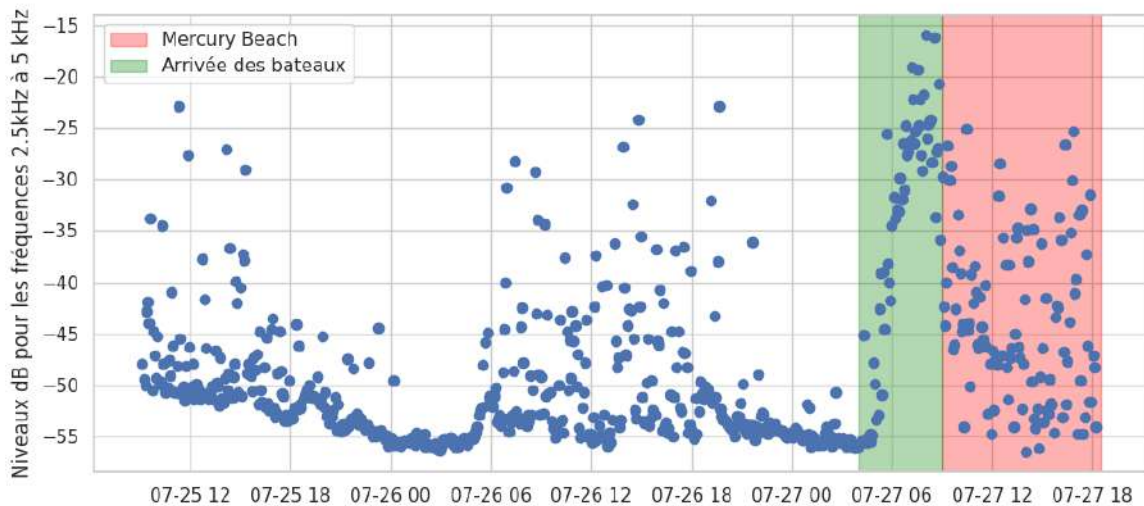


Figure 26: Évolution des niveaux dB du 25/07 à 16h jusqu'au 27/07 à 22h pour les fréquences comprises entre de 2,5 kHz et 5 kHz. La période en rouge correspond à l'événement de la Mercury Beach, et la période verte correspond à l'arrivée des bateaux sur le site.

La Figure 27 représente la moyenne des niveaux de bruits pour les fréquences comprises entre 2,5 kHz et 5 kHz, pendant la période "normale" (sans la Mercury Beach), et également durant l'événement. Les niveaux de bruits moyens en période normale sont de -51 dB, tandis que durant l'événement les niveaux dB ont augmenté et sont à -40 dB. Cette différence de 11 dB est très importante (l'échelle des dB étant logarithmique, niveau sonore à -40 dB est environ 13,8 fois plus intense que le niveau sonore à -51 dB.).

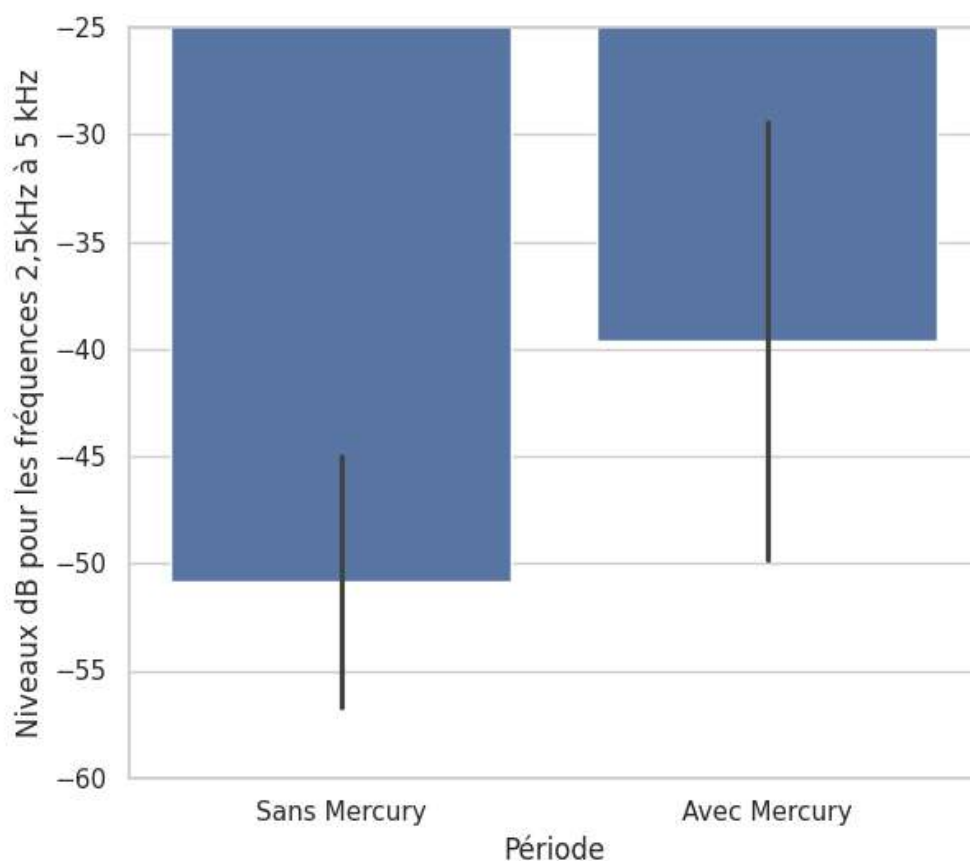


Figure 27: Évolution des moyennes des niveaux dB pour les fréquences comprises entre 2,5kHz à 5 kHz durant la Mercury Beach et avant l'événement.

3.3.6 RÉSULTATS DU TOUR DES YOLES

Le Tour Des Yoles (TDY) est un événement historique en Martinique. La 38ème édition a commencé le lundi 15 Juillet et s'est terminée le dimanche 21 Juillet 2024. Dans le cadre de cette étude, c'est l'étape 4 qui a été enregistrée (voir Annexe F) : Fort-de-France – Anses d'Arlet, le 18 juillet 2024. Le départ a été lancé à 10h, et à 11h30 les premières Yoles sont entrées dans la baie de Grande Anse. La dernière Yole a quitté la baie à 12h10 (Figure 28).

Caractérisation des niveaux de bruits de la baie de Fort-de-France, Rapport Final Aquasearch - 2024

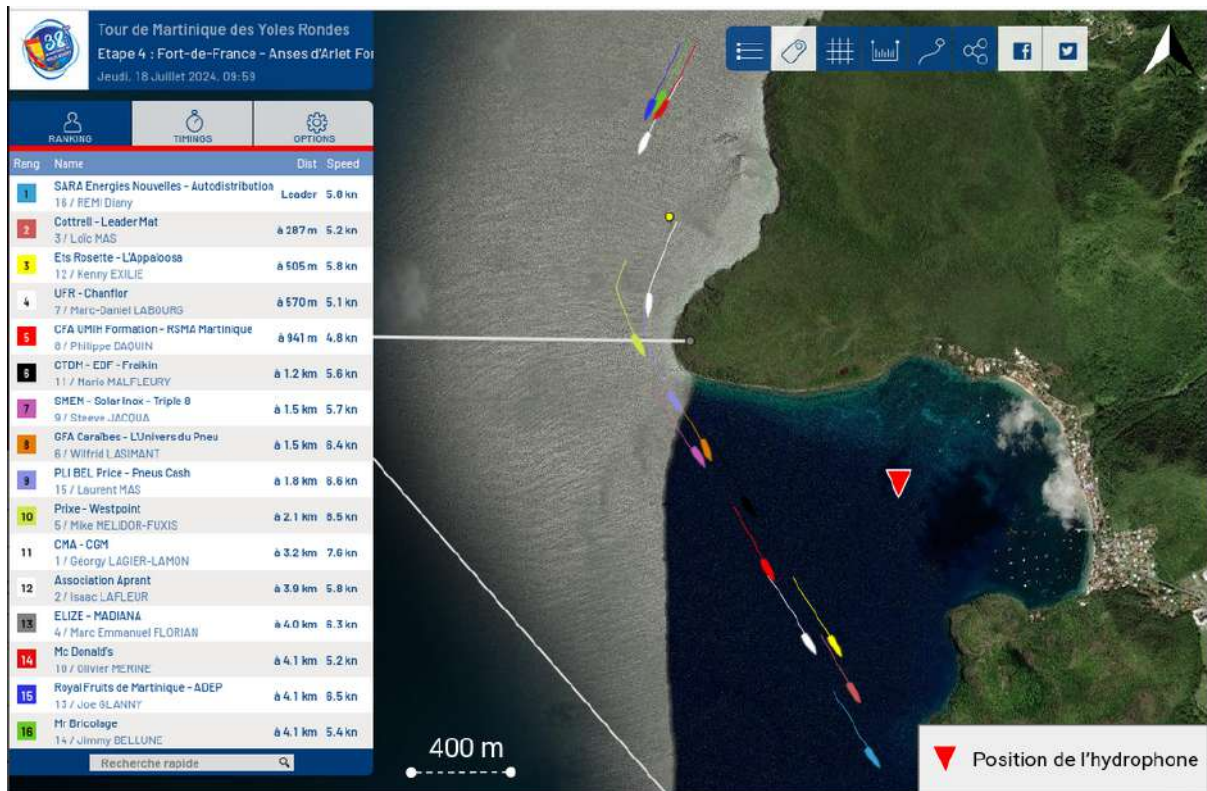


Figure 28: Carte du passage des Yoles à 11h37 le 18 Juillet (Source : <https://player.georacing.com>) avec la position de l'hydrophone.

La Figure 29 montre le cycle quotidien des niveaux de bruits de Grande Anse en fonction du temps avec des niveaux beaucoup plus importants durant la journée. La période en rouge symbolise l'arrivée des Yoles dans la baie de Grande Anse. Le niveau de bruit augmente, pendant et surtout après le passage des Yoles.

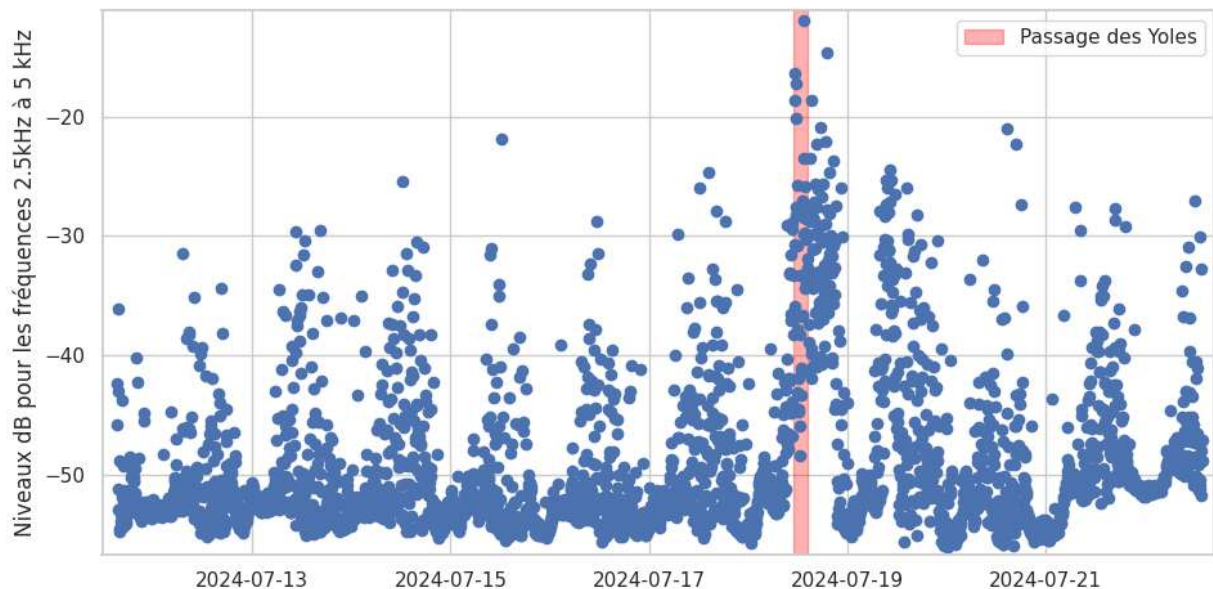


Figure 29: Évolution des niveaux dB du 11/07 à 16h jusqu'au 22/07 à 13h pour les fréquences comprises entre de 2,5 kHz et 5 kHz. La période en rouge correspond à l'arrivée des Yoles dans la baie de Grande Anse (11h à 13h le 21/07).

Les niveaux dB ont été moyennés par heure pour faciliter l'analyse de cette augmentation du bruit. La Figure 30 illustre l'évolution des niveaux dB par heure pour les fréquences de 5 kHz

à 7,5 kHz. Les niveaux de bruits relevés lors de la mise en place de l'hydrophone jusqu'à l'arrivée des yoles sont de -49,4 dB. La période en rouge indique le passage des Yoles. On remarque une première augmentation des niveaux de bruits avec le passage des Yoles et des bateaux d'équipe (-43 dB, soit une augmentation de 6 dB), puis le passage des bateaux suiveurs avec des niveaux de bruits de -39 dB. Il faut remarquer que ce niveau reste constant jusqu'à 19h, car le site où a été posé l'hydrophone est fréquenté par les bateaux pour la soirée. Cette hausse des niveaux de bruit est associée aux émissions acoustiques des centaines de bateaux suiveurs pendant le tour des Yoles.

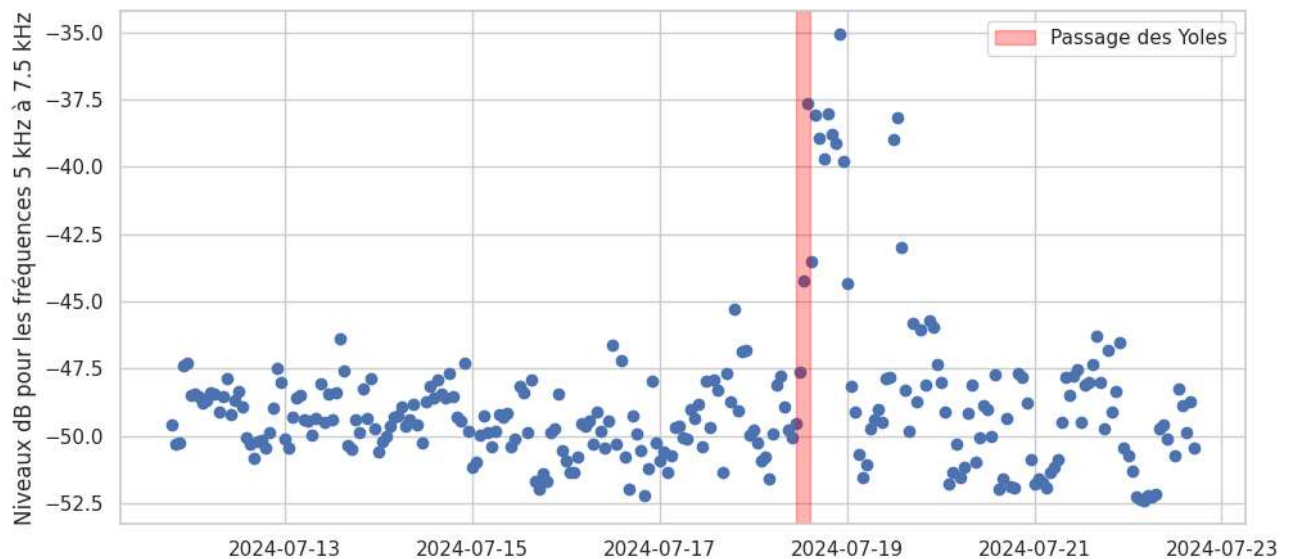


Figure 30: Évolution du niveau de bruit moyen par heure du 11/07 à 16h jusqu'au 22/07 à 13h pour les fréquences comprises entre de 5 kHz et 7.5 kHz.

La moyenne des dB pour les basses fréquences a été calculée lors du passage des Yoles (et 4h après) et sans événement particulier dans la zone (Figure 31). Sans événement particulier le niveau moyen est de -39,2 dB, tandis que durant le passage des Yoles, il monte à -32,06 dB. Il y a donc une augmentation de 7 dB durant le Tour des Yoles pour les basses fréquences (de 20 Hz à 2,5 kHz).

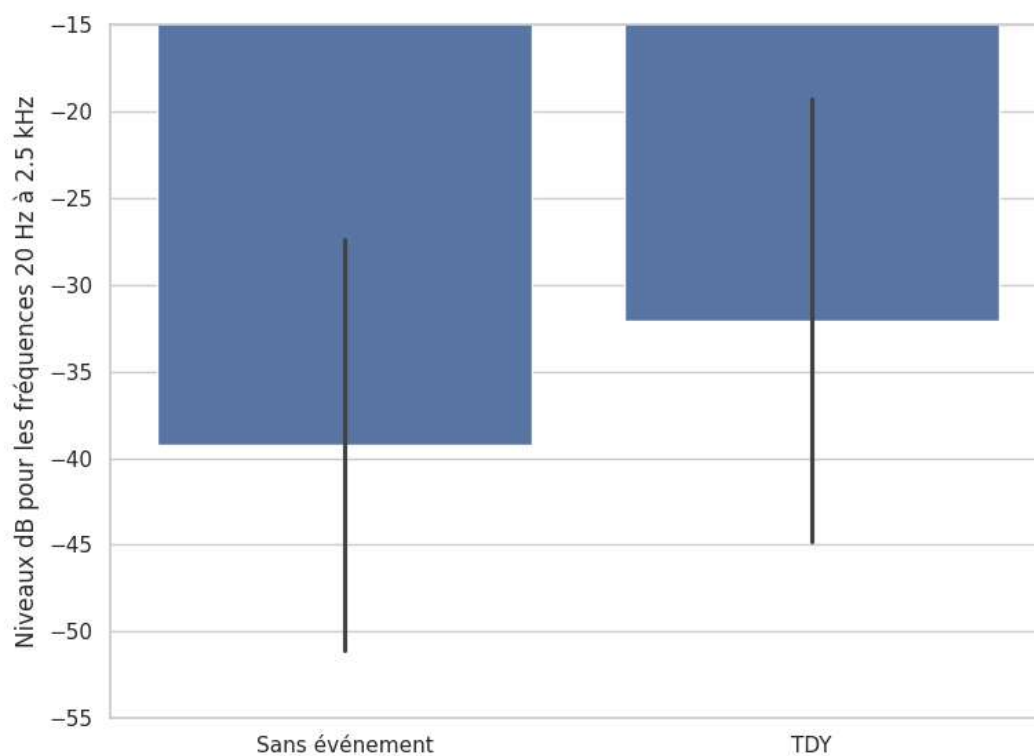


Figure 31: Évolution des moyennes des niveaux dB pour les fréquences comprises entre 20 Hz à 2,5 kHz durant le passage des Yoles et sans l'événement.

4. DISCUSSION

4.1 NIVEAUX DE BRUITS DANS LA BAIE

Cette étude présente les différents niveaux de bruit dans la baie de Fort-de-France, durant le jour et la nuit, à des périodes de l'année différentes. Des événements anthropiques particuliers ont été enregistrés, les niveaux de bruit moyens ont été calculés, et des cartes du paysages sonores ont pu être produites.

Le principal résultat de cette étude montre que le niveau de bruit est jusqu'à dix fois plus élevé pendant la journée que pendant la nuit, et ce sur l'ensemble de la baie. Cette augmentation significative est attribuée à l'activité humaine diurne dans la baie de Fort-de-France. Les différents événements acoustiques, tels que le passage des navettes ou des navires de commerce, illustrent cette hausse du niveau de bruit dans cette zone.

Afin de comparer ces augmentations et ces variations des niveaux dB, le diagramme de Wenz est couramment utilisé dans l'analyse du bruit sous-marin (Wenz 1962). Il représente l'évolution du bruit (géophonie, antropophonie et biophonie) en fonction des fréquences. Le diagramme inclut plusieurs courbes, chacune représentant les contributions de différentes sources de bruit ambiant global. Sur cette courbe, il est possible de voir le trafic maritime (rose). Il commence de 7 Hz jusqu'à 5000 Hz et est émis jusqu'à 90 dB. Ce diagramme correspond à nos résultats en termes de niveaux dB et en termes de fréquences.

Contrairement aux variations des niveaux de bruit entre le jour et la nuit, les différences entre les saisons basse et haute n'ont pas été aussi évidentes. L'étude de la variabilité saisonnière du bruit est difficile à démontrer avec un nombre limité d'enregistrements. L'utilisation de protocoles autonomes avec des stations fixes est recommandée, comme dans l'étude de (Buscaino et al. 2016) où les scientifiques ont placé un hydrophone pendant un an, ce qui leur a permis de mettre en évidence des variations significatives des niveaux de dB aussi bien dans les hautes que dans les basses fréquences.

Afin de visualiser les niveaux de bruits dans la baie, des cartes d'interpolations ont été calculées, en fonction du jour, de la nuit et de la période touristique (basse ou haute). La totalité des cartes est présentée en Annexe D.

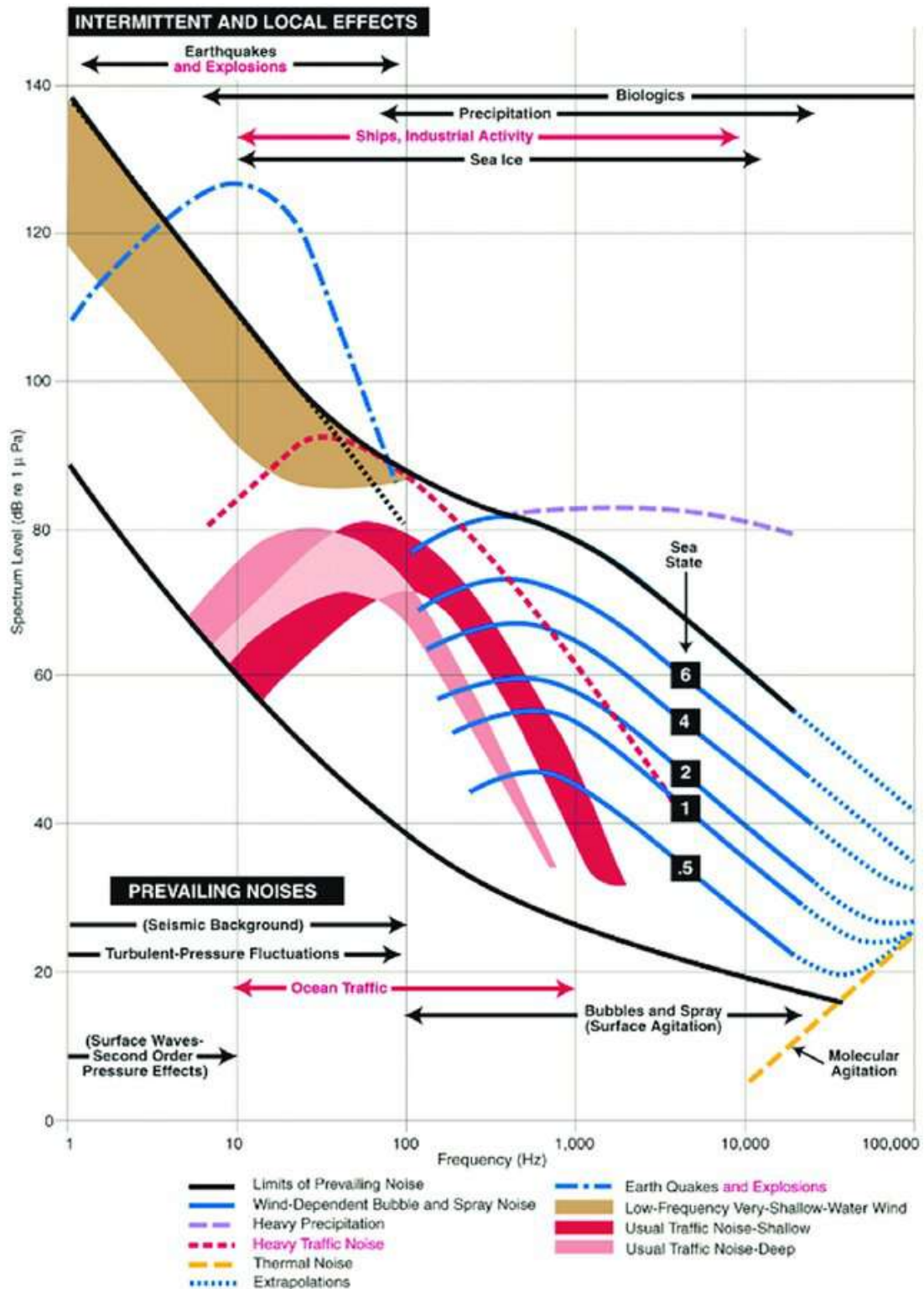


Figure 32: Diagramme de Wenz (Miksis-Olds, Bradley, et Maggie Niu 2013).

Les cartes de bruit sont couramment utilisées pour visualiser le paysage sonore et évaluer le bruit du trafic maritime à grande échelle géographique (Farcas et al. 2020). Cette approche constitue un outil précieux pour la mise en œuvre de la législation et des politiques visant à surveiller et à évaluer les niveaux de pollution sonore anthropique dans les milieux côtiers.

Les cartes de bruit ont révélé que, sur l'ensemble de la baie, le bruit était omniprésent durant la journée, avec une concentration notable entre Fort-de-France et les Trois-Îlets. Ce couloir est particulièrement fréquenté par les navettes, contribuant ainsi à un niveau de bruit élevé dans la baie. Lors des trois sorties diurnes, le couloir de bruit a déjà été clairement identifié, soulignant son intensité et sa persistance.

La nuit, les niveaux de bruit deviennent plus stables dans la baie, bien que des niveaux plus élevés sont observés à la sortie de celle-ci. En résumé, la répartition géographique des niveaux de bruit est principalement influencée par le trafic maritime, en particulier par les routes empruntées par les navettes. La répartition géographique montre une concentration des niveaux sonores les plus élevés dans les zones de forte activité maritime, alors que les zones plus éloignées du trafic principal restent relativement calmes.

4.2 NIVEAUX DE BRUITS DES ÉVÈNEMENTS NAUTIQUES

Cette étude a présenté l'évolution des niveaux de bruit relatifs durant deux événements dans le Sud de la Martinique : la Mercury Beach et le Tour des Yoles. Une augmentation de 11 dB a été constatée pour la Mercury Beach (pour les fréquences de 2,5 à 7,5 kHz), et une augmentation de 7 dB pour le Tour des Yoles (pour les fréquences de 20 Hz à 2,5 kHz).

La durée d'exposition n'est pas la même pour les deux événements. Pour la Mercury Beach, le bruit le plus important est observé juste avant l'événement (de 4h à 9h du matin), en raison de l'installation des bateaux dans la zone. Une fois les bateaux installés, leurs moteurs sont éteints, ce qui entraîne une diminution des niveaux de bruit. Cette étude préliminaire montre que l'installation des bateaux pour la Mercury Beach est beaucoup plus bruyante que l'événement en lui-même.

Concernant le Tour des Yoles, le niveau de bruit est important à partir de 11h, dès l'entrée des yoles dans la zone d'écoute, et ce bruit s'intensifie considérablement après le passage des yoles. Cette forte augmentation perdure jusqu'à 19h et est probablement causée par les centaines de bateaux qui suivent la course depuis la mer.

4.3 POLLUTION SONORE ET IMPACTS SUR LES CÉTACÉS

Lors de nos différentes sorties, des sifflements de delphinidés ont été détectés à la fois durant le jour et durant la nuit, en sortie de baie, sur les points 16 à 19. Sur six sorties, deux ont révélé la présence de cétacés. Les dauphins sont donc présents à la sortie de la baie, mais ne pénètrent pas à l'intérieur de celle-ci. Ce résultat concorde avec l'étude précédente (Ortolé et al. 2023), qui montre que les delphinidés restent en sortie de baie (dauphins de Fraser (*Lagenodelphis hosei*) et dauphins tachetés pantropicaux (*Stenella attenuata*). Il est probable que les delphinidés ne s'aventurent pas dans la baie à cause des niveaux dB trop hauts (particulièrement pendant le jour) et du trafic très important. En effet, les petits cétacés comme les dauphins tachetés pantropicaux sont des espèces côtières et sont donc soumis régulièrement à des niveaux de bruits relativement élevés. La pollution sonore peut avoir un impact direct sur l'abondance de ces espèces (Bejder et al., 2006). En effet, le nombre

d'animaux dans une zone peut diminuer de manière significative en cas de trafic trop important. Ce déclin est dû au déplacement des animaux vers des zones moins fréquentées et donc plus calmes. L'utilisation de l'habitat par les cétacés est ainsi très influencée par la présence de bruit dans l'environnement (Allen et Read, 2000).

Il existe différents types de pollution sonore présents dans la baie de Fort-de-France, qui peuvent être divisés en trois grandes catégories (Maglio 2013):

- Le trafic maritime : navettes, porte-conteneur, tourisimes, militaire, ...
- L'acoustique active : utilisation de sonars pour l'exploration des fonds, sondeurs
- Les travaux sous-marins : aménagements portuaires, mise en place de corps morts, ...

Le trafic maritime est la première source de bruit en mer, certains petits bateaux peuvent produire des sons de 160 à 180 dB/1m, tandis que les navires plus grands (porte-conteneurs) peuvent émettre jusqu'à 190 dB à 1m (Best et al. 2021). Le trafic maritime produit des sons continus qui vont de 6 Hz à plus de 30 000 Hz, couvrant donc une large bande du spectre. Ces différents sons peuvent avoir des impacts négatifs sur les cétacés (Erbe et al. 2019). L'étude de John Richardson et al. (1985) a montré que les approches de petits navires provoquent l'éloignement des baleines boréales, interrompant leur comportement d'alimentation, de socialisation ou de jeu, tout en réduisant le temps à la surface. Cette perturbation peut ainsi entraîner un impact sur la physiologie des animaux. Cet exemple compte parmi beaucoup d'autres. En effet, depuis les années 2000, plus de 150 études ont montré l'impact du bruit, à la fois sur les odontocètes et les mysticètes (Erbe et al. 2019).

La deuxième source de bruit provient de l'acoustique active (sonars et sondeurs) : les sondeurs des bateaux peuvent émettre jusqu'à 235 dB/1m à des fréquences variables (de 3 à 200 kHz). Quant aux sonars militaires, ils peuvent émettre à 236 dB/1m et couvrent des bandes de fréquences de 100 Hz à 8200 Hz.

Les réponses comportementales des cétacés vis à vis de l'acoustique passive peuvent être très variées, et dépendent des espèces, des individus et des comportements initiaux (Southall et al. 2016). À l'heure actuelle, il existe beaucoup de sonars/échosondeurs civiles différents, et leur réel impact sur la faune est peu connu. Il a déjà été montré que le comportement et le sens de direction des globicéphales tropicaux (*Globicephala macrorhynchus*) était modifié lorsque l'échosondeur d'un bateau était activé (Quick et al. 2017), mais les études sur une exposition à long terme sont inexistantes à ce jour.

La dernière source de bruits anthropiques au sein de la baie de Fort-de-France est liée aux travaux sous-marins. Bien qu'il n'y ait pas eu de travaux durant notre analyse, ils peuvent être fréquents dans les baies comme celle de Fort-de-France. Ces travaux comprennent diverses activités telles que le dragage, l'aménagement de structures maritimes (comme les quais, les jetées ou l'installation de corps-morts). Ces différentes activités introduisent du bruit dans l'environnement à des niveaux dB très importants et qui peuvent être létales si l'animal est proche de la source et en fonction du type de bruit émis (continu ou impulsif) (Dazey et al. 2012 ; Nehls et al. 2007).

Le trafic maritime, l'acoustique active et la mise en place de travaux sous-marins peuvent se cumuler sur ces zones côtières comme la baie de Fort-de-France, et l'ensemble de ces

émissions provoque des réponses particulières des cétacés (Parsons et al. 2008). Les scientifiques ont montré que l'impact du bruit anthropique pouvait être variable en fonction des espèces mais également des comportements des individus.

Les dérangements peuvent être résumés en six niveaux (Figure 27) :

- Tolérance/Audibilité : Perception du bruit sans réaction.
- Changements comportementaux : arrêt de l'activité en cours, fuite.
- Masquage : Les émissions acoustiques (écholocation, communication) sont masquées par le bruit émis.
- Baisse du niveau d'audition temporaire (TTS ; Temporary Threshold Shift).
- Baisse du niveau d'audition permanent (PTS : Permanent Threshold Shift).
- Lésion létale : la puissance du son émis peut toucher les poumons ou les reins et entraîner la mort de l'individu.

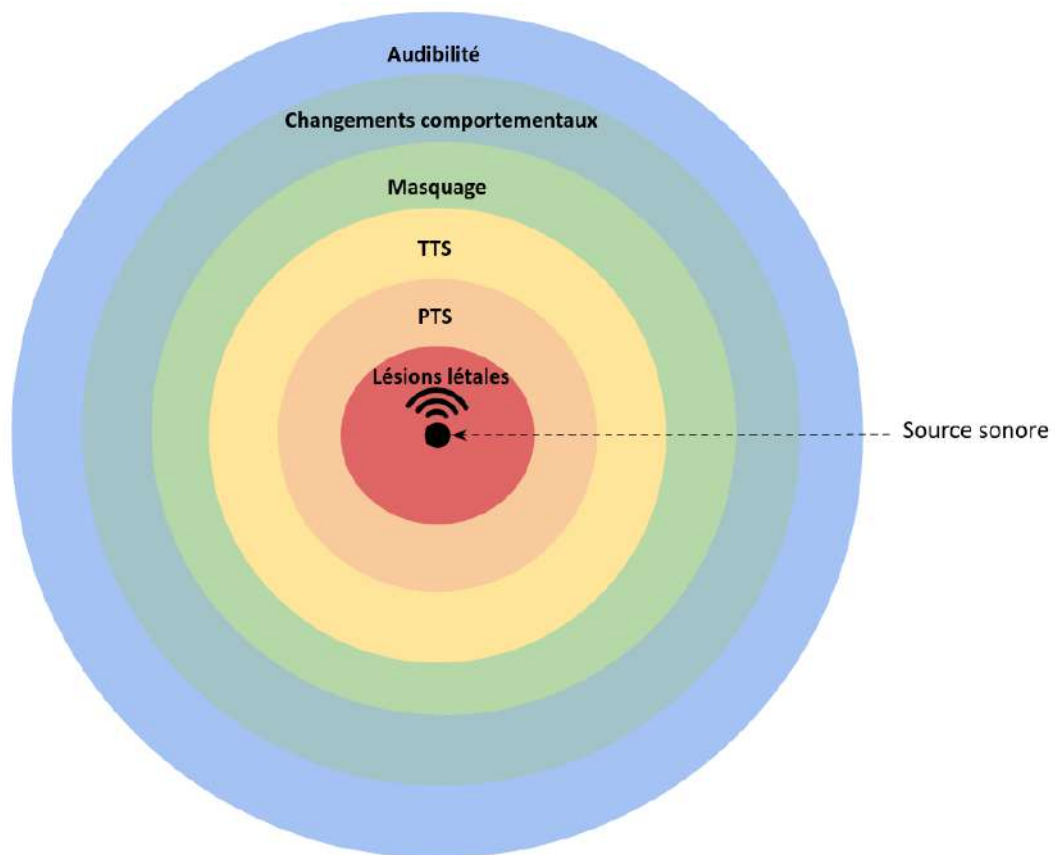


Figure 33: Schéma des différents impacts potentiels des émissions sonores d'origines anthropiques (d'après Richardson, Greene, et Malme 2013).

5. CONCLUSION ET PRÉCONISATIONS

Cette étude a révélé l'influence significative du bruit généré par le trafic maritime dans la baie de Fort-de-France, en particulier pendant la journée, où les niveaux de bruit ont été multipliés par dix pour les basses fréquences. Ce niveau de bruit est élevé dans toute la baie, surtout entre Fort-de-France et les Trois-Îlets. Ce couloir de bruit est induit par les navettes quotidiennes traversant la baie et s'étend jusqu'aux hautes fréquences (18 500 Hz). La nuit, le bruit est beaucoup moins intense et réparti de façon plus homogène dans l'ensemble de la baie, avec un pic au sud-ouest dû aux grands navires qui stationnent dans cette zone.

Les données obtenues pour le tour des Yoles et la Mercury Beach montrent deux choses. Tout d'abord que les gammes de fréquences des navires de plaisance sont plus élevées que celles des navires de commerce. Cela est dû au type de moteur, et cette signature pourrait être utile ultérieurement dans d'autres études pour distinguer les deux types de navires. Ce type de fréquence correspond à celles des sifflements de dauphins, qui pourraient être masqués par le bruit des moteurs. Ensuite, on constate pour les deux événements que les modifications d'environnement acoustique sont brutales et rapides. Nous sommes clairement dans ces deux cas sur des perturbations aiguës, à la différence de la baie de Fort-de-France qui serait de type chronique.

La comparaison du niveau de bruit entre la haute saison et la basse saison touristique n'a pas révélé de différences marquantes. Cela peut être dû au fait que l'activité principale dans la baie (agglomération, transport maritime, transport de passager) est constante durant l'année, et que la saison touristique influe peu sur le niveau de bruit dans la baie. Le bruit dans la baie de Fort-de-France étant essentiellement constitué par des basses fréquences, cela appuie notre hypothèse. Cependant, pour la valider définitivement davantage d'enregistrements sur le long terme sont nécessaires pour déterminer s'il existe des variations de niveaux de bruit entre les saisons touristiques.

Au vu des résultats de cette étude, des observations réalisées lors des études précédentes dans la baie de Fort-de-France (où des cétacés sont observés à l'entrée de la baie) et des observations opportunistes durant le confinement en 2020 (où les cétacés et les baleines à bosse notamment étaient bien présentes dans la baie), les niveaux élevés de bruit durant la journée semble être une des causes de l'absence de cétacés dans la baie (Ortolé et al. 2023). La baie de Fort-de-France est une aire de repos pour les cétacés, elle est abritée des forts vents et de la houle, les fonds sont faibles ce qui assure une protection des prédateurs. Il serait intéressant d'envisager des mesures pour réguler et atténuer les impacts du trafic maritime sur les différentes espèces de cétacés dans la zone afin de leur permettre de réinvestir à nouveau cet espace. Pour cela, plusieurs solutions peuvent être mises en œuvre.

La première est la réduction des niveaux de bruits globaux en équipant les navires de moteurs plus silencieux, ou d'hélices particulières qui limitent la cavitation.

La deuxième solution serait de modifier les routes de navigations des navettes maritimes, afin qu'elles longent davantage les côtes, et donc, de limiter le bruit en milieu de baie. Pour valider le niveau de changement de route, il pourrait être intéressant de réaliser une série de mesures entre Saint-Pierre et l'entrée dans le chenal de la baie de Fort-de-France. On pourrait envisager l'installation de 4 ou 5 hydrophones calibrés et en station fixe le long de cet axe qui

enregistreraient en continu. Pour chaque passage de navire (ayant un émetteur AIS), nous aurions avec précision la vitesse du navire et sa distance par rapport à l'hydrophone et nous pourrions alors connaître avec précision les niveaux de dB émis au regard de sa vitesse et la distance de propagation du bruit. Parallèlement aux relevés du trafic maritime, les hydrophones enregistreront les signaux des cétacés. Au regard des données obtenues jusqu'à présent dans le cadre des projets de recherche menés précédemment, cela viendrait apporter les informations finales permettant d'évaluer l'impact actuel du bruit généré et la superficie du milieu marin impactée. En fonction de ces données, une modélisation permettra d'estimer les niveaux de bruit en fonction de la diminution de la vitesse et proposer des axes de gestion pertinents et adaptés tant pour les cétacés que pour la navigation.

Enfin, la troisième solution porte sur la réduction de la vitesse des navires, qui est aujourd'hui la mesure la plus efficace pour diminuer le niveau de bruit anthropiques. En effet, l'étude de Findlay et al. (2023) a notamment montré qu'une vitesse passant de 10 à 20 nœuds faisait augmenter le niveau dB à 1m de 20 dB. Cette réduction de la vitesse des navires a déjà été mise en place dans certaines régions du monde. Elle a notamment été efficace sur la côte Ouest du Canada, pour protéger les orques résidentes du Sud (danger critique d'extinction) (Joy et al. 2019). Dans l'estuaire du St-Laurent, la vitesse des navires de commerces est limitée à 10 nœuds en cas de présence de cétacés.

Cette réduction de la vitesse a été appliquée pour limiter le bruit et également pour réduire les risques de collisions avec les animaux. Dans l'estuaire du Saint-Laurent, régulièrement, un groupe de travail (pêcheurs, *whale-watchers*, scientifiques...) se réunit afin de trouver une solution consensuelle pour gérer le risque de collisions et l'impact du bruit sur les espèces (Parrott et al. 2016).

On peut également envisager des mesures d'aménagement le long du littoral où les agglomérations sont présentes. La très forte différence de dB entre le jour et la nuit ne peut être expliquée uniquement par le transport maritime. Cela permettrait de diminuer les bruits émis et donc diminuer le bruit ambiant dans la baie de Fort-de-France, comme cela a été montré par les travaux de Leon-Lopez et al. (2021). Le type d'aménagement à proposer n'est pas de notre domaine de compétence, il conviendrait de se rapprocher des organismes adéquates.

En ce qui concerne les deux événements nautiques que sont la Mercury Beach et le tour des Yoles, il s'agit de perturbations aiguës donc ponctuelles mais fortes. Dans les deux cas, cela concerne essentiellement la plaisance côtière. Les routes de navigations étant le long de la côte à forte vitesse. Comme pour les navires de commerce, il conviendrait d'imposer une vitesse réduite, dans un couloir de navigation identifié. Cela semble plus facilement envisageable pour des événements sur des lieux fixes comme la Mercury Beach que pour le tour des Yoles.

Quelle que soit la mesure à mettre en place, il conviendra d'entamer au préalable une concertation avec tous les acteurs concernés afin de leur présenter les enjeux et obtenir une adhésion au projet.

6. BIBLIOGRAPHIE

- Allen, Mark C., et Andrew J. Read. 2000. « Habitat Selection of Foraging Bottlenose Dolphins in Relation to Boat Density near Clearwater, Florid ». *Marine Mammal Science* 16 (4): 815-24. <https://doi.org/10.1111/j.1748-7692.2000.tb00974.x>.
- Bartier, Patrick M., et C. Peter Keller. 1996. « Multivariate Interpolation to Incorporate Thematic Surface Data Using Inverse Distance Weighting (IDW) ». *Computers & Geosciences* 22 (7): 795-99. [https://doi.org/10.1016/0098-3004\(96\)00021-0](https://doi.org/10.1016/0098-3004(96)00021-0).
- Bejder, Lars, Amy Samuels, Hal Whitehead, Nick Gales, Janet Mann, Richard Connor, Mike Heithaus, Jana Watson-Capps, Cindy Flaherty, et Michael Krützen. 2006. « Decline in Relative Abundance of Bottlenose Dolphins Exposed to Long-Term Disturbance ». *Conservation Biology* 20 (6): 1791-98. <https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.2006.00540.x>.
- Best, Paul, Maxence Ferrari, Hervé Glotin, et Marion Poupard. 2021. « Impact of Anthropogenic Sounds on Marine Mammals, Monitoring Techniques and Application to the Abyssound Project ». Université de Toulon. <https://hal.science/hal-03211896/document>.
- Buscaino, Giuseppa, Maria Ceraulo, Nadia Pieretti, Valentina Corrias, Almo Farina, Francesco Filiciotto, Vincenzo Maccarrone, et al. 2016. « Temporal Patterns in the Soundscape of the Shallow Waters of a Mediterranean Marine Protected Area ». *Scientific Reports* 6 (1): 34230. <https://doi.org/10.1038/srep34230>.
- Dazey, Erica, Brittany McIntosh, Shani Brown, et Kathleen M. Dudzinski. 2012. « Assessment of Underwater Anthropogenic Noise Associated with Construction Activities in Bechers Bay, Santa Rosa Island, California ». *Journal of Environmental Protection* 03 (10): 1286-94. <https://doi.org/10.4236/jep.2012.310146>.
- Durand, Gael, et Pascale Saffache. 2002. « Etat des lieux: Diagnostic préalable à l'étude d'un contrat de baie de Fort-de-France ». LITTORALIS : Technopôle Brest-Iroise. Direction de l'Environnement - Martinique. https://www.gesteau.fr/sites/default/files/gesteau/content_files/document/doc_B017-1222698042.pdf.
- Erbe, Christine, Sarah A. Marley, Renée P. Schoeman, Joshua N. Smith, Leah E. Trigg, et Clare Beth Embling. 2019. « The Effects of Ship Noise on Marine Mammals—A Review ». *Frontiers in Marine Science* 6 (octobre):606. <https://doi.org/10.3389/fmars.2019.00606>.
- Farcas, Adrian, Claire F. Powell, Kate L. Brookes, et Nathan D. Merchant. 2020. « Validated Shipping Noise Maps of the Northeast Atlantic ». *Science of The Total Environment* 735 (septembre):139509. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139509>.
- Findlay, Charlotte R., Laia Rojano-Doñate, Jakob Tougaard, Mark P. Johnson, et Peter Teglberg Madsen. 2023. « Small Reductions in Cargo Vessel Speed Substantially Reduce Noise Impacts to Marine Mammals ». *Science Advances* 9 (25): eadf2987. <https://doi.org/10.1126/sciadv.adf2987>.
- Hildebrand, John A. 2009. « Anthropogenic and natural sources of ambient noise in the ocean ». *Marine Ecology Progress Series* 395:5-20.
- John Richardson, W., Mark A. Fraker, Bernd Würsig, et Randall S. Wells. 1985. « Behaviour of Bowhead Whales Balaena Mysticetus Summering in the Beaufort Sea: Reactions to Industrial Activities ». *Biological Conservation* 32 (3): 195-230. [https://doi.org/10.1016/0006-3207\(85\)90111-9](https://doi.org/10.1016/0006-3207(85)90111-9).
- Joy, Ruth, Dominic Tollit, Jason Wood, Alexander MacGillivray, Zizheng Li, Krista Trounce, et Orla Robinson. 2019. « Potential Benefits of Vessel Slowdowns on Endangered Southern Resident Killer Whales ». *Frontiers in Marine Science* 6 (juin):344. <https://doi.org/10.3389/fmars.2019.00344>.
- Lawrence Kinsler, Austin Frey, et Alan Coppers. 1999. *Fundamentals of acoustics*. American Journal of Physics. Vol. 19(4).
- Leon-Lopez, B., Romero-Vivas, E., & Vilorio-Gomora, L. (2021). Reduction of roadway noise in a coastal city underwater soundscape during COVID-19 confinement. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 149(1), 652-659.

*Caractérisation des niveaux de bruits de la baie de Fort-de-France, Rapport Final
Aquasearch - 2024*

- Maglio, A. 2013. « Anthropogenic Noise and Marine Mammals. Review of the Effort in Addressing the Impact of Anthropogenic Underwater Noise in the ACCOBAMS and ASCOBANS Areas ». Fifth Meeting of the Parties to ACCOBAMS.
<https://www.cbd.int/doc/meetings/mar/mcbem-2014-01/other/mcbem-2014-01-submission-accobams-03-en.pdf>.
- Mathias, Delphine, Cédric Gervaise, et Lucia Di Iorio. 2016. « Wind Dependence of Ambient Noise in a Biologically Rich Coastal Area ». *The Journal of the Acoustical Society of America* 139 (2): 839-50. <https://doi.org/10.1121/1.4941917>.
- Mellinger, D. K., Stafford, K. M., Moore, S. E., Dziak, R. P., & Matsumoto, H. (2007). An overview of fixed passive acoustic observation methods for cetaceans. *Oceanography*, 20(4), 36-45.
- Merchant, Nathan D., Kurt M. Fristrup, Mark P. Johnson, Peter L. Tyack, Matthew J. Witt, Philippe Blondel, et Susan E. Parks. 2015. « Measuring Acoustic Habitats ». Édité par David Hodgson. *Methods in Ecology and Evolution* 6 (3): 257-65. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.12330>.
- Miksis-Olds, Jennifer L, David L Bradley, et Xiaoyue Maggie Niu. 2013. « Decadal trends in Indian Ocean ambient sound ». *The Journal of the Acoustical Society of America* 134 (5): 3464-75.
- Nehls, Georg, Klaus Betke, Stefan Eckelmann, et Martin Ros. 2007. « Assessment and costs of potential engineering solutions for the mitigation of the impacts of underwater noise arising from the construction of offshore windfarms ». *BioConsult SH report, Husum, Germany. On behalf of COWRIE Ltd.*
- Ortolé, Célia, Aurore Feunteun, Céline Valin, Morjane Safi, Marion Poupard, Anatole Gros-Martial, Stéphane Chavin, et al. 2023. « Fréquentation de la Baie de Fort-de-France par les cétacés ». Rapport Final.
- Parrott, Lael, Clement Chion, Samuel Turgeon, Nadia Ménard, Guy Cantin, et Robert Michaud. 2016. « Slow down and save the whales ». *Solutions* 6 (6): 40-47.
- Parsons, E.C.M., Sarah J. Dolman, Andrew J. Wright, Naomi A. Rose, et W.C.G. Burns. 2008. « Navy Sonar and Cetaceans: Just How Much Does the Gun Need to Smoke before We Act? » *Marine Pollution Bulletin* 56 (7): 1248-57.
<https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2008.04.025>.
- Quick, Nicola, Lindesay Scott-Hayward, Dina Sadykova, Doug Nowacek, et Andrew Read. 2017. « Effects of a scientific echo sounder on the behavior of short-finned pilot whales (*Globicephala macrorhynchus*) ». *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 74 (5): 716-26.
- Richardson, John, Charles Greene, et Charles Malme. 2013. *Marine mammals and noise*. Academic press.
- Rountree, Rodney A, R Grant Gilmore, Clifford A Goudey, Anthony D Hawkins, Joseph J Luczkovich, et David A Mann. 2006. « Listening to fish: applications of passive acoustics to fisheries science ». *Fisheries* 31 (9): 433-46.
- Schmitz, Barbara. 2002. « Sound production in Crustacea with special reference to the Alpheidae ». In *The crustacean nervous system*, 536-47. Springer.
- Southall, Bl, Dp Nowacek, Pjo Miller, et Pl Tyack. 2016. « Experimental Field Studies to Measure Behavioral Responses of Cetaceans to Sonar ». *Endangered Species Research* 31 (décembre):293-315. <https://doi.org/10.3354/esr00764>.
- Wenz, Gordon M. 1962. « Acoustic ambient noise in the ocean: Spectra and sources ». *The journal of the acoustical society of America* 34 (12): 1936-56.

7. ANNEXES

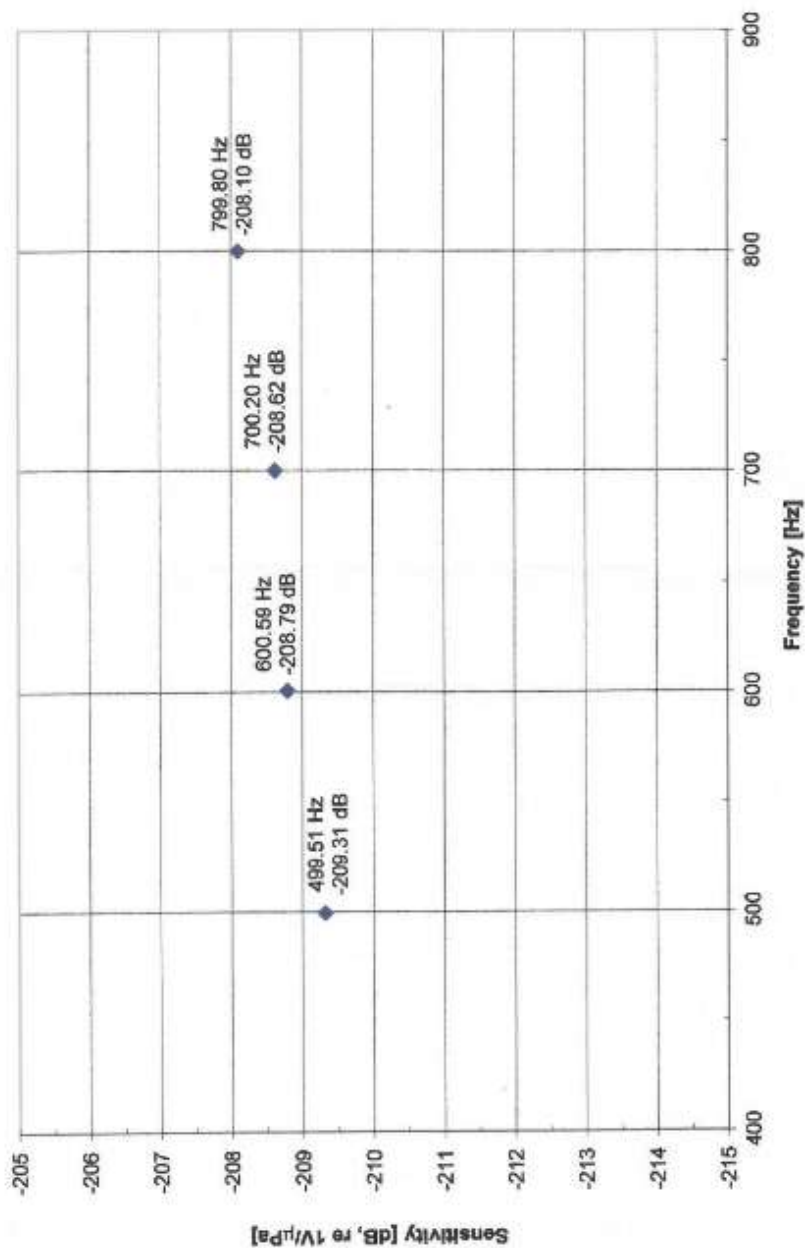
Annexes A: Spécificité de l'hydrophone utilisé (CR3)

| CR3 Hydrophone specifications | |
|---|---|
| Linear Frequency Range (± 3 dB) [kHz] | 0.0004† to 180 |
| Usable Frequency Range (+3/-12dB) [kHz] | 0.0001† to 240 |
| Transducer Sensitivity [dB, re 1V/ μ Pa] | -207‡ |
| Preamplifier Gain [dB] | N/A |
| SPL Equiv. Self Noise at 1kHz [dB, re 1 μ Pa/ \sqrt Hz] | 54 |
| Power Requirement [Vdc] | N/A |
| RMS Overload Acoustic Pressure [dB, re 1 μ Pa] | N/A |
| Maximum Operating Depth [m] | 980 |
| Operating Temperature Range [°C] | -40 to 90‡ |
| Capacitance [nF] | 6.7 |
| Dimensions [mm] | 50 L x 18 dia |
| Coaxial Cable Length [m] | 15 Cable terminated with male BNC connector (longer cable optional) |
| Directionality | omnidirectional |
| Battery / Connector box | power not required |



Cetacean Research Technology
7511 Greenwood Ave N #615
Seattle, WA 98103
1-206-650-8676
www.CatResTec.com

CR3/109 Mean Sensitivity = -208.7dB



Measurement Technique: Comparison method using USRD C100 standing wave hydrophone calibrator
Measurement Date: 12 July 2021

Joseph D. Orr

Annexe B - Listes des bandes de fréquences en tiers d'octave

| Bande de fréquences | Fréquence basses et fréquences hautes |
|---------------------|---------------------------------------|
| 160 | 142 |
| | 179 |
| 320 | 248 |
| | 357 |
| 640 | 569 |
| | 717 |
| 1278 | 1137 |
| | 1436 |
| 5113 | 4550 |
| | 5744 |
| 8116 | 7217 |
| | 9119 |
| 12885 | 11461 |
| | 14492 |
| 18500 | 16463 |
| | 20801 |

Annexe C - Résultats des tests statistiques

Tests statistiques durant le jour

- Shapiro Wilk: stat=0.939; $p\text{-value}=0,1 \cdot 10^{-13}$
- Mann-Whitney: stat=223711.000, $p\text{-value}=0.010$ → Distributions différentes

Tests statistiques durant la nuit

- Shapiro Wilk: stat=0.856; $p\text{-value}=0,2 \cdot 10^{-13}$
- Mann-Whitney: stat=223711.000, $p=2.05e-01$ → Memes distributions

Tests statistiques jours/nuit

| | 160 Hz | 319 Hz | 639 Hz | 1278 Hz | 5113 Hz | 8116 Hz | 12885 Hz | 18500 Hz |
|------------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| Jour Shapiro-Wilk | stat=0.798, $p=1.04e-14$ | stat=0.875, $p=2.74e-11$ | stat=0.906, $p=1.85e-09$ | stat=0.880, $p=5.19e-11$ | stat=0.831, $p=2.17e-13$ | stat=0.861, $p=1.16e-17$ | stat=0.879, $p=4.56e-11$ | stat=0.891, $p=2.14e-10$ |
| Nuit Shapiro-Wilk | stat=0.671, $p=5.74e-11$ | stat=0.719, $p=5.11e-10$ | stat=0.779, $p=1.15e-08$ | stat=0.754, $p=2.94e-09$ | stat=0.909, $p=1.26e-04$ | stat=0.905, $p=1.01e-07$ | stat=0.956, $p=1.91e-02$ | stat=0.962, $p=3.92e-02$ |
| Comparaison Mann-Whitney | stat=10256, $p=2.05e-15$ | stat=10030, $p=6.58e-14$ | stat=9791, $p=2.09e-12$ | stat=9468, $p=1.59e-10$ | stat=9286, $p=1.53e-09$ | stat=9100, $p=1.37e-08$ | stat=8787, $p=4.09e-07$ | stat=8509, $p=6.16e-06$ |

Tests statistiques saison haute/basse

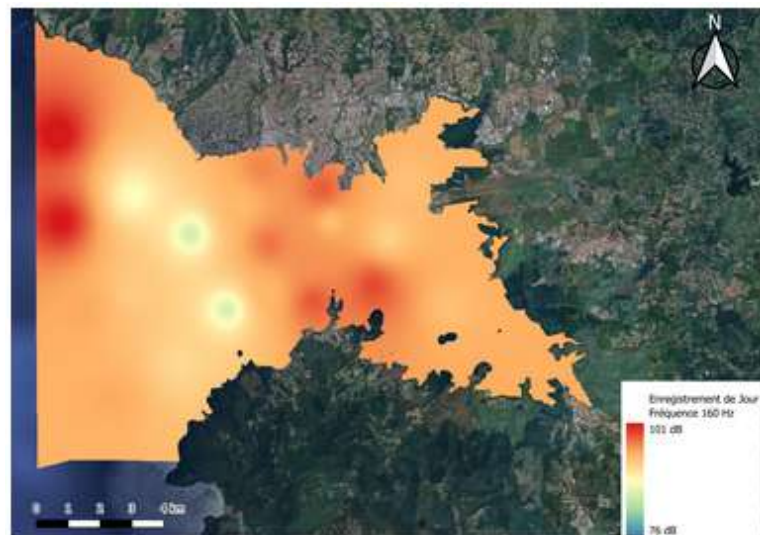
| | 160 | 319 | 639 | 1278 | 5113 | 8116 | 12885 | 18500 |
|------------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| Touristique Shapiro-Wilk | stat=0.845, $p=1.08e-07$ | stat=0.870, $p=7.84e-07$ | stat=0.880, $p=1.91e-06$ | stat=0.884, $p=2.64e-06$ | stat=0.891, $p=5.10e-06$ | stat=0.896, $p=3.27e-09$ | stat=0.885, $p=3.05e-06$ | stat=0.874, $p=1.11e-06$ |
| Creuse Shapiro-Wilk | stat=0.971, $p=2.02e-02$ | stat=0.994, $p=9.22e-01$ | stat=0.986, $p=3.69e-01$ | stat=0.968, $p=1.23e-02$ | stat=0.911, $p=2.84e-06$ | stat=0.955, $p=3.83e-06$ | stat=0.975, $p=4.43e-02$ | stat=0.974, $p=3.50e-02$ |

| | | | | | | | | |
|-------------------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| Comparaison Mann- Whitney | stat=5774 p=1.30e-05 | stat=6067 p=2.31e-07 | stat=6475 p=2.91e-10 | stat=6274 p=9.11e-09 | stat=6099 p=1.43e-07 | stat=6206 p=2.73e-08 | stat=6094 p=1.54e-07 | stat=6084 p=1.79e-07 |
|-------------------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|

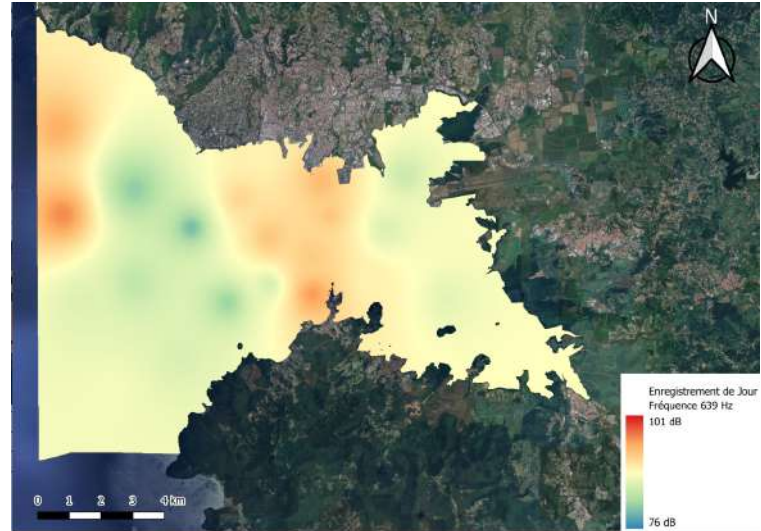
Annexe D - Cartographies des niveaux dB

Jour

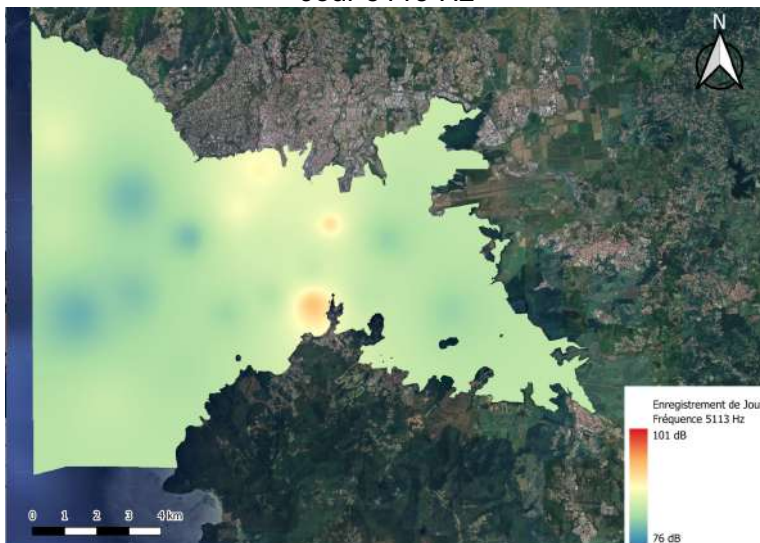
Jour 160 Hz



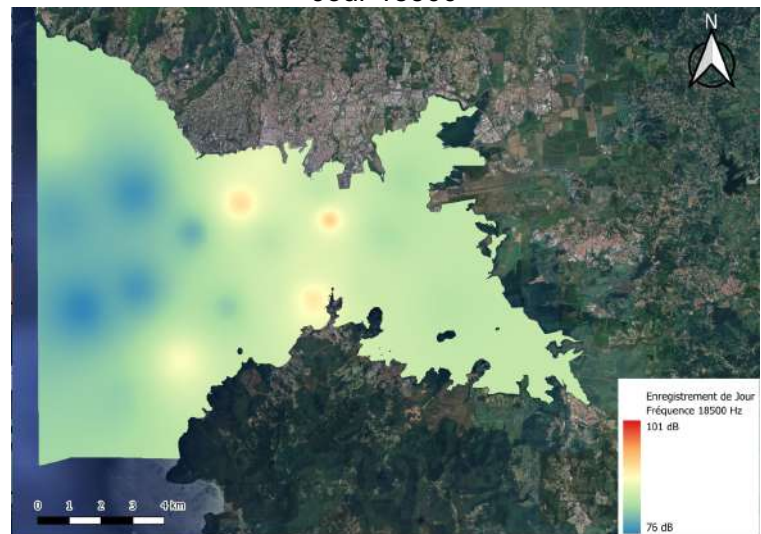
Jour 639 Hz



Jour 5113 Hz

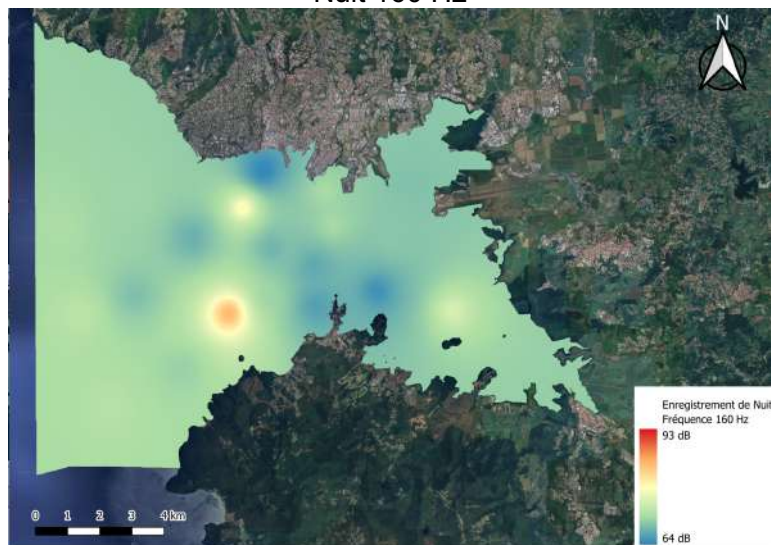


Jour 18500

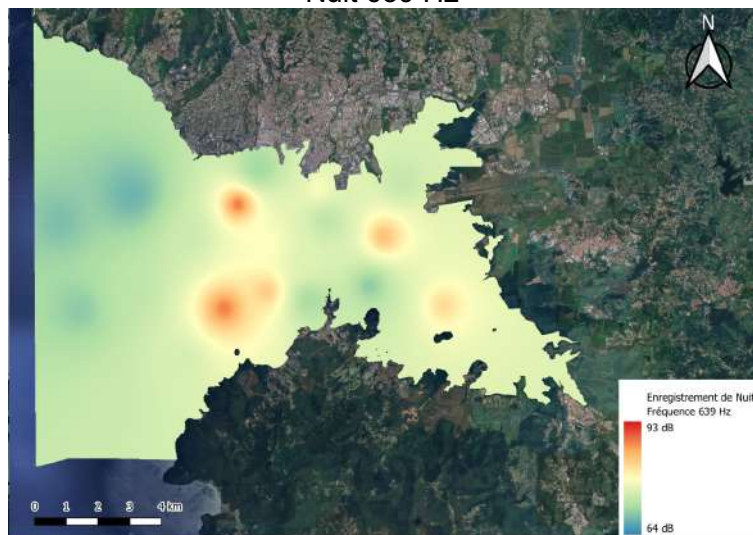


Nuit

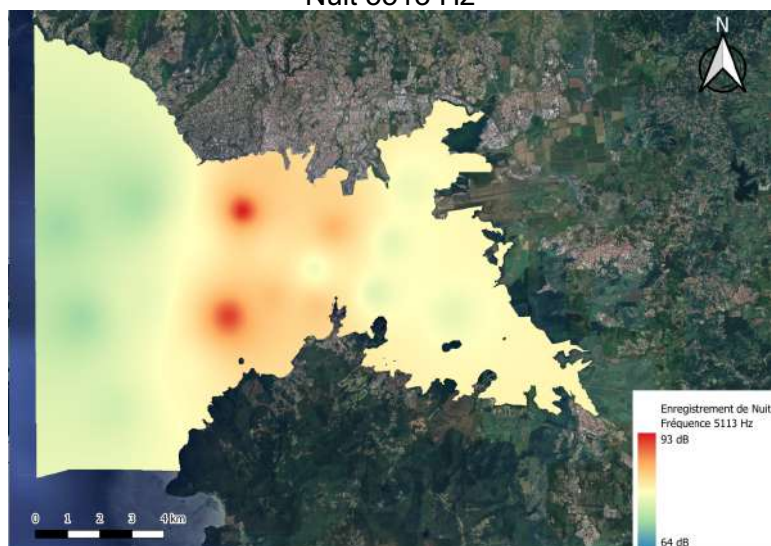
Nuit 160 Hz



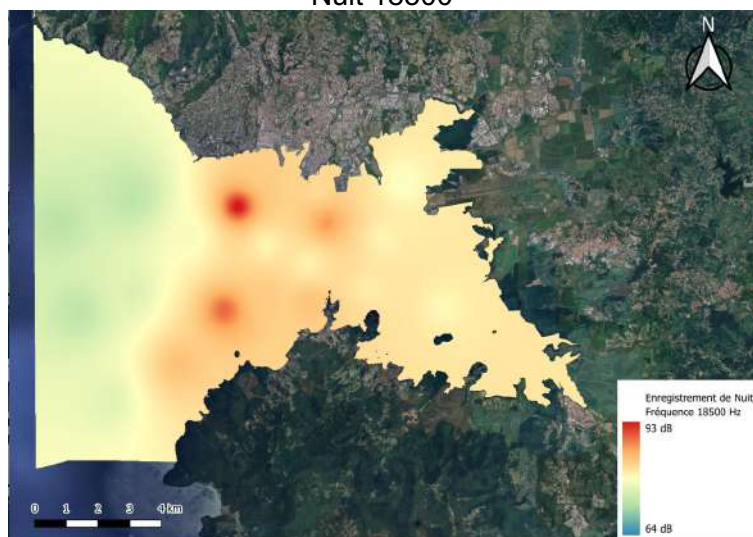
Nuit 639 Hz



Nuit 5513 Hz

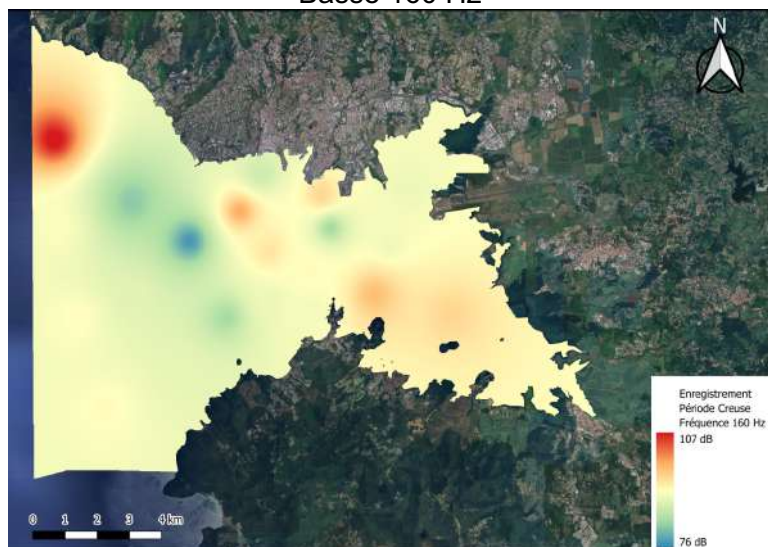


Nuit 18500

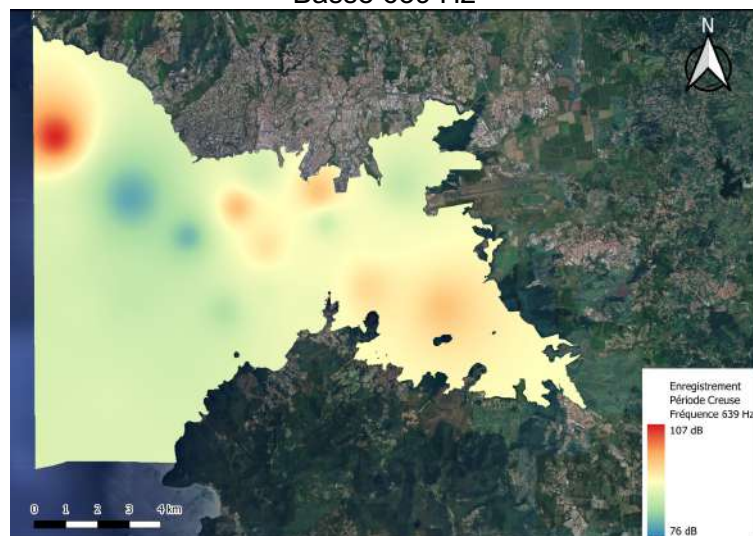


Saison basse

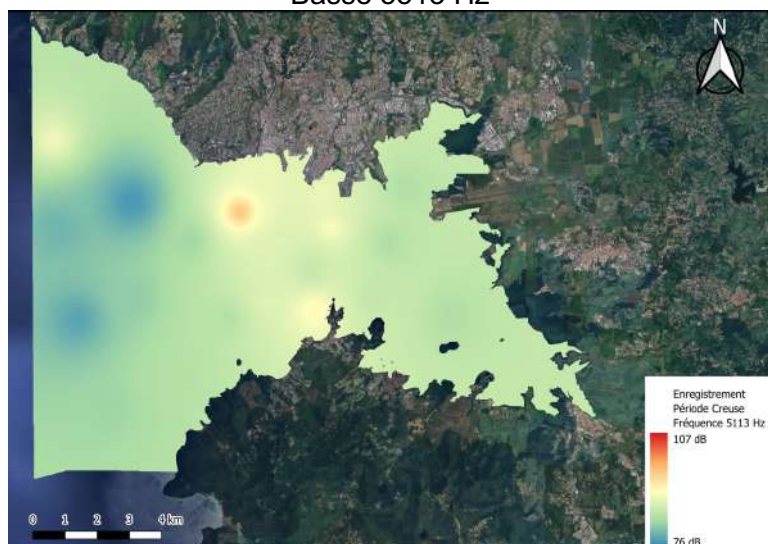
Basse 160 Hz



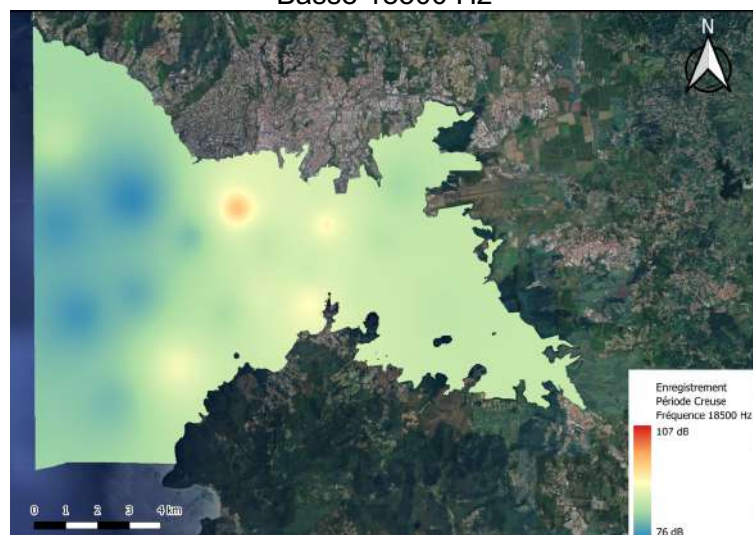
Basse 639 Hz



Basse 5513 Hz

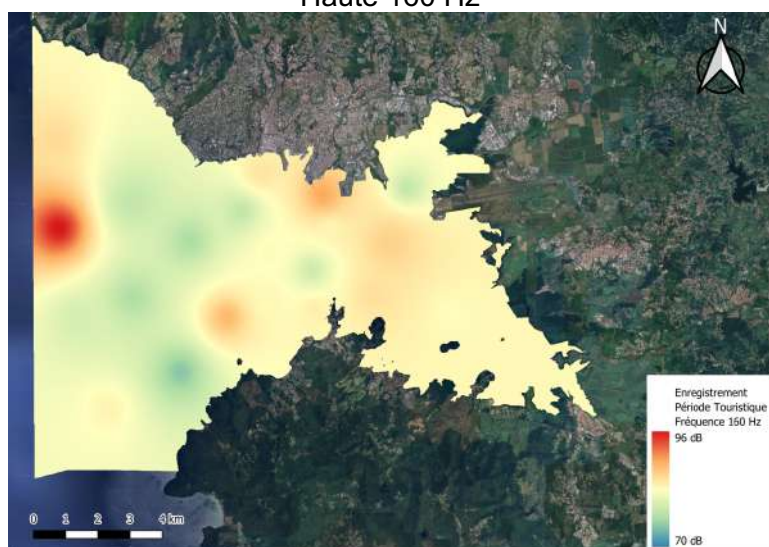


Basse 18500 Hz

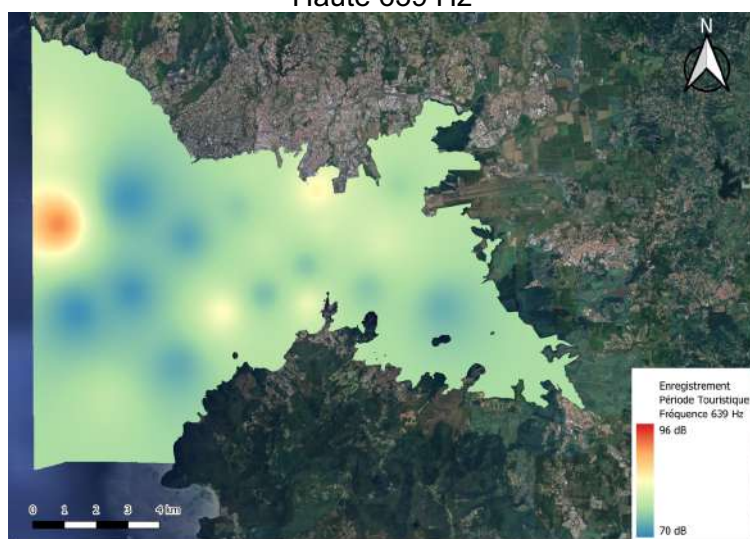


Saison haute

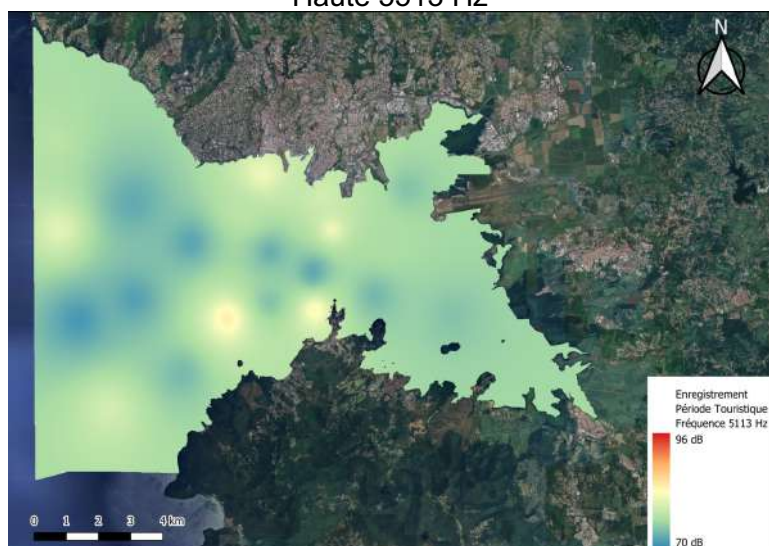
Haute 160 Hz



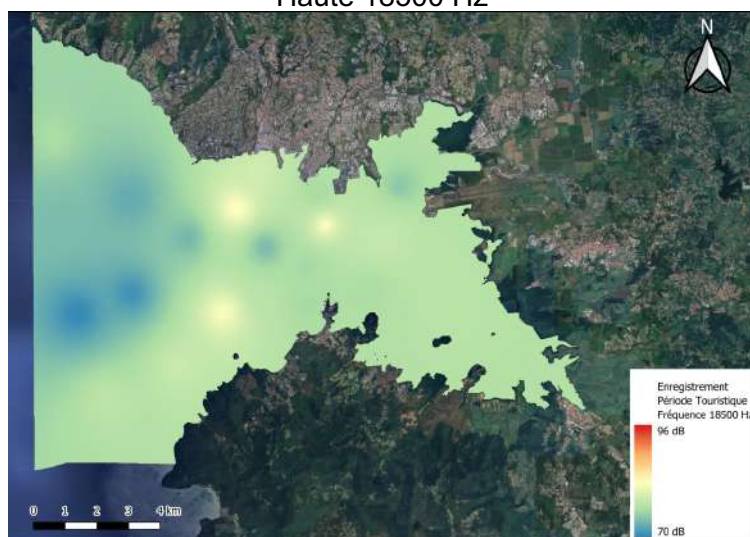
Haute 639 Hz



Haute 5513 Hz



Haute 18500 Hz



Annexe E – Caractéristiques techniques du matériel

Acquisition

- › Fréquence d'acquisition : 512 Ksps / 256 Ksps / 128 Ksps / 64 Ksps / 32 Ksps / 8 Ksps,
- › Fréquence du signal d'entrée : 5 Hz to 256 kHz,
- › Acquisition en 8, 16 bits, réglable via un script de configuration,
- › Acquisition différentielle avec niveau d'entrée maximal 3.3V,
- › Horodatage précis,
- › Filtrage anti-aliasing du signal d'entrée configurable sans modification du signal d'entrée dans la bande passante (voir section caractéristique des filtres).

Amplificateur

- › Amplification du signal de l'hydrophone : X2,
- › Entrée single ended et sortie différentielle,
- › Impédance d'entrée : 10^{13} Ohm.

Stockage

- › Stockage sur support carte micro SD (ou SD via un adaptateur).

Consommation d'énergie

- › Consommation maximale : 1.65W en acquisition continue (SD et Hydrophone CR3 compris)

Hydrophone C75

- › Sensibilité du transducer: -200dB, re. 1V/ μ Pa
- › Gain du pré amplificateur: 20dB
- › Sensibilité effective: -180 dB, re. 1V/ μ Pa
- › Bande passante linéaire: 10Hz à 170kHz(± 3 dB)
- › Bande passante utilisable: 3Hz à 250kHz(+3/-12dB)
- › Alimentation 5 à 32Vdc
- › Pression acoustique de surcharge: 184 à 201dB, re 1 μ Pa



Annexe F – Représentation du parcours de l'étape 4

