



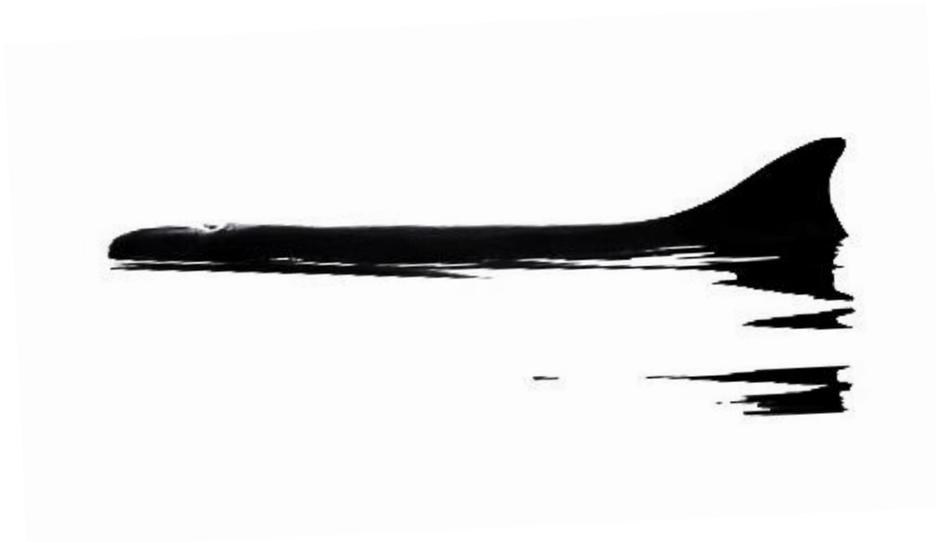
- Université des Antilles -  
Mémoire de master 2 en Ecologie Marine Tropicale

---

# ÉTUDE PRÉLIMINAIRE DE LA DIVERSITÉ, DISTRIBUTION, MENACES, MOUVEMENTS, ET ACOUSTIQUE DES KOGIIDAE DANS LES PETITES ANTILLES

---

Mai 2025 | **Mahé GUERIN**  
Organisme d'accueil : Caribbean Cetacean Society  
Responsable de stage : Louise SIMON



## RÉSUMÉ

Les Kogiidés comptent parmi les cétacés plongeurs profonds les moins étudiés au monde, en raison de leur comportement cryptique en surface. A l'échelle des Petites Antilles, la méconnaissance de ces espèces freine encore la mise en place d'actions de conservation adaptées. Pour combler ces lacunes, cette étude préliminaire propose un premier aperçu de l'écologie du cachalot nain (*Kogia sima*) dans l'ensemble de la région, puisqu'aucune donnée ne permet de confirmer la présence de la deuxième espèce du genre. Malgré le nombre limité d'observations visuelles collectées en mer ( $n = 32$ ) lors d'expéditions menées par la Caribbean Cetacean Society, ces données révèlent pour la première fois un mouvement inter-île dans l'archipel. Deux individus d'un même groupe ont été observés une première fois au nord de l'île de Marie-Galante (Guadeloupe), puis à nouveau trois jours plus tard au sud-ouest de la Martinique. Par ailleurs, 80% des observations visuelles ont été confirmées par des détections acoustiques, soulignant l'efficacité et l'intérêt capital de considérer l'acoustique passive comme méthode d'échantillonnage des cétacés discrets. L'analyse acoustique a également mis en évidence des clics d'écholocation atypiques à 117 kHz, une découverte surprenante qui met en lumière une potentielle particularité locale. Enfin, la bathymétrie, la concentration en chlorophylle-a et la vitesse des courants de surface ont été sélectionnées dans le modèle additif généralisé comme prédicteurs pour cartographier la distribution probable de *K. sima*, en lien avec ses préférences d'habitat. Ces premiers résultats constituent ainsi une base précieuse pour affiner, à l'avenir, notre compréhension de l'espèce, et ouvrent la voie à un suivi renforcé pour une gestion appropriée dans la Caraïbe.

## ABSTRACT

Kogiids are among the least-studied deep-diving cetaceans in the world due to their cryptic surface behavior. In the Lesser Antilles, limited knowledge of these species continues to hinder the implementation of appropriate conservation measures. To address these gaps, this preliminary study provides a first overview of the ecology of the Dwarf Sperm Whale (*Kogia sima*) across the region, as no data currently confirm the presence of the second species of the genus. Despite the limited number of visual sightings collected at sea ( $n = 32$ ) during expeditions led by the Caribbean Cetacean Society, these data reveal, for the first time, inter-island movement within the archipelago. Two individuals from the same group were first observed north of the island of Marie-Galante (Guadeloupe), and then again three days later in the southwest of Martinique. Additionally, 80% of visual sightings were confirmed by acoustic detections, highlighting the effectiveness and critical importance of passive acoustics as a sampling method for elusive cetaceans. Acoustic analysis also revealed atypical echolocation clicks at 117 kHz, a surprising finding that highlights a potential local peculiarity. Finally, bathymetry, chlorophyll-A concentration, and surface current velocity were selected in a Generalized Additive Model as predictors to map the likely distribution of *K. sima* in relation to its habitat preferences. These initial findings provide a valuable baseline for improving our understanding of the species, paving the way for enhanced monitoring and, consequently, appropriate management in the Caribbean.

## REMERCIEMENTS

Je tiens en premier lieu à remercier tous les partenaires de la CCS, à savoir le WWF Pays-Bas, la Collectivité Territoriale de la Martinique, le Parc Naturel Régional de la Martinique, la Région Guadeloupe, Animal Welfare Institute, la Dutch Caribbean Nature Alliance, la Blue Marine Foundation, Corail Caraïbes, le CAR-SPAW-RAC, le Muséum National d'Histoire Naturelle, la Blue Nature Alliance, la Fondation AKuo, la Fondation de la Mer, la Fondation Siemiatkowski, l'Ambassade de France auprès des États membres de l'OECD, l'Agence Française de Développement, et la Commission Baleinière Internationale, pour leur soutien financier.

Ensuite, je souhaite sincèrement remercier Louise, ma maître de stage, d'abord pour m'avoir permis de réaliser cette aventure précieuse, que j'ai profondément prise à cœur. Apporter ma pierre à l'édifice de la recherche sur les Kogiïdés m'a sincèrement réjoui, et me motive d'autant plus à poursuivre cet élan. Je te remercie également pour tous tes conseils, ta patience et ton investissement de A à Z dans mes travaux, malgré tes nombreuses semaines passées en mer. Merci pour ta bienveillance et cette assurance que tu inspires en gommant toute forme de hiérarchie dans tes relations professionnelles. Merci aussi pour cette expédition inoubliable, particulièrement riche en souvenirs et en expériences. À croire que ta passion pour les cachalots a su les attirer en grand comité jusqu'à Montserrat, en mode marguerite, tous contre les orques ! Grâce à toi, « *Coming to the Bow* » et « *Still at Noon* » auront bercé nos observations. Par la même occasion, merci à ton « beau-frère » Louis, notre capitaine, pour ses explications et ses conseils de navigation hors pair, lui qui, malgré l'omniprésence des mauvaises conditions de mer, a su faire en sorte que l'expédition se déroule au mieux.

J'envoie tout autant mille mercis à Myrtille, qui nous a malheureusement quittés pour retrouver ses saucisses. Merci de m'avoir marmotté tout le temps de ta présence pendant mon stage, pour nos soirées légèrement arrosées, nos discussions croustillantes, nos plongées et journées détentes à la plage. De toute évidence, je te dois bien une ou deux binches pour avoir hautement prémâché le travail sur toute la partie acoustique, de la mise en place du détecteur de clic à ton acharnement pour explorer les profondeurs du package PAMPal, et nous offrir au final de superbes Wigner plots. Merci pour ta patience (bien que limitée, oups) à m'avoir guidé dans mes premiers pas en analyse acoustique, cette fameuse « science de l'invisible ». Sans toi Mimi, pas de *Kogia*.

De même, merci à toi Julie pour ton immense soutien en début de stage, et pour m'avoir patiemment aidée à trier des dorsales sur Flukebook. C'était fastidieux, mais nos efforts ont fini par porter leurs fruits ! Et bien sûr, merci pour tout le reste de nos aventures, fidèle acolyte toujours prête à en découdre. Merci pour ces sorties bateau bercées par des rencontres inattendues, pour les cours de voile habitable, pour ton rock & rhum et ta détermination à chercher les baleines depuis la côte, alors qu'on sait très bien que ça n'existe pas.

Merci au reste de cette grande équipe qu'a réunie la CCS autour de la conservation des cétacés dans la Caraïbe. Merci à Emma et Thibault à qui je souhaite beaucoup de réussite dans la réalisation de leur projet en métropole, à Ophélie et son rire facile et très contagieux pour avoir su mettre une ambiance plus qu'agréable dans les bureaux. Merci à tous les autres pour ces petits moments de partage qui contribuent à rendre cette expérience humainement plus riche. Enfin, un grand merci à Jeff, Stacey, Lucas et Louise, sans qui toutes ces belles actions n'auraient pas vu le jour. Leur rôle indispensable est moteur pour faire tourner la CCS et son réseau d'acteurs à plein régime. Les cétacés comptent sur vous !

Je tiens aussi à remercier tous mes proches de me rappeler ô combien je tiens à vous, malgré la distance qui nous sépare. Merci à mes Pets-Kenos préférés pour leur affection sans limites et leur fort pour refaire le plein d'humour et de bonne humeur avant de repartir. Merci à toi, Ana, pour cette immense dose de bonheur que tu m'as apportée pendant toute la durée de ta présence en revenant vivre à mes côtés. Et même loin, tu es toujours là pour m'aider à remonter la pente quand tout se complique. Merci pour cette énergie folle et ce réconfort spontané que tu sais naturellement me transmettre pour aller de l'avant. De la même manière, je veux remercier mon grand-père pour son investissement dans mes projets et son soutien plus que crucial dans leur concrétisation. Pareillement, comment ne pas remercier ma famille d'avoir fait le déplacement pour découvrir mon quotidien et ramener une note de tropicalité dans leurs yeux, en souvenir de notre enfance à Mayotte. Merci sincèrement à vous tous.

## TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION .....	5
MATÉRIELS ET MÉTHODES .....	8
1. ZONE D'ÉTUDE .....	8
2. MATÉRIELS .....	8
3. MÉTHODES .....	9
RESULTATS .....	13
1. Photo-identification (CMR) et mouvements.....	14
2. Menaces.....	14
3. Acoustique .....	15
4. Modélisation de la distribution.....	17
4.1. Prédiction .....	17
4.2. Validation.....	19
DISCUSSION.....	20
1. Mouvements.....	20
2. Menaces.....	21
3. Acoustique .....	21
4. Distribution .....	22
5. Limitations .....	24
CONCLUSION.....	24
BIBLIOGRAPHIE .....	25

## TABLE DES FIGURES ET TABLEAUX

<b>Fig 1.</b> Illustrations et caractéristiques de <i>K. breviceps</i> (en haut) ; <i>K. sima</i> (en bas). Illustrateur : Uko gorter.....	5
<b>Fig 2.</b> Schéma du protocole standardisé .....	8
<b>Fig 3.</b> Courbe de densité, en fonction de la distance de détectabilité du cachalot nain (données 2021-2024).....	11
<b>Fig 4.</b> Évaluation de l'effort d'échantillonnage du cachalot nain en fonction de sa distance de détectabilité : (A) transect 2021 – 2024 ; (B) effort d'observation associé pour <i>K. sima</i> .....	12
<b>Fig 5.</b> Cartes des points d'observations visuelles (2021 – 2024) et de détections acoustiques (2022 – 2024) dans l'arc des Petites Antilles (en haut) et autour de Bonaire (en bas).....	13
<b>Fig 6.</b> Carte de mouvements des individus CCS_Ks_0010 et CCS_Ks_0013 recapturés par photo-identification entre le Nord de Marie-Galante et le Sud-Ouest de la Martinique (données 2021-2024). La flèche orange indique uniquement le sens de la recapture. Le trajet exact entre les deux points d'observation n'a pas pu être déterminé. ....	14
<b>Fig 7.</b> Proportion d'individus blessés (n=24) par catégorie de blessure : blessures d'origine anthropique (categ1, categ2) et blessures d'origine naturelle (categ3, categ4).....	15
<b>Fig 8.</b> Caractéristiques acoustiques des clics de <i>Kogia</i> : (A) Train de 15 clics de <i>Kogia</i> détectés sur PAMGuard ; (B) Intervalle Inter-clic ; (C) Spectre de fréquence ; (D) Forme d'onde d'un clic ; (E) Diagramme de Wigner.....	16
<b>Fig 9.</b> Particularités des clics de <i>Kogia</i> à 117kHz : (A) Spectre de fréquence ; (B) Diagramme de Wigner.....	16
<b>Fig 10.</b> Matrice des corrélations par paires de variables environnementales, calculée à partir des coefficients de corrélation de Pearson.....	18
<b>Fig 11.</b> Prédiction de la relation estimée entre les différentes variables environnementales et la fréquence d'observation des <i>Kogia</i> selon un lissage non linéaire (Tweedie ; $p = 1.01 \sim$ Poisson). Les marques noires sur l'axe des abscisses représentent la distribution de la variable environnementale sur l'ensemble de la zone d'étude, et les traits rouges représentent les valeurs de la variable environnementale de chaque observation d'un groupe de <i>Kogia</i> .....	18
<b>Fig 12.</b> Cartes de prédiction de la distribution des <i>Kogiidés</i> dans la zone d'étude des Petites Antilles, basées sur la combinaison des trois prédicteurs choisis (à gauche) et des coefficients de variation associés (à droite).....	19
<b>Tab 1.</b> Liste et caractéristiques des variables environnementales extraites.....	11
<b>Tab 2.</b> Proportion du nombre de groupes de <i>Kogia</i> observés par île.....	14
<b>Tab 3.</b> Résumé des huit premiers modèles expliquant le mieux la distribution des <i>Kogiidés</i> . La comparaison des modèles est guidée par l'interprétation des valeurs du critère d'Akaike (AIC), de l'écart avec l'AIC le plus faible ( $\Delta$ AIC), et de la déviance expliquée.....	17
<b>Tab 4.</b> Matrice de confusion basée sur les données du jeu de validation.....	19
<b>ANNEXE I</b> CATALOGUE PHOTO_ID 2021-2024.....	28
<b>ANNEXE II</b> EXTRAIT DU JEU DE DONNÉES D'OBSERVATIONS DE <i>KOGIA</i> (2021 – 2024) .....	29

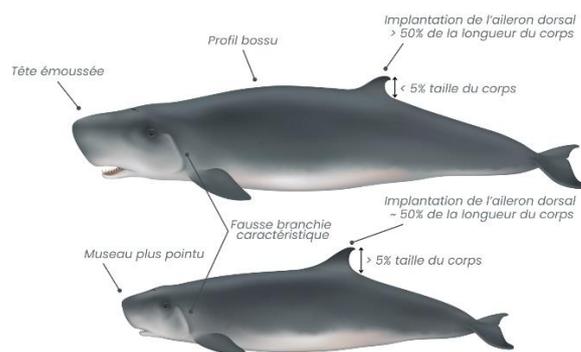
## INTRODUCTION

En milieu marin comme ailleurs, assurer la protection des espèces parapluie est essentiel au maintien de l'équilibre des écosystèmes marins, et par conséquent, à la gestion des services qu'ils rendent à l'Homme (Laran *et al.*, 2017). Pourtant, cet enjeu mondial reste freiné par le manque persistant de connaissances sur certaines des espèces de la mégafaune marine, notamment des cétacés (Plön *et al.*, 2023 ; Kiszka & Braulik, 2020) en raison notamment de la difficulté d'accès à leur milieu de vie et de la nature cryptique de certains d'entre eux (Plön & Baird, 2022). Pour pallier ces lacunes, de nombreuses recherches continuent de voir le jour, reposant sur un principe fondamental, moteur de la conservation des espèces : « Mieux connaître pour mieux protéger » (Mortelmans, citation).

Les cétacés du genre *Kogia* sont les seuls représentants de la famille des Kogiidae (ou Kogiidés), au sein de la superfamille des Physeteroidea (Plön, 2023), appartenant au micro-ordre des odontocètes. A l'heure actuelle, l'appellation *Kogia spp.* ne compte plus que deux espèces (Fig 1.) ; à savoir le cachalot nain (*Kogia sima* ; Owen, 1866) et le cachalot pygmée (*Kogia breviceps* ; de Blainville, 1838). Compte tenu de leur large répartition et de leur apparente abondance relative, elles sont toutes deux présentes sur la liste rouge des espèces menacées de l'UICN sous le statut mondial de « préoccupation mineure », depuis 2019 pour *K. breviceps* et 2020 pour *K. sima* (Kiszka & Braulik, 2020 ; Plön & Baird, 2022).

Bien qu'aucune sous-espèce n'ait encore été reconnue au sein du genre, des analyses phylogénétiques semblent montrer que *K. sima* présente une divergence génétique très significative entre les populations de l'Atlantique et de l'Indo-Pacifique (Chivers *et al.*, 2005 ; Hadoram & Brett, 2020 ; Cawardine, 2022 ; Plön *et al.*, 2023). De même, l'analyse de données d'échouages par Plön *et al.* (2023) pour les cachalots pygmées met en lumière un niveau de différenciation significatif entre les populations du Sud de l'Afrique et de la Nouvelle-Zélande reflétant la présence de populations distinctes, considérées comme isolées sur le plan reproductif.

Les Kogiidés sont réputés pour leur grande discrétion en surface et leur comportement craintif à l'approche d'un navire (Hodge *et al.*, 2018 ; Bloodworth & Odell, 2008 ; Plön, 2004), ce qui limite leur détection.



**Fig 1.** Illustrations et caractéristiques de *K. breviceps* (en haut) ; *K. sima* (en bas). Illustrateur : Uko gorter

Leurs apparitions, généralement brèves et peu démonstratives, ne durent en moyenne que quelques secondes (Kiszka *et al.*, 2024), parfois plusieurs minutes dans un comportement stationnaire couramment appelé « logging » (Baird, 2009), sans éclaboussures ni souffle visible (Hadoram & Brett, 2020). Lorsqu'ils sondent pour regagner les profondeurs, ils se laissent couler lentement sans arquer le corps ni exhiber leur nageoire caudale (Plön, 2004 ; Baird *et al.*, 2021). Leurs apnées prolongées, d'une quinzaine de minutes environ, renforcent cette discrétion (Cawardine, 2022 ; Garrison *et al.*, 2010).

D'autre part, bien que la hauteur et la position de la nageoire dorsale aient été signalées comme distinguant les deux espèces (Bloodworth & Odell, 2008 ; Plön, 2004 ; Baird *et al.*, 1996 ; Fig 1.), leur réelle distinction *in situ* semblerait liée à la taille du groupe, cette dernière n'excédant que très rarement 2 individus pour *K. breviceps* et jusqu'à une douzaine d'individus pour *K. sima* (Dunphy-Daly *et al.*, 2008 ; Dunn & Claridge, 2013 ; Kiszka *et al.*, 2024).

Ces caractéristiques cryptiques témoignent de la difficulté à détecter leur présence en mer, ainsi que d'évaluer la taille et les tendances de leurs populations avec précision (Bloodworth & Odell, 2008 ; McAlpine, 2009 ; Plön, 2023 ; Plön & Baird, 2022 ; Plön *et al.*, 2023).

Largement répartis à l'échelle du globe, les deux espèces possèdent des aires de distribution différentes. Si *K. sima* semble préférer les eaux chaudes des zones tropicales à subtropicales des océans Atlantique, Indien et Pacifique (Willis & Baird, 1998 ; Kiszka & Braulik, 2020 ; Hadoram & Brett, 2020 ; Cawardine, 2022 ; Plön & Baird, 2022 ; Plön *et al.*, 2023 ; Plön, 2004), *K. breviceps* est plus commun dans les régions tempérées (Kiszka & Braulik, 2020 ; Kiszka *et al.*, 2024 ; Violaine *et al.*, 2024 ; Bloodworth & Odell, 2008 ; Plön, 2004). La distribution mondiale proposée de ces animaux n'est presque qu'exclusivement fondée sur des données d'échouages (Plön, 2004), en raison de la

rareté des observations *in situ* (Merkens *et al.*, 2018 ; Plön, 2023).

Ainsi, les échouages fréquents dans le Golfe du Mexique et les côtes du Sud-Est des États-Unis par exemple suggèrent qu'ils sont plus abondants qu'on ne le pense dans ces secteurs (Hadoram & Brett, 2020 ; Garrison *et al.*, 2010 ; Kiszka & Braulik, 2020 ; Plön, 2004 ; Hodge *et al.*, 2018 ; McAlpine, 2009). En effet, autour de l'île principale d'Hawaï, Barlow (2006) rapporte que l'abondance combinée des deux espèces de *Kogia* est étonnamment plus élevée que celle de n'importe quelle espèce commune de delphinidés.

Globalement, en s'appuyant sur l'examen du contenu stomacal des Kogiidés, il est rapporté que leur alimentation, principalement teutophage (Cawardine, 2022 ; Hadoram & Brett, 2020 ; McAlpine, 2009 ; Plön *et al.*, 2023 ; Plön, 2023), a lieu près du fond, voire sur le fond, dans les zones d'upwellings localisés qui concentrent la biomasse de zooplancton et les proies des céphalopodes le long du plateau continental (Bloodworth & Odell, 2008). Ce constat suggère que, quelle que soit la région du monde, les Kogiidés évoluent au niveau de la partie supérieure du talus insulaire et extérieure du plateau continental, au niveau de sa rupture, particulièrement pour *K. sima* (Violaine *et al.*, 2024 ; Kiszka *et al.*, 2024 ; Kiszka & Braulik, 2020 ; Hodge *et al.*, 2018 ; Malinka *et al.*, 2021 ; Dunphy-Daly *et al.*, 2008 ; Baird *et al.*, 2021), approximativement entre 400 et 1000m de profondeur selon Bloodworth & Odell (2008), Baird *et al.* (2013) et Claridge (2006).

*K. breviceps*, quant à lui, montre une plus grande affinité pour les eaux profondes, plus au large (McAlpine, 2009 ; Hodge *et al.*, 2018 ; Baird *et al.*, 2021 ; Plön *et al.*, 2023 ; Bloodworth & Odell, 2008 ; Plön, 2023), entre 600 et 1200m de profondeur selon Plön (2004).

Cette distribution des Kogiidés le long du talus est également influencée par la composition par âge du groupe : ceux comprenant des jeunes, privilégieront une alimentation dans les eaux les moins profondes, plus près des côtes (Baird *et al.*, 2021 ; Plön & Baird, 2022). Une compréhension approfondie des habitats où les espèces ont été observées permettrait de mieux caractériser les facteurs influençant leur distribution et leurs mouvements.

Les études sur les mouvements des Kogiidés sont peu nombreuses et sont en partie rendues difficiles par leur faible détectabilité en mer, limitant ainsi le recours aux méthodes de suivi comme la photo-identification. Toutefois, une forme de fidélité au site de *K. sima* est constatée à l'ouest des côtes de l'île principale d'Hawaï (Baird *et al.*, 2021), suggérant un sédentarisme local. Dans ce secteur, un individu dénommé 'HIKS020', a été

réobservé 14 fois, régulièrement sur une période de presque 15 ans, dans un rayon de 77 km, démontrant sa grande fidélité au site.

Le statut UICN des deux espèces ne repose sur aucune estimation précise de leurs abondances, mais sur des présuppositions liées à leur nature cryptique, l'absence de menaces avérées et leur répartition cosmopolite. À ce jour, l'évaluation de la taille de leurs populations fait défaut, tant au niveau mondial qu'international (Plön, 2023). La somme des estimations d'abondance disponibles dans diverses régions géographiques est supérieure à 10 000 individus, mais comme les relevés n'ont couvert qu'une petite fraction de l'ensemble de l'habitat, l'abondance mondiale totale est probablement beaucoup plus élevée (Kiszka & Braulik, 2020). Dans une étude récente réalisée à Hawaï, Bradford *et al.* (2021) ont évalué la taille de la population à 37 440 individus (CV = 0.78) pour *K. sima* et 42 083 individus (CV = 0.64) pour *K. breviceps*.

La difficulté à obtenir ces tendances est d'autant plus problématique que ces cétacés font face à des menaces croissantes (Kiszka *et al.*, 2024). Dans ce sens, la cardiomyopathie est considérée comme une des principales causes probables des échouages (Bossart *et al.*, 2007), à laquelle s'ajoute d'autres pressions écologiques naturelles comme la prédation, où les cas d'attaques par des orques (Dunphy-Daly *et al.*, 2008 ; Dunn & Claridge, 2013) et de grands requins ne sont pas rares (Plön & Baird, 2022). Ils sont également fréquemment et fortement parasités, notamment par des nématodes intestinaux ou des cestodes larvaires (McAlpine, 2009). L'Homme affecte aussi directement la santé des populations de *Kogia*, en particulier à travers les prises accidentelles dans les engins de pêche (Baird *et al.*, 2021 ; Kiszka *et al.*, 2024), les collisions avec les navires, ou encore l'ingestion de plastique qu'ils confondent avec leurs proies (Plön, 2004).

A l'échelle caribéenne, les données sont très limitées, mais *K. sima* semble être l'espèce prédominante. Les zones les plus documentées au sujet de leur distribution se restreignent aux Bahamas dans les Grandes Antilles (Dunphy-Daly *et al.*, 2008 ; Malinka *et al.*, 2021 ; Merkens *et al.*, 2018), ainsi qu'aux îles de Saint-Vincent-et-les-Grenadines au sud de l'archipel des Petites Antilles (Kiszka *et al.*, 2024), même si quelques observations ponctuelles ont été rapportées au sud de la Martinique (Jeremie *et al.*, 2003). Alors que l'intérêt exact de la région Caraïbe pour ces animaux n'est pas encore connu, plusieurs travaux ont mis en avant des résultats intéressants. En outre, la distribution et l'écologie des Kogiidés

pourraient être influencées par des facteurs environnementaux et saisonniers. Par exemple, aux Bahamas, Dunphy-Daly *et al.* (2008) ont mis en évidence un schéma de déplacement saisonnier, impliquant des mouvements entre le talus continental (400-900 m) de janvier à mars, et le large (900-1600 m) de juin à août. Ce déplacement pourrait être influencé par la migration même de leurs proies, ainsi qu'à la recherche de ces dernières en lien avec des courants potentiellement favorables associés à ces zones.

La présence de juvéniles et de femelles gestantes indiquerait également qu'ils pourraient utiliser la Caraïbe comme zone de reproduction (Cardona-Maldonado & Mignucci-Giannoni, 1999). Malgré cette importance potentielle, une menace supplémentaire à celles déjà identifiées semble s'ajouter dans cette région : la chasse baleinière rapportée au large de Saint-Vincent, où des captures de Kogiidés ont été signalées, même si minoritaires par rapport aux captures de globicéphales tropicaux et autres delphinidés (Kiszka *et al.*, 2024 ; Caldwell *et al.*, 1973). L'émission de sons bruyants dans l'environnement marin *via* les activités nautiques et militaires semble aussi avoir un impact sur l'orientation et la recherche de nourriture des deux espèces (Baird *et al.*, 2021).

Cette nuisance acoustique est d'autant plus problématique que, comme chez le grand cachalot (*Physeter macrocephalus*), les Kogiidés possèdent un organe du spermaceti dans le melon, dont la fonction principale est de produire, d'intensifier et de focaliser activement le son utilisé pour écholocaliser les proies lors des plongées profondes (Plön, 2004). Ils ne produisent à priori aucun sifflement (Merkens *et al.*, 2018) mais ont la particularité d'émettre des séquences en rafale de clics d'écholocalisation, appelés « buzz », à bande étroite, hautement directionnels (8.8 degrés ; Malinka *et al.*, 2021) et à haute fréquence, qualifiés d'NBHF (narrow-banded high-frequency), avec des pics généralement atteints entre 123 et 130 kHz (Merkens *et al.*, 2018 ; Malinka *et al.*, 2021 ; Madsen *et al.*, 2005). Les intervalles inter-clics sont particulièrement longs, permettant une portée de recherche de proie en eau profonde trois à quatre fois plus importante que d'autres petits odontocètes côtiers à biosonar NBHF (Malinka *et al.*, 2021).

A ce jour, aucune confusion acoustique avec d'autres espèces n'est possible. En effet, les seuls odontocètes susceptibles d'émettre des clics aux mêmes fréquences n'ont jamais été signalés dans les Petites Antilles (Read & Westgate, 1997 ; Hadoram & Brett, 2020 ; Madsen *et al.*, 2005 ; Cawardine, 2022 ; Malinka

*et al.*, 2021), permettant d'écarter la possibilité d'une telle confusion.

De plus en plus d'études mettent en lumière le grand intérêt d'utiliser la surveillance acoustique passive (PAM) pour étudier des espèces cryptiques et difficiles d'accès (Merkens *et al.*, 2018 ; Hodge *et al.*, 2018 ; Hildebrand *et al.*, 2019). Les enregistrements acoustiques dans certaines zones stipulent que les cachalots nains ne sont pas aussi rares que les relevés visuels ne l'indiquent (Kiszka & Braulik, 2020 ; Hildebrand *et al.*, 2019). Les méthodes PAM permettent ainsi de répondre aux limites de détection liées à ces observations en décrivant de manière plus représentative l'occurrence et la distribution du genre (Hodge *et al.*, 2018).

L'un des objectifs de la Caribbean Cetacean Society (CCS) est de combler le manque de connaissances sur les cétacés de la Caraïbe. Pour y pallier, le programme « *Ti Whale An Nou* » a vu le jour, et mène depuis 2021 plus de six expéditions scientifiques par an dans les eaux des Petites Antilles, en suivant un protocole standardisé qui combine transects linéaires, observations visuelles, suivi acoustique et photo-identification.

Pour assurer une conservation et une gestion appropriées à l'avenir des Kogiidés, il est prioritaire de déterminer la taille et la structure de leurs populations, leurs répartitions ainsi que les menaces qui pèsent sur elles (Plön & Baird, 2022 ; Bradford *et al.*, 2021). En utilisant les données visuelles et acoustiques collectées entre 2021 et 2024 par ce programme de recherche, cette étude préliminaire se donne alors pour objectif d'apporter une première analyse de la structure de population des deux espèces de Kogiidés dans l'archipel des Petites Antilles. La modélisation de leur répartition en fonction des caractéristiques environnementales, ainsi que l'analyse de leurs déplacements, permettront d'affiner la compréhension de leur présence dans la région et de leurs préférences d'habitat.

## MATÉRIELS ET MÉTHODES

### 1. ZONE D'ÉTUDE

Cette étude est focalisée sur l'ensemble de la région des Petites Antilles, qui s'étend de Grenade au sud, jusqu'à Anguilla au nord, ainsi que des îles néerlandaises situées au-dessus du Venezuela, comprenant Aruba, Bonaire et Curaçao (îles ABC). Compte tenu de cette vaste zone d'échantillonnage, quatre sous-zones ont été définies comme suit : les îles ABC ; le secteur sud (de Grenade à Sainte-Lucie), le secteur Centre (de la Martinique à la Guadeloupe), et enfin le secteur nord (de Montserrat à Anguilla). Les limites de cette zone ont été définies par une distance tampon de 25 km autour du littoral.

L'Arc Antillais sépare l'océan Atlantique de la mer des Caraïbes, délimitant un secteur exposé aux vents des alizés, côté Atlantique, généralement impraticable en raison de l'état de la mer trop souvent dégradé, et un secteur abrité de ces vents d'est par les reliefs insulaires, côté Caraïbe, où les conditions de mer sont plus favorables à l'observation des cétacés. De plus, la topographie sous-marine complexe des Petites Antilles est marquée par des pentes plus abruptes et proches du rivage sur le versant Caraïbe, en comparaison à celui de l'Atlantique (Fig 5).

### 2. MATÉRIELS

#### Protocole standardisé

Depuis 2021, la CCS organise annuellement au moins six expéditions scientifiques de deux semaines dans le cadre du programme « *Ti Whale An Nou* », complétées par 37 jours de formations supplémentaires en 2021 et 2022. Ces formations visent à initier des volontaires martiniquais à la collecte de données, structurée par le protocole standardisé décrit ci-après (Fig 2.), assurant la répliquabilité et la comparabilité des données, et favorisant une collaboration à plus large échelle. Les expéditions sont réalisées à bord d'un catamaran (entre 40 et 46 pieds), au départ systématique de la Martinique. Lors de ces campagnes d'étude, la détection acoustique à l'aide d'un réseau d'hydrophones tractés a été combinée aux observations visuelles effectuées par au moins deux observateurs sur le pont, permettant ainsi aux deux méthodes de se compléter pour une surveillance efficace de la présence/absence des cétacés.

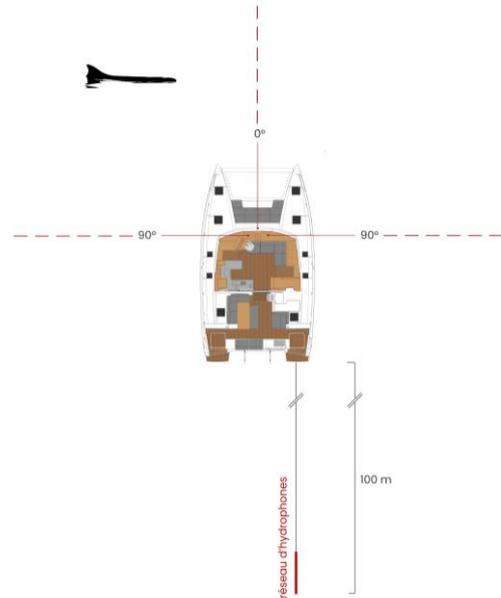


Fig 2. Schéma du protocole standardisé

L'effort d'observation visuelle était limité à la période de jour, de 06h00 à 18h00. Cependant, si les conditions météorologiques devenaient impropres à l'observation (pluie, Beaufort > 4, vitesse du vent réel > 21 nœuds), le protocole était interrompu. Les itinéraires des bateaux étaient définis la veille par le responsable scientifique de l'expédition, en tenant compte des conditions, du temps de navigation et du point d'arrivée prévu. L'équipage était divisé en trois équipes d'au moins deux personnes, alternant toutes les deux heures entre trois rôles distincts : (1) saisie des données, (2) observation visuelle et (3) soutien logistique et repos.

Au total, ce sont 324 jours en mer qui ont été dédiés à la surveillance des cétacés dans toutes les Petites Antilles depuis 2021, couvrant une distance de 28 885 km (Fig 4A.). Parmi ces jours, on dénombre 672 observations de cétacés, et 529 d'entre elles ont abouti à une identification certaine de l'espèce détectée, confirmant ainsi la présence de 22 espèces différentes dans la région.

#### Saisie des données

Pendant toute la durée de l'effort, le logiciel ObsEnMer (développé par Altitude Création, version 3.08), en mode expert sur un iPad 8<sup>e</sup> génération, a été utilisé pour enregistrer en temps réel la position du bateau et localiser chaque point de données dans l'espace et le temps (observation et suivi des cétacés, conditions environnementales, intensité du trafic maritime et autres données pertinentes).

### Observation visuelle

L'équipe en charge du rôle d'observation était placée à l'avant du bateau, pour couvrir un angle de 0 à 90° de part et d'autre du mât, dans le sens de la navigation (Fig 2.). Un secteur de 180° sous l'horizon était donc balayé visuellement depuis la proue, à la recherche d'indices de présence directe ou indirecte de cétacés (nageoire dorsale ou caudale, souffle, saut, éclaboussures ou groupe d'oiseaux).

A chaque rencontre avec un ou plusieurs cétacés, l'identification de la ou des espèces, les coordonnées GPS, la distance initiale par rapport au bateau, l'estimation de la taille du groupe et la présence de juvéniles étaient enregistrées. Au cours d'une observation, les autres membres de l'équipage sont en charge de la prise de photos de la partie ventrale des nageoires caudales pour les cachalots et baleines à bosse, et de la nageoire dorsale pour les autres cétacés. Ces données serviront ensuite à la photo-identification des individus. Dans le cadre de cette étude, seules les informations concernant les Kogiidés ont été prises en compte.

### Photo-identification

Le potentiel de la photo-identification comme technique non invasive de suivi à long terme des populations de cétacés a prouvé son efficacité, notamment pour l'étude des mouvements à longue distance (O'Brien *et al.*, 2009). Les images collectées pour chaque individu photographié, préalablement reliées aux coordonnées GPS de l'observation associée, sont analysées *via* la plateforme en ligne Flukebook (Levenson *et al.*, 2015). Cette dernière utilise l'algorithme MiewID v3, un modèle basé sur l'extraction et la comparaison de vecteurs d'images, pour assigner à chaque individu une « carte d'identité » basée sur des caractéristiques distinctives, comme la forme, les entailles et/ou la présence d'éventuelles cicatrices visibles sur l'aileron dorsal ou la nageoire caudale. Dans notre cas, la photo-identification des Kogiidés repose uniquement sur l'analyse des photos de l'aileron dorsal. Le logiciel utilise ensuite un algorithme qui compare ces traits distinctifs à une base de données d'individus déjà recensés, et propose enfin une liste de correspondances possibles, appelées « rematches » ou recaptures. Ce processus facilite ici le suivi de leurs mouvements le long de l'arc Antillais. Il convient tout de même de noter que Flukebook fonctionne encore en version bêta, en cours d'amélioration. Il fournit des suggestions d'identification, mais la validation finale reste à la charge de l'utilisateur, garantissant ainsi une vérification humaine, particulièrement dans le cas d'espèces peu connues. Le logiciel contribue

également à la création de catalogues individuels des cétacés observés.

### Surveillance acoustique

Pour pallier les éventuels biais liés à l'observation visuelle, au cours de chaque expédition et lorsque les conditions le permettaient, un réseau d'hydrophones tractés était déployé 100 mètres à l'arrière du bateau, à une profondeur de  $5 \pm 2$  m (Fig 2.). Cette installation permet, depuis 2021, d'enregistrer en continu le paysage sonore marin, à tout moment de la journée, lors de l'effort, comprenant des sons biotiques et abiotiques.

Le réseau d'hydrophones utilisé comptait quatre hydrophones, dont deux détectant les basses fréquences et deux autres pour les plus hautes fréquences, permettant le balayage d'une large gamme de fréquences, allant jusqu'à 500 kHz. Ici, seuls les hydrophones haute fréquence étaient utilisés, puis numérisés à une fréquence d'échantillonnage égale, à 500 kHz. Les hydrophones sont reliés à un ordinateur équipé du logiciel PAMguard, conçu pour la surveillance acoustique passive des environnements marins, en particulier pour l'analyse de données bioacoustiques.

## 3. MÉTHODES

### Analyse acoustique

En tant que plongeurs profonds, les Kogiidés sont plus efficacement détectables par les méthodes de détection bioacoustique plutôt que par l'observation visuelle directe (Hodge *et al.*, 2018 ; Hildebrand *et al.*, 2019). PAMguard 2.01.05 Beta a été configuré pour reconnaître les signatures sonores propres à *Kogia spp.*, mais ne permet pas une identification spécifique au sein du genre, comme aucune distinction n'est encore établie à l'heure actuelle entre les deux espèces (Merkens *et al.*, 2018). Ce logiciel utilise des algorithmes programmés pour identifier et extraire les clics de *Kogia* identifiés dans les enregistrements. Les données sont post-traitées avec un préfiltre Butterworth bande passante de sixième ordre, avec des fréquences de 100 à 140 kHz et un seuil de déclenchement fixé à 10 dB entre 100 et 140 kHz, pour ne filtrer que les fréquences d'intérêt et éviter le bruit généré par les autres fréquences environnantes (Dupin 2024).

L'analyse semi-automatisée des clics a ensuite été réalisée sur le mode « viewer » de PAMguard, où des classificateurs de clics (décrits par Keating et Barlow, 2013), définis en fonction des pics de fréquence, ont permis au logiciel d'exécuter tous les fichiers sonores. Ensuite, les plages et les pics de fréquences d'intérêt,

respectivement comprises entre 110 et 130 kHz, et entre 115 et 125 kHz, ainsi que les pics « non classés », dont les plages de fréquence débordent sur celles prédéfinies, ont été détectés. Grâce à cette série de filtres paramétriques, l'ensemble des bandes sonores indésirables provenant de la vocalisation d'autres espèces, telles que des sifflements de delphinidés, des clics de cachalots ou de baleines à bec, devrait être écarté.

A la suite de cette phase de détection, lorsqu'un train de clics était détecté (Fig 8A.), il était enregistré, classé, puis analysé sous R grâce au package PAMPal pour en extraire les principales propriétés acoustiques, à savoir la durée du clic (en  $\mu$ s), la durée de l'intervalle inter-clic (en ms) et la fréquence du pic d'amplitude (en kHz). Enfin, pour confirmer avec certitude l'appartenance de chaque clic analysé à celui d'un *Kogia*, la forme de l'onde, son spectre et son allure sur le diagramme de Wigner devaient correspondre aux descriptions publiées dans la littérature (Merkens *et al.*, 2018 ; Malinka *et al.*, 2021 ; Madsen *et al.*, 2005).

Dans cette étude, les clics uniques mais représentatifs du genre ont été retenus lorsqu'ils étaient associés simultanément à une observation visuelle. En revanche, les clics uniques, isolés et non associés à une observation visuelle, ou n'ayant simplement pas les caractéristiques conformes à celles publiées et mentionnées précédemment, n'ont pas été pris en compte.

### Modèles GAM

Compte tenu des courtes durées d'apparition en surface des cétacés plongeurs profonds, et donc du faible nombre de données d'observation associées à leur sujet, il est difficile de connaître leur répartition spatiale, à l'exception de celle du Grand Cachalot, qui est plus largement étudié. Or, les modèles GAM se sont avérés très efficaces pour prédire la distribution de ces grands apnéistes, incluant les familles des Ziphiidae, des Physeteriidae et des Kogiidae, même sur la base d'un échantillon de taille réduite (Virgili *et al.* 2018). Dans notre cas, les modèles GAM présentent l'avantage de modéliser des relations non linéaires entre une sélection de plusieurs variables explicatives (environnementales) et une variable réponse (nombre de groupes de *Kogia*), notamment en utilisant la polyvalence de la famille de distribution de Tweedie, adaptée aux données comportant un mélange de zéros et de valeurs positives, comme celles issues de comptages.

### Données environnementales

Un large éventail de variables environnementales a été préalablement et judicieusement sélectionné en tant que prédicteurs des préférences d'habitat des Kogiidés, en vue de modéliser leur distribution. On distingue deux grands types : les variables physiographiques dites *statiques*, dont la valeur reste constante dans le temps, et les variables océanographiques dites *dynamiques*, dont la valeur évolue au fil du temps.

Habituellement, en milieu marin, la prédiction de la distribution d'un prédateur de haut niveau trophique repose sur celle de ses proies. Autrement dit, les paramètres influençant la distribution des proies sont couramment utilisés comme proxies pour prédire celle de leurs consommateurs. Ces interactions trophiques mobiles impliquent cependant un possible décalage spatial entre les différents niveaux de ce réseau. La concentration en chlorophylle-a (CHL) a été retenue dans cette analyse comme indicateur de la disponibilité des proies. De la même manière, certains paramètres océanographiques et topographiques, tels que les fronts thermiques et les reliefs sous-marins sont également susceptibles de jouer un rôle dans la structuration de leur habitat. Des variables comme la température de surface de la mer (SST), la profondeur de la couche de mélange (MLD), ainsi que la direction et la vitesse des courants océaniques pourraient, en interagissant, moduler la productivité primaire, notamment par leur influence sur le développement du phytoplancton (Virgili *et al.*, 2018). De plus, l'énergie cinétique associée au développement de tourbillons et à la remise en suspension des sédiments (EKE : *Eddy Kinetic Energy*), peut, elle aussi, induire une agrégation des proies.

Des paramètres topographiques, plutôt liés à la distribution verticale des Kogiidés comme la distance aux isobathes des 500 et 1000 mètres, au plateau continental, ou plus largement leur affinité à la bathymétrie et à la pente du relief sous-marin, ont également été pris en compte dans cette analyse, puisqu'ils corroborent les caractéristiques écologiques déjà connues de cette famille (McAlpine, 2009 ; Kiszka *et al.*, 2024). L'ensemble des variables environnementales décrites figure dans le tableau ci-dessous (Tab 1.).

**Tab 1.** Liste et caractéristiques des variables environnementales extraites

Variables océanographiques dynamiques				
variables	produit Copernicus	résolution spatiale / temporelle	dataset	profondeur (m)
Température de surface - SST (°C)	Global Ocean OSTIA Sea Surface Temperature and Sea Ice Analysis	0.05° x 0.05° / quotidien	METOFFICE-GLO-SST-L4-NRT-OBS-SST-V2	-
Concentration en chlorophylle-a - CHL (mg.m <sup>-3</sup> )	Global Ocean Biogeochemistry Analysis and Forecast	0.25° x 0.25° / quotidien	cmems_mod_glo_bgc-bio_anfc_0.25deg_PID-m	0.49
Composante Est de la vitesse - Eo (m.s <sup>-1</sup> )	Global Ocean Physics Analysis and Forecast	0.83° x 0.83° / quotidien	cmems_mod_glo_phy-cur_anfc_0.083deg_PID-m	0.49
Composante Nord de la vitesse - No (m.s <sup>-1</sup> )	Global Ocean Physics Analysis and Forecast	0.83° x 0.83° / quotidien	cmems_mod_glo_phy-cur_anfc_0.083deg_PID-m	0.49
Profondeur de la couche de mélange - MLD (m)	Global Ocean Physics Analysis and Forecast	0.083° x 0.083° / quotidien	cmems_mod_glo_phy_anf c_0.083deg_PID-m	-
Energie cinétique des tourbillons - EKE (m <sup>2</sup> .s <sup>-2</sup> )	Dérivé de « Uo » et « Vo »	0.083° x 0.083° / quotidien	$(Uo^2 + Vo^2)/2$	0.49
Vitesse du courant - CV (m.s <sup>-1</sup> )	Dérivé de « Uo » et « Vo »	0.083° x 0.083° / quotidien	$\sqrt{(Uo^2 + Vo^2)}$	0.49

Variables physiographiques statiques		
variables	source	résolution spatiale
Profondeur (m)	GEBCO	15-arc-seconde
Pente (°)	Dérivé de « profondeur »	15-arc-seconde
Distance aux isobathes 500 et 1000 (m)	Dérivé de « profondeur »	15-arc-seconde
Distance au plateau (m)	Dérivé de « profondeur »	15-arc-seconde

Toutes les variables océanographiques dynamiques ont été extraites depuis le catalogue de données marines du site de Copernicus sur l'emprise de la zone des Petites Antilles, et moyennées sur la période de temps de cette étude (2021-2024).

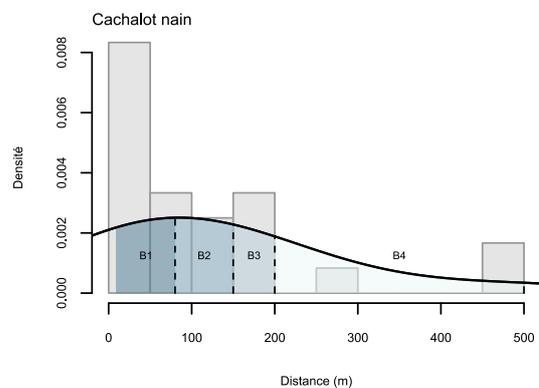
Seuls les écarts types de la MLD et de la SST ont été intégrés dans le modèle comme prédicteurs additionnels, car ils apportaient des informations complémentaires pertinentes par rapport à la moyenne.

### Effort d'échantillonnage

Pour implémenter le modèle GAM, une grille hexagonale dont la maille mesure 1,76 km de côté, et couvre une superficie de 7,8 km<sup>2</sup> par hexagone, a été établie sur la zone d'étude. La forme hexagonale de chacune des cellules de la grille permet de limiter les effets de bord. En effet, chaque cellule a toujours six cellules voisines équidistantes, contre quatre avec un maillage carré.

Afin de mesurer les portions actives d'effort dédiées aux observations de Kogiidés, il a été nécessaire de prendre en compte les différents niveaux de distance de détectabilité propres au genre. A partir des 32 observations de Kogiidés obtenues entre 2021 et 2024,

seules 25 d'entre elles ont permis de faire le lien entre la distance à laquelle chaque groupe a été détecté et la densité des observations. Il ne s'agissait que d'identifications certaines de cachalots nains. Ainsi, une courbe de densité a été définie avec quatre buffers de détectabilité : B1, B2, B3 et B4, de manière à considérer les probabilités de détection de 1, 0.75, 0.5 et 0.25 (Fig 3.). Les distances de détectabilité associées à ces probabilités de détection sont respectivement de 80, 150, 200 et 500 m.

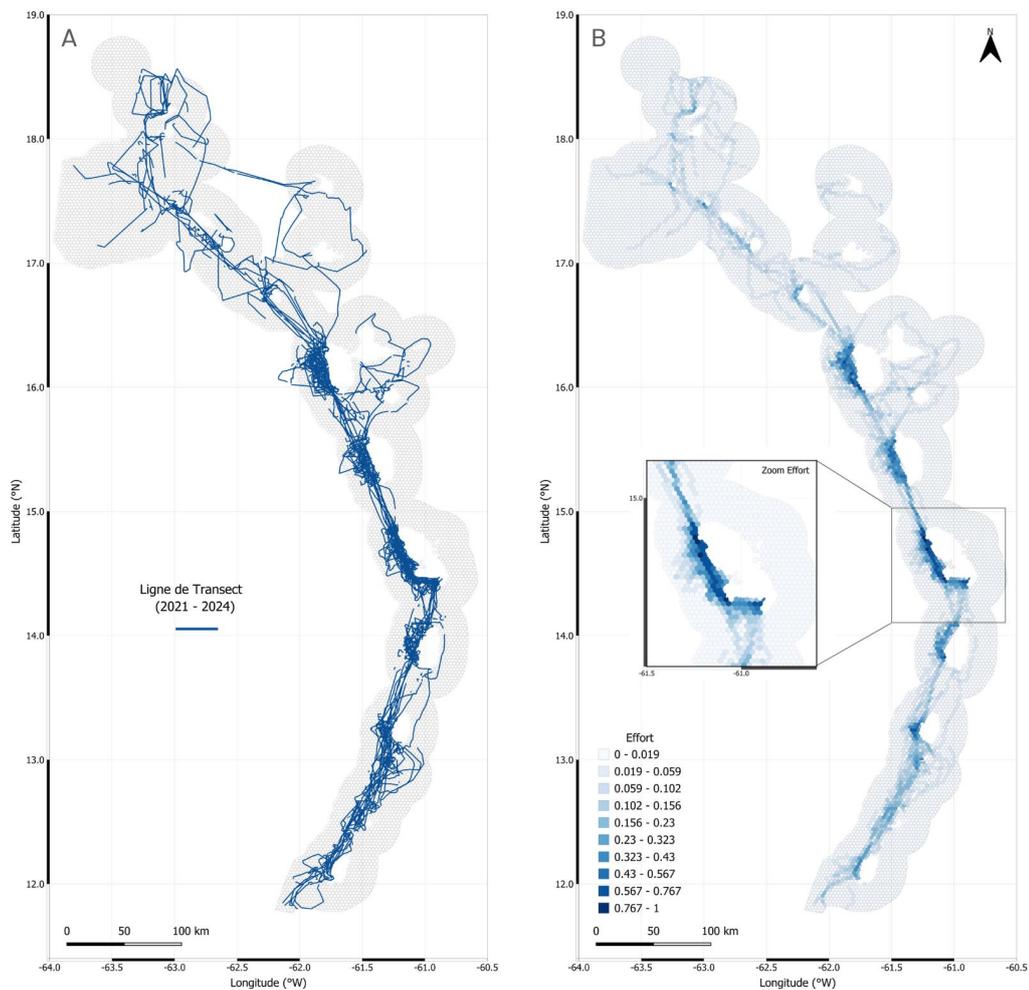


**Fig 3.** Courbe de densité, en fonction de la distance de détectabilité du cachalot nain (données 2021-2024).

Dans cette figure, on considère alors qu'entre 0 et 80 m, 100% des individus présents sont détectés, et qu'au-delà de 500 m, ils ne sont plus détectés. La prise en compte de ces distances est essentielle pour pondérer l'effort d'observation dans le modèle en tant que terme d'ajustement (en offset du modèle choisi). Ce terme permet de tenir compte du fait que certaines zones ont été davantage échantillonnées que d'autres, afin de ne pas confondre une probabilité plus élevée de détection avec une réelle préférence d'habitat. Ainsi, une zone fortement échantillonnée contribuera davantage à l'apprentissage, mais le modèle corrigera son

influence dans la prédiction finale pour éviter de surestimer son importance écologique (Fig 4B).

Au sein de chaque cellule, les observations de groupes de *Kogia*, l'effort d'échantillonnage, ainsi que les paramètres environnementaux ont été enregistrés. Lors de l'union de chaque prédicteur à la grille hexagonale, la valeur moyenne à l'intérieur de l'hexagone a été calculée grâce au logiciel QGIS 3.30.1 (QGIS Development Team, 2023), de sorte à n'avoir qu'une valeur moyenne unique de chacune des variables par cellule hexagonale.



**Fig 4.** Évaluation de l'effort d'échantillonnage du cachalot nain en fonction de sa distance de détectabilité : (A) transect 2021 – 2024 ; (B) effort d'observation associé pour *K. sima*.

#### Calibration du modèle GAM

Le modèle a été ajusté exclusivement sur les cellules de la grille présentant un effort d'observation positif, en le restreignant à des combinaisons d'au maximum quatre variables environnementales. Ces variables ont été testées deux à deux grâce au test de corrélation de Pearson. Lorsqu'une forte corrélation ( $|r| > 0,7$ ) était détectée entre deux variables, celles-ci n'étaient pas retenues simultanément dans un même modèle, afin

de prévenir les effets de redondance et de ne conserver que les variables les plus significatives (Fig 10.). Les ajustements du modèle pour relier la variable réponse aux prédicteurs ont été réalisés par l'approche de vraisemblance restreinte (REML: Restricted Maximum Likelihood). Elle permet d'estimer précisément le degré optimal de lissage des fonctions, évitant ainsi le surajustement de la courbe de régression à nos données.

La sélection finale des modèles s'est appuyée sur le Critère d'Information d'Akaike (AIC), et l'évaluation de l'importance relative des variables s'est faite à l'aide des poids d'Akaike et du nombre d'occurrences où elles apparaissaient dans les différentes combinaisons de modèles. Seuls ont été considérés comme meilleurs modèles ceux dont la déviance expliquée était la plus forte, et dont l'écart avec l'AIC le plus faible était inférieur à 2. Ainsi, le modèle considéré comme décrivant le mieux nos données a été retenu pour générer une carte prédictive de l'habitat, reflétant la distribution potentielle des Kogiidés dans la région. La variabilité des prédictions a été mesurée à l'aide du coefficient de variation, permettant d'estimer la fiabilité des résultats produits. En complément, le pourcentage de déviance expliquée reflète la capacité du modèle à reproduire la structure des données.

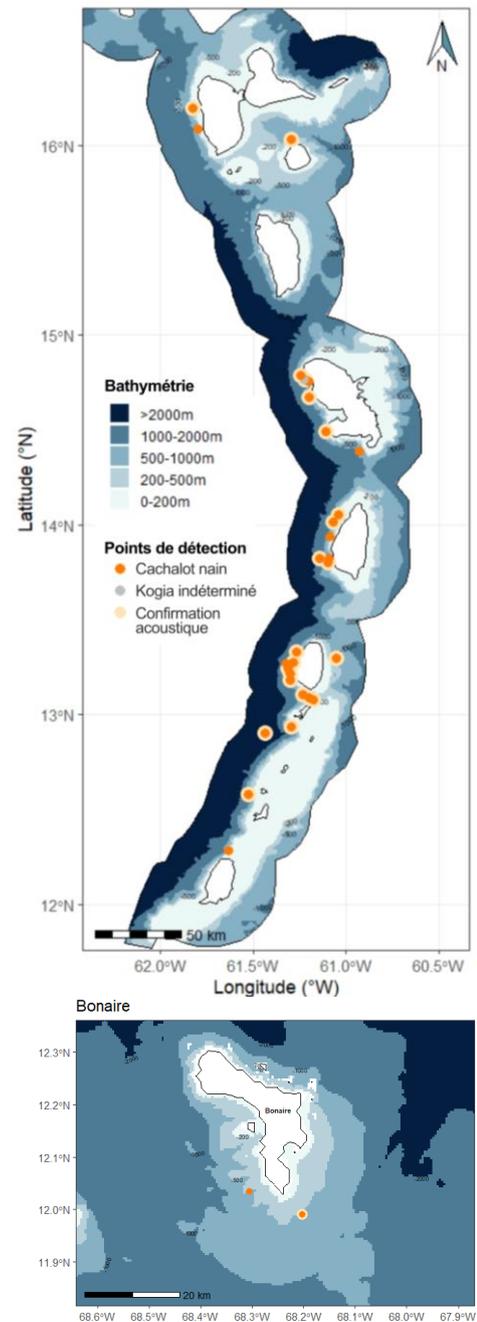
### Validation du modèle

La performance du modèle a été évaluée au moyen d'une matrice de confusion. Celle-ci confronte les prédictions du modèle, exprimées en nombre moyen de groupes, puis converties en probabilités de présence, aux observations empiriques de présence et d'absence. Dès lors, il a été nécessaire de déterminer un seuil optimal de classification afin de distinguer les occurrences de présence de celles d'absence. Ce seuil a été calculé à l'aide du package pROC sous R. Il permet d'identifier la probabilité à partir de laquelle la discrimination entre présence et absence est la plus efficace.

Sur la base de cette classification, deux indicateurs complémentaires ont été calculés à partir de la matrice de confusion : la sensibilité (taux de vrais positifs), qui mesure la proportion de présences correctement prédites, et la spécificité (taux de vrais négatifs), qui reflète la proportion d'absences correctement prédites. Ensemble, ces métriques permettent d'apprécier la capacité du modèle à prédire de manière fiable les zones favorables et défavorables à l'espèce ciblée. Un niveau élevé de ces deux paramètres indique une performance robuste du modèle prédictif. Ainsi, un niveau de discrimination proche de 1, mesuré grâce à la valeur de l'aire sous la courbe ROC (AUC), indique une excellente discrimination du modèle et donc un bon niveau de prédiction, tandis qu'un AUC de 0.5 indique une prédiction aléatoire du modèle.

## RESULTATS

Un total de 32 points d'observation de groupes de *Kogia* a été enregistré dans la base de données de la CCS (cf. - ANNEXE II -) grâce aux campagnes du programme « Ti Whale An Nou » menées entre 2021 et 2024. Leur position dans les Petites Antilles est projetée sur la carte ci-dessous (Fig 5.). Les points de détections acoustiques associés ont été ajoutés quand des signaux spécifiques de *Kogia* étaient détectés, mais seront détaillés dans la section 3.



**Fig 5.** Cartes des points d'observations visuelles (2021 – 2024) et de détections acoustiques (2022 – 2024) dans l'arc des Petites Antilles (en haut) et autour de Bonaire (en bas).

Sur ces cartes, qui couvrent une partie de la zone d'étude de la CCS, 29 points d'observation correspondent à des identifications certaines de cachalots nains. Une seule observation est classée comme incertaine, en raison de l'absence de photographie exploitable et de signal acoustique. Deux observations ont été rapportées au sud de l'île de Bonaire, dont une accompagnée d'un signal acoustique caractéristique du genre. La contribution de chaque île au nombre total de groupes d'individus observés est présentée dans la table suivante (Tab 2.).

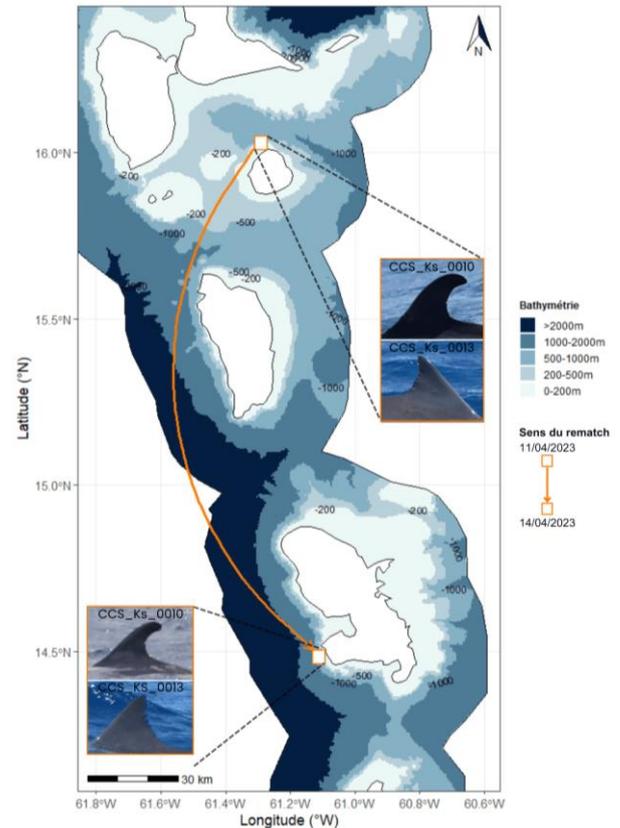
**Tab 2.** Proportion du nombre de groupes de *Kogia* observés par île.

îles	nombre de groupe	Proportion
Grenade	1	3 %
Bonaire	2	6 %
Guadeloupe	3	9 %
Sainte-Lucie	6	19 %
Martinique	7	22 %
SVG	13	41 %
TOTAL	32	100 %

D'après ces données, la majorité des observations a été réalisée autour des îles du secteur sud de la zone d'étude (60%). Saint-Vincent-et-les-Grenadines est le secteur dominant qui réunit 41% des observations du genre, près de deux fois plus qu'en Martinique.

### 1. Photo-identification (CMR) et mouvements

Sur un total de 2 024 photographies de *Kogia* capturées entre 2021 et 2024 (incluant des photos en rafale), l'utilisation de la technique de capture-marquage-recapture par photo-identification a permis d'identifier 27 individus distincts de cachalots nain, reconnaissables à leurs marques uniques sur la nageoire dorsale ou la forme particulière de celle-ci (cf. - ANNEXE I -). Parmi eux, deux individus d'un même groupe, nommés CCS\_Ks\_0010 et CCS\_Ks\_0013, ont été photo-capturés pour la première fois au nord de l'île de Marie-Galante en Guadeloupe, en avril 2023, puis réobservés trois jours plus tard au sud-ouest de la Martinique (Fig 6.). Si le groupe a emprunté le chemin le plus court, la distance minimale parcourue entre ces deux points d'observation, estimée à 190 km, suggère une vitesse moyenne de nage à un peu plus de 2.6 km.h<sup>-1</sup>.



**Fig 6.** Carte de mouvements des individus CCS\_Ks\_0010 et CCS\_Ks\_0013 recapturés par photo-identification entre le Nord de Marie-Galante et le Sud-Ouest de la Martinique (données 2021-2024). La flèche orange indique uniquement le sens de la recapture. Le trajet exact entre les deux points d'observation n'a pas pu être déterminé.

La première observation de ces deux spécimens s'est déroulée en association avec au moins trois autres individus photographiés, dont un marqué (CCS\_Ks\_0011), et cinq autres à l'occasion de leur réobservation le 14-04-2023, dont 3 marqués (CCS\_Ks\_0012, CCS\_Ks\_0021 et CCS\_Ks\_0022).

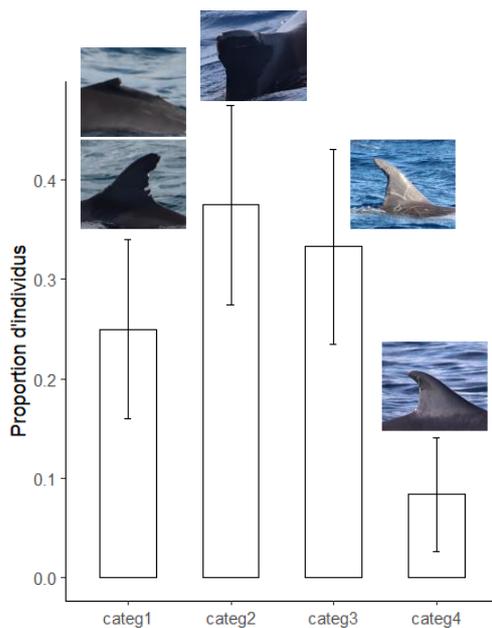
Concernant le reste des observations, plusieurs événements de recaptures probables n'ont pas abouti en raison du faible nombre de photos disponibles pour chaque individu et de leur qualité souvent médiocre.

### 2. Menaces

Sur la base d'estimations minimales, moyennes et maximales de taille de groupe, et uniquement sur les observations appuyées de captures photos (n=21 groupes photographiés), un total de 80 ± 19 individus distincts ont été dénombrés depuis 2021. Les images associées à ces observations ont permis d'identifier 24 individus qui présentaient des marques physiques visibles sur l'épiderme des cachalots nains, soit environ 30% des individus photographiés. Ces marques, principalement localisées au niveau de leur nageoire

dorsale, sont les vestiges d'interactions naturelles ou anthropiques passées.

Selon Gauducheau (2023), les Kogiidés sont, en proportion d'observation, des cétacés particulièrement plus marqués que d'autres par des blessures d'origine anthropiques. Quatre grandes catégories de menaces physiques externes sont couramment rapportées, à savoir les collisions avec des engins nautiques (coques ou hélices)[*categ1*], les interactions avec des engins de pêche (filets, lignes...)[*categ2*], les interactions inter (prédation) ou intraspécifiques (compétition, frottement)[*categ3*], et les maladies infectieuses ou virales (Herr *et al.*, 2020 ; Luksenburg, 2014 ; Gauducheau, 2023)[*categ4*]. Ainsi, en s'inspirant des critères d'identification des différents types de blessures proposés dans les travaux de Luksenburg (2014), 25 blessures corporelles ont été identifiées dans cette étude, puis ces blessures ont été individuellement rattachées à l'une des quatre catégories définies précédemment (« *categ1* », « *categ2* », « *categ3* » et/ou « *categ4* » ; Fig 7.).



**Fig 7.** Proportion d'individus blessés ( $n=24$ ) par catégorie de blessure : blessures d'origine anthropique (*categ1*, *categ2*) et blessures d'origine naturelle (*categ3*, *categ4*).

D'après ces résultats, 60% des menaces identifiées ont été affiliées à des interactions d'origine anthropique

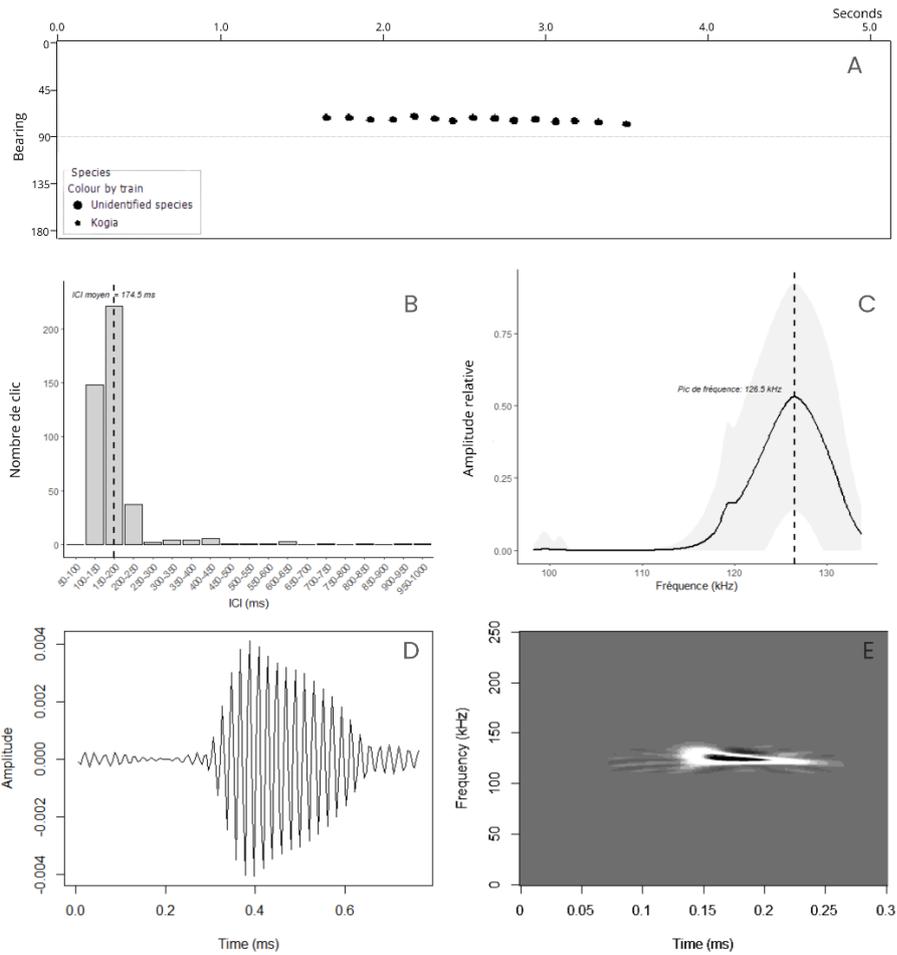
( $n=15$ ), avec une majorité de cas liés à de la pression de pêche directe ou indirecte ( $n=9$ ). Seulement deux images mettent en avant des maladies de peau, des malformations ou des infections probables, tandis que huit autres individus témoignent d'interactions naturelles avec d'autres animaux, qui se manifestent principalement par des échancrures légères, des marques de râteau dentaire ou des morsures profondes.

### 3. Acoustique

Depuis mai 2021, la CCS récolte des données d'enregistrement acoustique pour mettre en lumière la diversité du paysage sonore marin de la zone d'étude des Petites Antilles. Or, pour des raisons liées au modèle de train d'hydrophones déployé entre juillet et octobre 2021, qui ne comptait que deux hydrophones moyenne fréquences et un hydrophone basse fréquence, l'analyse des quatre observations de *Kogia* réalisées durant cette période n'a pu être réalisée, puisque le taux d'échantillonnage de 192 000 Hz a limité la capture des sons émis au-delà de 96 000 Hz. Cette analyse acoustique ne s'est alors focalisée que sur les enregistrements réalisés entre 2022 et 2024.

L'effort de détection a été concentré sur des jours où les observations visuelles de Kogiidés ont été relevées. Ainsi, lorsque des identifications de *Kogia* étaient qualifiées comme « incertaines », le diagnostic acoustique permettait de confirmer s'il s'agissait réellement du genre, lorsque celui-ci était vocalement actif. 28 observations visuelles de groupes de Kogiidés ont été recensées. Parmi celles-ci, 22 (près de 80 %) ont été appuyées par la détection de trains de clics caractéristiques du genre, permettant de corroborer les observations, notamment lorsqu'elles étaient incertaines, ce qui est arrivé pour l'observation du 29-03-2022, près de l'île Clifton dans les Grenadines. A deux reprises, aucun enregistrement n'a pu être réalisé car l'hydrophone n'était pas encore déployé. Dans trois autres situations, aucun signal acoustique n'a été perçu malgré la présence visuelle d'individus. Enfin, une détection tardive de signaux de *Kogia* a été enregistrée bien après une observation, sans qu'il soit possible de l'associer à celle-ci avec certitude.

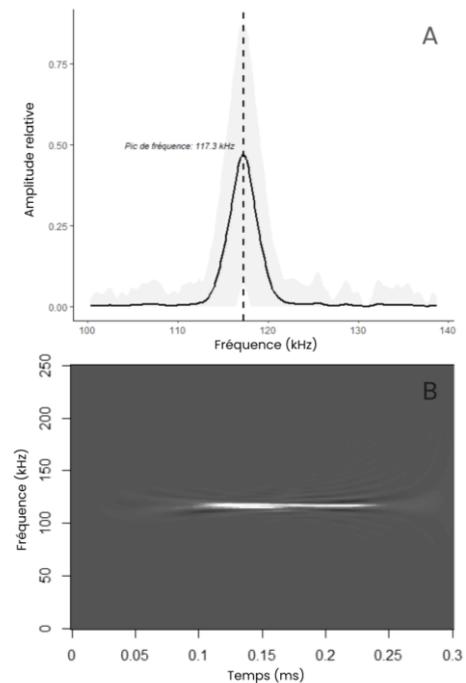
Au total, 23 308 clics de *Kogia* ont servi de base à leur description dans les Petites Antilles (Fig 8.).



**Fig 8.** Caractéristiques acoustiques des clics de *Kogia* : (A) Train de 15 clics de *Kogia* détectés sur PAMGuard ; (B) Intervalle Inter-clic ; (C) Spectre de fréquence ; (D) Forme d'onde d'un clic ; (E) Diagramme de Wigner.

Les Fig 8B et C mettent en avant les valeurs d'intervalle inter-clic (ICI) et de fréquence, respectivement, sur la base d'une séquence de clics typiques enregistrée le 24-02-2024 ( $n=468$  clics). La forme de l'onde d'un clic isolé, définie par la variation de son amplitude au cours du temps, est présentée en Fig 8D. L'ICI moyen de  $174.5 \pm 9.3$  ms (Fig 8B), relativement long, et la durée moyenne des clics calculée à partir du nombre total de clics :  $t = 165 \pm 10 \mu s$  ( $n = 23\,308$ ), s'alignent avec les résultats déjà connus de la littérature (Malinka *et al.*, 2021 ; Merkens *et al.*, 2018).

Par ailleurs, dans l'état actuel des connaissances, les clics de *Kogia* ont été décrits comme atteignant un pic de fréquence entre 123 et 130 kHz (Merkens *et al.*, 2018 ; Malinka *et al.*, 2021 ; Madsen *et al.*, 2005), ce que confirme une partie de nos résultats (Fig 8C.) avec un pic moyen obtenu à  $126.5 \pm 0.9$  kHz. Cependant, cette étude a également mis en évidence la présence de clics émis autour de 117 kHz en fréquence de pointe. La Fig 9A en illustre une séquence ( $n=298$ ) avec un pic moyen à 117.3 kHz.



**Fig 9.** Particularités des clics de *Kogia* à 117kHz : (A) Spectre de fréquence ; (B) Diagramme de Wigner.

Les diagrammes de Wigner (Fig 8E ; Fig 9B.) permettent de visualiser le spectre de fréquence d'un clic pendant toute sa durée d'émission. L'allure linéaire et horizontale dessinée dans ces types de graphiques est caractéristique des clics de *Kogia*, se traduisant par la production d'un son presque monofréquence au cours de sa durée d'émission.

#### 4. Modélisation de la distribution

29 groupes de *Kogia* ont été relevés dans la base de données entre 2021 et 2024 dans la zone d'étude des Petites Antilles. Les deux observations identifiées à Bonaire n'ont pas été incluses dans le modèle. Une fonction aléatoire a permis de diviser ce jeu de données initial en deux, de telle manière à garder d'un

côté, un jeu de calibration, représentant 80% du jeu de données initial (soit 23 observations), et de l'autre, un jeu de données de validation, représentant les 20% de données restantes (soit 6 observations). C'est sur la base du jeu de calibration que la modélisation a été effectuée, indépendamment de celui de validation qui a permis de tester la robustesse des prédictions, une fois le modèle choisi.

#### 4.1. Prédiction

Sur la base des 14 variables environnementales choisies pour entraîner le modèle, 1033 combinaisons de prédictions de 1 à 4 variables explicatives ont été testées puis classées par ordre de poids d'Akaike décroissant. Ainsi, les huit premiers modèles comptent parmi ceux dont le  $\Delta AIC < 2$  (Tab 3.).

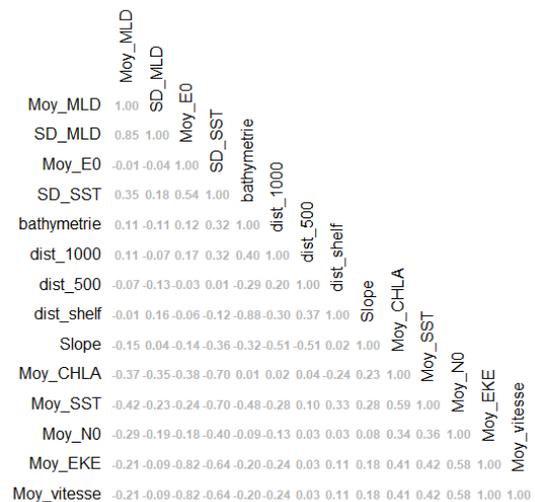
**Tab 3.** Résumé des huit premiers modèles expliquant le mieux la distribution des Kogiidés. La comparaison des modèles est guidée par l'interprétation des valeurs du critère d'Akaike (AIC), de l'écart avec l'AIC le plus faible ( $\Delta AIC$ ), et de la déviance expliquée.

Modèle	Variables explicatives	AIC	$\Delta AIC$	Déviance expliquée (%)
1	Bathymetrie + dist_1000 + Moy_CHLA + Moy_NO	120.86	0	35
2	Bathymetrie + dist_1000 + Moy_CHLA + Moy_Vitesse	121.00	0.14	34.9
3	Bathymetrie + dist_500 + Moy_CHLA + Moy_NO	121.08	0.21	33.8
4	Bathymetrie + Moy_NO + Moy_CHLA + Moy_Vitesse	121.12	0.26	34.1
5	Bathymetrie + dist_500 + Moy_CHLA + Moy_Vitesse	121.28	0.41	33.8
<b>6</b>	<b>Bathymetrie + Moy_Vitesse + Moy_CHLA</b>	<b>122.20</b>	<b>1.33</b>	<b>32.3</b>
7	Bathymetrie + dist_500 + Moy_CHLA + Moy_EKE	122.66	1.80	32.2
8	Bathymetrie + Moy_NO + Moy_CHLA	122.80	1.93	31.8

Ces huit premiers modèles mettent en lumière des combinaisons de trois à quatre prédicteurs. Parmi elles, la bathymétrie et la concentration moyenne en chlorophylle-a sont systématiquement ressorties comme prédicteurs probables, ce qui leur donne une grande importance pour prédire la distribution des Kogiidés. En effet, appuyée sur l'importance de la totalité des variables, la bathymétrie ressort dans 99.9% de tous les modèles, la concentration moyenne en chlorophylle-a à 80.2%, la vitesse moyenne des courants à 41.2%, et la vitesse de la composante Nord des courants à 35.8%.

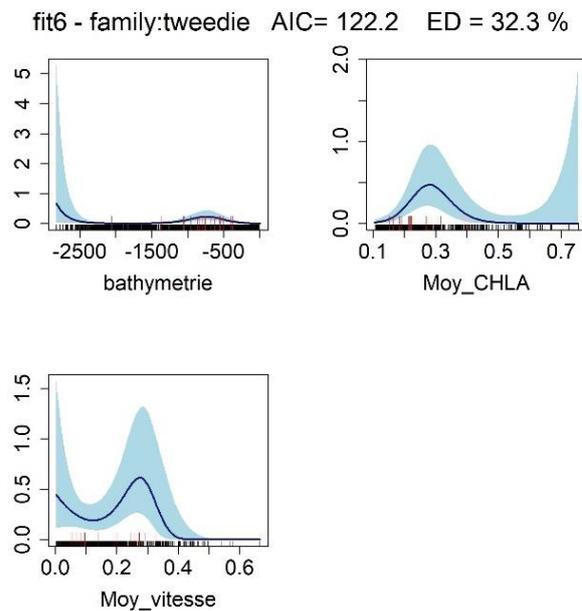
Après une analyse combinée des différents éléments pouvant influencer la sélection du meilleur modèle, c'est le modèle n°6 qui a semblé décrire au mieux les données et qui a été retenu pour la suite de cette analyse. La variable Moy\_Vitesse étant légèrement corrélée à Moy\_NO ( $R = 0.58$  ; Fig 10.), il a été décidé de ne pas les prendre en compte simultanément dans un même modèle, comme c'est le cas pour le n°4. Par ailleurs, la déviance expliquée satisfaisante du modèle

retenu (32.3% des données d'observation empirique), ajoutée aux faibles niveaux d'incertitudes dans l'ajustement des courbes de lissage pour chacun de ses prédicteurs (Fig 11.), sont autant de paramètres qui ont motivé le choix de ce sixième modèle, en comparaison aux sept autres traités.



**Fig 10.** Matrice des corrélations par paires de variables environnementales, calculée à partir des coefficients de corrélation de Pearson.

Pour visualiser la contribution de chacun des trois prédicteurs du modèle retenu, les courbes de lissage correspondantes sont présentées en Fig 11. Les courbes d'ajustement en bleu foncé visent à prédire la liaison qui existe entre la fréquence d'observation d'un groupe de *Kogia* et les valeurs que prennent les variables environnementales dans la zone de l'espace du prédicteur considéré. L'intervalle à 95% associé à cet ajustement apparaît en bleu clair autour de la courbe.



**Fig 11.** Prédiction de la relation estimée entre les différentes variables environnementales et la fréquence d'observation des *Kogia* selon un lissage non linéaire (Tweedie ;  $p = 1.01 \sim$  Poisson). Les marques noires sur l'axe des abscisses représentent la distribution de la variable environnementale sur l'ensemble de la zone d'étude, et les traits rouges représentent les valeurs de la variable environnementale de chaque observation d'un groupe de *Kogia*.

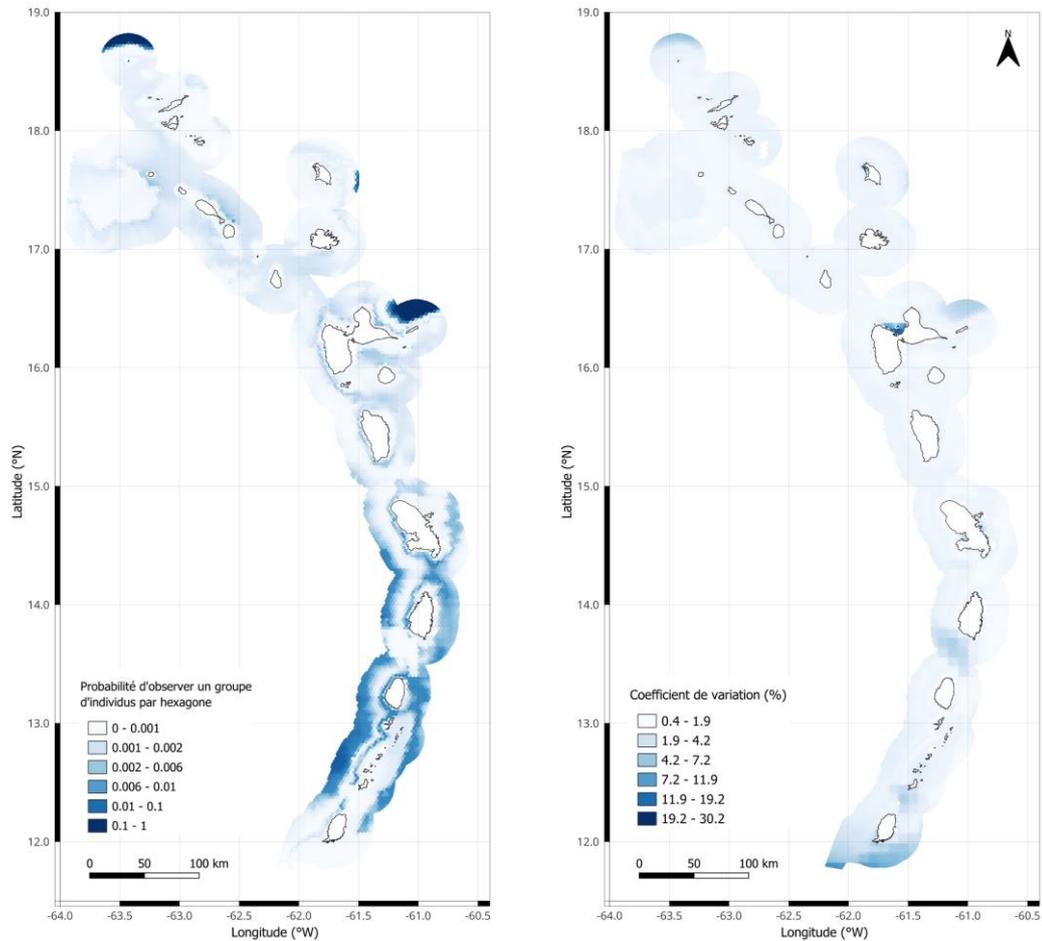
Ces résultats mettent en évidence une forme de regroupement de la fréquence d'observation des Kogiidés qui est plus importante principalement entre 500 et 1000 mètres de profondeur, associé à une faible incertitude. A partir de 2500 mètres, on observe de nouveau une hausse de cette fréquence au fur et à mesure que l'habitat est de plus en plus profond,

accompagné d'un accroissement de l'incertitude. En ce qui concerne la concentration moyenne en chlorophylle-a, un pic de densité d'observation est détecté autour de  $0.28 \text{ mg.m}^{-3}$ , avec une tendance croissante entre 0.1 et  $0.28 \text{ mg.m}^{-3}$ , puis s'inverse au-delà de ce pic, jusqu'à  $0.5 \text{ mg.m}^{-3}$ . Les prédictions faites au-delà de cette dernière valeur sont nulles, mais sont suivies d'une augmentation de l'intervalle de confiance à partir de  $0.56 \text{ mg.m}^{-3}$ . Enfin, les densités d'observations des Kogiidés semblent fluctuer avec la vitesse moyenne des courants, indiquant une tendance générale à la baisse lorsque le courant forcit, avec une densité prédite qui s'annule au-delà de  $0.4 \text{ m.s}^{-1}$  ( $\sim 0.78$  nœuds). Or, une hausse de la fréquence d'observation est constatée à partir  $0.13 \text{ m.s}^{-1}$ , jusqu'à un pic autour de  $0.27 \text{ m.s}^{-1}$ , soit presque 0.5 nœuds.

Les prédictions associées au meilleur modèle sont présentées dans la carte ci-dessous (Fig 12.) et les valeurs de prédictions à l'intérieur de chaque cellule hexagonale sont moyennées localement.

Cette figure évalue la probabilité d'observer un groupe de *Kogia* dans une cellule donnée. Cette probabilité est interprétée comme une estimation de la capacité du modèle à prédire correctement la présence ou l'absence de *Kogia*, en fonction de la projection des trois variables prédictives retenues. Toutefois, sur le terrain, cette probabilité reste affectée par les limites naturelles de détection visuelle *in situ*, intrinsèques au comportement de l'espèce, telles que décrites en introduction.

D'après les prédictions faites par le modèle, les probabilités d'observation de *Kogia* les plus fortes se concentrent majoritairement dans le sud des Petites Antilles, à partir de la Martinique, même si les probabilités estimées d'observer un groupe d'individus restent faibles (moyenne = 0.02 ; soit 1 groupe/7,8  $\text{km}^2$ ). Les prédictions les plus fortes dans ce secteur allant de 0.1 à 0.2, associées aux estimations respectives de 5 à 12 groupes par cellule hexagonale ( $7.8 \text{ km}^2$ ), se situent au large de la côte sous le vent, dans la zone de Saint-Vincent jusqu'au sud des Grenadines. D'importantes densités prédites sont également détectées côté Atlantique de ce même secteur. Le reste de prédictions établies dans la moitié nord de la zone d'étude se traduit par des probabilités très faibles d'observer un groupe (moyenne = 0.0018 ; soit moins de 0.01 groupe/7.8  $\text{km}^2$ ).



**Fig 12.** Cartes de prédiction de la distribution des Kogiidés dans la zone d'étude des Petites Antilles, basées sur la combinaison des trois prédicteurs choisis (à gauche) et des coefficients de variation associés (à droite).

Les deux zones aux probabilités les plus fortes (en bleu foncé) au nord de la zone d'étude et à l'est des côtes guadeloupéennes, sont associées à des valeurs élevées de coefficient de variation. De la même manière, la variance est plus importante (jusqu'à 19.2%) là où les prédictions sont très faibles (proches de 0) au sud de la zone d'étude.

#### 4.2. Validation

Afin de rendre compte de la fiabilité du modèle, le jeu de données de validation, représentant 20% des données d'observations initiales, a été utilisé. Le seuil optimal de classification a été estimé à 0.002, indiquant qu'une faible probabilité suffit pour prédire une présence. Ce choix reflète le déséquilibre des données (forte proportion d'absences) et la priorité donnée à la détection des zones potentiellement occupées. La matrice de confusion qui en découle (Tab 4.) met en avant les deux métriques liées à la performance du modèle, à savoir sa sensibilité et sa spécificité.

**Tab 4.** Matrice de confusion basée sur les données du jeu de validation

		Valeurs prédites	
		0	1
Valeurs réelles	0	<b>7829 (84%)</b>	1418 (16%)
	1	0 (0%)	<b>6 (100%)</b>

D'après les valeurs en gras ci-dessus (Tab 4.), la sensibilité du modèle est parfaite, puisque 100% des présences réelles ont été correctement prédites. La spécificité du modèle quant à elle, indique que sur les 9 247 négatifs prédits, 84% sont des vrais négatifs, tandis que seulement 16% des négatifs ont été prédits comme présence alors qu'il s'agissait d'absence. La statistique de compétence réelle associé (TSS = 0.85), qui tient compte à la fois de la sensibilité et de la spécificité du modèle, montre une très bonne capacité du modèle à discriminer les présences des absences, ce qui est particulièrement satisfaisant dans le contexte de détection d'espèces discrètes (Ruete *et al.*, 2015). Enfin, l'aire sous la courbe (AUC) de 0.92 vient confirmer le critère non aléatoire du modèle.

## DISCUSSION

Fondamentalement, cette étude s'intéressait à la diversité des Kogiidés dans les Petites Antilles. Basée sur l'analyse des photos récoltées après quatre années de recherche entre 2021 et 2024, ainsi que sur la certitude des identifications réalisées pendant les campagnes scientifiques de la Caribbean Cetacean Society (CCS), il n'y a à priori aucune preuve avérée relevant de la présence du cachalot pygmée (*Kogia breviceps*) dans la région. Par conséquent, sous l'appellation de « *Kogia* », les résultats de nos travaux ont finalement uniquement fait référence à l'analyse de la distribution, des menaces, des mouvements et de l'acoustique du cachalot nain (*Kogia sima*) dans l'archipel des Petites Antilles.

### 1. Mouvements

La description des mouvements chez les Kogiidés a peu été étudiée dans la littérature. Ainsi, avec les données récoltées grâce à la technique de Capture-Marquage-Recapture par photo-identification, cette analyse offre un premier aperçu de leurs déplacements dans les Petites Antilles.

Malgré le nombre limité de rencontres, deux individus très distinctifs ont été réobservés parmi les 25 autres recensés dans notre catalogue. Il s'agit ici du premier déplacement décrit dans la région, impliquant deux individus d'un même groupe, observés une première fois au nord de l'île guadeloupéenne de Marie-Galante, puis à nouveau trois jours plus tard, à l'ouest des côtes des Anses d'Arlet en Martinique (Fig 6.), à une vitesse moyenne de 2.6 km.h<sup>-1</sup>, supposant que le groupe ait emprunté le chemin le plus court. Cette allure ne semble pas aberrante au vu de la vitesse de croisière moyenne rapportée pour l'espèce, comprise entre 4.0 et 7.0 km.h<sup>-1</sup> (Sylvestre, 2014 ; Baird *et al.*, 2021).

Cette recapture apporte un éclairage utile sur l'interprétation des prédictions issues du modèle de distribution. En effet, quel que soit le chemin emprunté par CCS\_Ks\_0010 et CCS\_Ks\_0013, la traversée du canal entre la Dominique et la Martinique était inévitable, une zone pourtant identifiée comme peu favorable à la présence de Kogiidés (Fig 12). Ce résultat est cohérent, car ce type de modèle vise à prédire les zones propices à la détection ou à l'habitat régulier, et non nécessairement les corridors de transit. Cela souligne néanmoins l'importance de ne pas exclure a priori certaines zones simplement parce qu'elles sont prédites comme peu favorables : elles peuvent jouer un rôle fonctionnel dans les déplacements inter-îles, même si elles ne sont pas des habitats de résidence.

Les observations conjointes des deux individus adultes CCS\_Ks\_0010 et CCS\_Ks\_0013, intégrés systématiquement dans des groupes plus larges exempts de juvéniles (7 à 8 individus estimés), laissent entrevoir une forme de structure sociale chez les Kogiidés, comme l'avaient déjà documenté Baird *et al.* (2021). Cependant, l'ensemble des individus n'ayant pas pu être photographié pendant les deux occasions, il n'a pas été possible de déterminer s'il s'agissait de la même unité sociale dans les deux cas. Ces groupes représentaient par ailleurs les plus importants jamais rapportés par la CCS depuis 2021, confirmés acoustiquement par la présence d'au moins quatre individus vocalement actifs dans les deux situations. Bien que l'espèce soit généralement considérée comme solitaire, ces regroupements pourraient refléter une organisation sociale temporaire, voire l'existence de clans. À défaut de connaître le sexe des individus, il reste également plausible que ces rassemblements soient liés à des comportements reproducteurs, comme la recherche de partenaires. Afin d'approfondir la compréhension des structures sociales chez les Kogiidés, des analyses acoustiques plus poussées pourraient permettre de déterminer si les regroupements de plusieurs individus sont plus fréquents qu'estimé, et si une forme d'organisation sociale est effectivement présente.

Ce déplacement inter-île, bien que modéré, rejoint une nouvelle fois les observations de Baird *et al.* (2021) concernant l'aire de répartition restreinte des Cachalots nains aux Bahamas. Si cet unique cas de réobservation ne permet pas à lui seul de confirmer la fidélité à un site ou la résidentialité de l'espèce dans les Petites Antilles, il constitue néanmoins une première preuve de leur capacité de déplacement, même limitée, entre les îles de l'archipel. Cependant, les observations répétées au large des côtes de Saint-Pierre en Martinique, ou bien encore de l'ouest et du sud de Saint-Vincent (Tab 2.), pourraient indiquer l'existence de populations résidentes, d'autant que *K. sima* est l'espèce de cétacé la plus fréquemment observée à Saint-Vincent (Kiszka *et al.*, 2024). Un effort de photo-identification accru dans ces zones serait nécessaire pour explorer cette hypothèse. En effet, ce travail ne s'est focalisé que sur l'analyse des photos récoltées par la CCS entre 2021 et 2024. Or, pour l'année 2025, de nombreuses observations supplémentaires ainsi qu'un matériel photographique plus performant ont été mis à disposition, offrant des perspectives prometteuses pour approfondir la connaissance des mouvements des Kogiidés dans la région. De plus, une collaboration est déjà engagée avec des chercheurs et

acteurs de la conservation des cétacés dans les Petites Antilles, afin d'élargir les possibilités de recaptures grâce au partage de données photographiques.

## 2. Menaces

Les observations de Kogiidés sont peu fréquentes mais les données issues de cette étude révèlent une réalité préoccupante quant à leur vulnérabilité face aux activités humaines. En effet, près de 30 % des individus photographiés présentent des marques ou blessures corporelles, dont 60 % sont attribuables à des causes anthropiques. Parmi les cas documentés, six individus ont été identifiés comme survivants de collisions avec des navires. Même si les Kogiidés semblent très craintifs et prudents à l'approche d'une embarcation (Baird *et al.*, 2021), ce chiffre paraît sous-estimer l'ampleur réelle du phénomène, puisque le nombre de collisions fatales n'est pas connu, mais supposées prépondérantes. Dans les îles Canaries, Plön (2023) rapporte que, sur 16 individus échoués analysés, 4 présentaient des signes de collisions fatales. Cette hypothèse est renforcée par la forte densité du trafic maritime dans certaines zones de l'arc antillais, en particulier à proximité des grands axes portuaires. Les navettes inter-îles, notamment celles opérées par des navires à grande vitesse, peuvent atteindre jusqu'à 39 nœuds. Elles effectuent plus de trois liaisons aller-retour par jour, jusqu'à 16 liaisons quotidiennes sur l'île de Bequia aux Grenadines (Kiszka *et al.*, 2024), renforçant le risque de collisions mortelles (Vanderlaan & Taggart, 2007).

Les autres blessures anthropiques sont probablement d'anciennes traces d'interactions avec des engins de pêche, liées soit au dépêtrément suite à une prise accidentelle dans un filet ou une ligne dérivante, soit aux marques laissées après un comportement de déprédation directe sur les appâts ou les prises (Baird *et al.*, 2021).

Aucune information sur la pollution acoustique n'était évaluée dans cette étude, les seules observations réalisées lorsque la navigation s'effectuait à la voile ont eu lieu à l'occasion des observations du 29-03-2022, 24-02-2024 et du 20-06-2024. Le reste des observations de Kogiidés étaient effectuées au moteur, et aucune différence nette de paysage acoustique n'était observée entre les deux situations. L'ensemble des filtres appliqués en amont des analyses acoustiques en était probablement la cause. Cela a donc empêché de vérifier l'hypothèse selon laquelle la navigation au moteur pouvait agir comme une nuisance sonore.

## 3. Acoustique

L'analyse acoustique s'est imposée dans cette étude comme un outil particulièrement efficace pour appuyer les observations visuelles. Dans près de 80 % des cas, les observations visuelles ont été confirmées par une détection acoustique, soulignant ainsi la grande efficacité de l'acoustique passive pour l'échantillonnage du milieu marin, comme en témoignent les travaux de Hildebrand *et al.* (2019), qui confirment l'utilisation plus fiable de cette méthode pour estimer les densités de *Kogia* à partir de signaux acoustiques. Ce résultat est particulièrement encourageant pour l'analyse des portions d'effort sans observation visuelle, ou de celles interrompues en cas de dégradation des conditions météorologiques. De plus, l'analyse préliminaire de certaines séquences acoustiques enregistrées en dehors des périodes d'effort visuel positif confirmerait que les Kogiidés soient plus abondants qu'on ne l'imagine, comme souvent mentionné dans la littérature (Hildebrand *et al.* 2019 ; Hadoram & Brett, 2020). En effet, au cours d'une expédition réalisée dans les îles du Sud des Petites Antilles, des Kogiidés ont été détectés ponctuellement à quatre reprises en acoustique le 16-03-2024 à Saint-Vincent, sans qu'aucune observation visuelle n'ait été réalisée ce jour-ci. Ces informations sont d'autant plus prometteuses que l'absence de perception d'un signal acoustique n'a concerné que 10% des occasions où une observation visuelle était faite. Ce manque s'expliquerait possiblement par l'inactivité vocale des individus au moment même de leur détection en surface, ou bien par la grande directionnalité du faisceau d'émission des clics d'écholocation des Kogiidés, qui réduit la probabilité de les détecter. En effet, lorsque les clics sont mesurés par l'hydrophone à des angles éloignés de l'axe initial du faisceau d'émission, ils sont déformés par rapport au signal le long de cet axe. Ainsi, plus l'angle depuis l'axe est important, plus la distorsion du signal augmente (Jiang *et al.* 2021), limitant leur détectabilité. Il existe cependant une relation entre la fréquence d'un clic et sa directionnalité, où la largeur du faisceau se réduit au fur et à mesure que la fréquence du son s'élève (Smith *et al.* 2015). Par conséquent, les clics à plus basse fréquence étaient plus susceptibles d'être interceptés par l'hydrophone.

A ce propos, à plusieurs reprises dans cette étude, une particularité étonnante dans l'allure du spectre de fréquence de certains trains de clics de *Kogia* a été mise en évidence. En effet, des signaux acoustiques de *Kogia* ont été détectés avec un pic de fréquence à 117 kHz. Afin d'être sûr d'avoir attribué ces clics au genre

*Kogia*, seules ont été retenues les occasions où une observation visuelle certaine de *Kogia* était rapportée, sans qu'aucune autre observation d'une autre espèce ne soit réalisée simultanément ou temporellement proche. A l'exception de ce pic de fréquence, l'ensemble des caractéristiques acoustiques correspondait à celles communément décrites pour le genre. Cette découverte surprenante met en évidence une potentielle particularité locale, interne aux Petites Antilles, impliquant possiblement une forme de langage local. L'émission d'une fréquence plus basse qu'attendue dans les trains de clics pourrait également s'expliquer par une variation liée à l'âge des individus. La fréquence des sons produits étant possiblement proportionnelle à la taille du melon, agissant comme une caisse de résonance. Les spécimens plus âgés, au melon plus volumineux, seraient alors capables d'émettre des sons à plus basse fréquence, à l'instar du grand cachalot, qui émet des clics basse fréquence, environ huit fois plus bas, habituellement autour de 15 kHz (Madsen *et al.*, 2002). Or, selon Jiang *et al.* (2021), la taille du melon semble influencer la durée de l'intervalle inter-clic plutôt que la fréquence même du clic. Cette piste, n'étant qu'hypothétique, nécessiterait une analyse ultérieure plus fine des intervalles inter-clics. En disposant de plusieurs trains de clics enregistrés à différentes dates et correspondant à des configurations de groupe variées (individus isolés, duos mère-veau, groupes d'adultes ou de jeunes), il deviendrait possible d'isoler les productions acoustiques de chaque profil de taille et d'âge. Une telle approche permettrait de tester directement si l'ICI varie systématiquement en fonction de la taille du melon, et donc de l'âge ou du sexe des individus.

Il pourrait plus simplement s'agir d'une aptitude physiologique intrinsèque de l'espèce à émettre des vocalisations dans une plus large gamme de fréquences, de la même manière que l'espèce humaine est capable d'émettre des sons graves et d'autres plus aigus pour communiquer.

L'ensemble des préfiltres appliqués dans PAMGuard pour l'analyse acoustique s'est révélé efficace pour détecter les clics de Kogiidés présents dans les enregistrements réalisés au cours des campagnes d'échantillonnage de la CCS. Cependant, quelques séquences acoustiques attribuables à des clics de delphinidés ont néanmoins été détectées au sein des enregistrements. Toutefois, leur présence n'a pas compromis l'analyse, dans la mesure où leurs caractéristiques acoustiques se distinguaient nettement de celles des Kogiidés, empêchant toute confusion. Les intervalles inter-clics étaient particulièrement courts, associés à des spectres de

fréquences diffus à plusieurs pics, et une signature acoustique arrondie sur le spectrogramme de Wigner. Enfin, les groupes observés étaient généralement de grande taille, générant une superposition importante de trains de clics. Par ailleurs, aucune observation de *Kogia* n'a été rapportée en présence simultanée d'autres espèces et toutes les détections acoustiques de delphinidés s'accompagnaient d'une observation visuelle.

Afin d'améliorer à l'avenir l'effort de recherche sur les Kogiidés et de faciliter leur détection en surface, il serait pertinent de coupler à la détection acoustique passive un dispositif d'alerte. La mise en place d'une alarme ou plus simplement d'un système d'amplification des clics pour les rendre audibles à l'oreille humaine permettrait une détection en temps réel par l'équipe à bord. Ce type de dispositif contribuerait à affiner l'évaluation de la distance de détectabilité du genre, puis, connecté à un système de triangulation dépendant du train d'hydrophones tracté, pourrait améliorer la localisation spatiale des individus par rapport au bateau, facilitant ainsi leur observation visuelle.

#### 4. Distribution

Jusqu'à présent méconnue, cette étude préliminaire fournit pour la première fois une vision d'ensemble de la répartition potentielle du cachalot nain dans les Petites Antilles, fortement dépendante de la combinaison de trois paramètres environnementaux que sont la bathymétrie, la concentration en chlorophylle-a, et la vitesse des courants de surface.

Les estimations de densités obtenues, initialement exprimées en probabilités, puis converties en nombre de groupes par unité de surface, apparaissent cohérentes au regard des travaux de Hildebrand *et al.* (2019). Dans les zones les plus favorables au sud de l'archipel des Petites Antilles, les estimations atteignent en moyenne 1 groupe pour 7,8 km<sup>2</sup>. À titre de comparaison, Hildebrand *et al.*, (2019) rapportent, dans le Golfe du Mexique, des densités pouvant atteindre jusqu'à 16 individus pour 1 000 km<sup>2</sup>, soit environ 0,12 individu pour 7,8 km<sup>2</sup>. Bien que les unités diffèrent, l'ordre de grandeur reste comparable. Il convient également de noter que ces estimations ne tiennent pas compte des particularités locales de chaque population, des différences d'habitats entre les deux sites d'étude, ni du mode de vie généralement solitaire ou en petits groupes des Kogiidés. Ces éléments fournissent néanmoins un premier repère encourageant.

La distribution prédite des Koggiidés le long de l'arc antillais révèle un gradient marqué nord-sud, avec une plus forte probabilité de présence dans la moitié sud de la zone d'étude (Fig 12.). Cette tendance semble s'aligner à la rareté réelle des observations rapportées dans le secteur nord. La bathymétrie constitue vraisemblablement le principal facteur explicatif de cette distribution, d'autant plus que cette variable statique, intégrée dans le modèle, est ressortie dans 99.9% des 1033 combinaisons testées. En effet, la distribution prédite des groupes de Koggiidés semble grandement superposée avec le contraste bathymétrique de la zone d'étude. Or, de fortes densités ont été prédites à l'est de la Guadeloupe et au nord de la zone d'étude. Ces surestimations ont probablement été entraînées par un possible effet de bord combiné à la grande profondeur de ces zones, ce qui expliquerait également les forts coefficients de variation observés. L'analyse de la variable bathymétrique comme prédicteur met effectivement en évidence un accroissement de l'incertitude avec l'augmentation de la profondeur.

Les concentrations en chlorophylle-a montrent également une tendance similaire, avec un gradient croissant au fur et à mesure que l'on perd en latitude. Les concentrations moyennes dans la moitié nord apparaissent toujours plus importantes à l'approche des zones côtières et de faible profondeur, là où le dénivelé du relief marin reprend positivement, se traduisant probablement par des phénomènes de micro-upwelling liés à la topographie, et donc à un enrichissement de l'environnement euphotique. Ces habitats côtiers peu profonds ne sont alors pas prédits comme étant favorables à la présence de *Kogia*, même si les valeurs moyennes de chlorophylle-a associées leurs sont préférables. De la même manière, les faibles densités estimées dans ces zones reflètent l'inadéquation de ces habitats sur le plan de la courantologie, conformément aux prédictions établies pour cette variable. Les concentrations de chlorophylle-a plus importantes dans le sud seraient possiblement liées à l'homogénéisation naturelle des plus hautes températures vers les basses latitudes, variable avec laquelle une corrélation non négligeable est relevée ( $R = 0.59$ ), accélérant ainsi la productivité primaire de ces zones et jouant en faveur de la présence des Koggiidés. De plus, au large des Grenadines, côté mer des Caraïbes, les moyennes de concentrations en chlorophylle-a varient approximativement entre 0.2 et 0.4  $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ , ce qui semble convenir parfaitement aux préférences d'habitat du genre *Kogia* prédites (Fig 11.).

Concernant la vitesse des courants, variable océanographique entraînée dans 41.2% des

combinaisons de modèles testées, son intensité est toujours plus importante dans les canaux inter-îles. Ce phénomène physique influencé par le vent des alizés, qui souffle d'est en ouest, est d'autant plus fort dans ces zones qu'aucune barrière naturelle physique, comme un relief insulaire, n'est présente pour abriter ces milieux. Il en résulte des courants plus importants qu'ailleurs, forçant par exemple jusqu'à  $0.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  dans le canal entre Sainte-Lucie et Saint-Vincent, en moyenne entre 2021 et 2024. Les Koggiidés, ayant montré une affinité pour les courants n'excédant pas plus de  $0.4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , la prédiction de leur distribution n'a ainsi pas été projetée dans ces zones de canal, à l'exception de celui séparant la Martinique de Sainte-Lucie, où la vitesse des courants varie entre 0.15 et  $0.37 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Enfin, la zone de forte densité prédite au large dans l'Atlantique, au sud-est de la zone d'étude, semble être favorable en tout point (Fig 12.). D'après les prédictions faites sur la base des trois prédicteurs combinés, les concentrations moyennes en chlorophylle-a, la vitesse des courants et la bathymétrie sont a priori toutes réunies en faveur de la présence de *Kogia* dans ce secteur.

Par ailleurs, la modélisation de leur distribution semble aussi mettre en avant deux types de zones à plus forte densité, des côtes vers le large. Une première zone est identifiée au niveau du talus continental, vers 750 m en moyenne, tandis qu'une seconde zone, plus au large, se projette là où les profondeurs atteignent plus de 2000 m. Ce résultat pourrait refléter la distribution actuellement décrite pour les deux espèces du genre, selon laquelle *K. breviceps* est plus fréquemment observé au large, dans des zones de grande profondeur, et *K. sima* plus près de la côte, le long du talus continental (McAlpine, 2009 ; Hodge *et al.*, 2018 ; Baird *et al.*, 2021 ; Plön *et al.*, 2023 ; Bloodworth & Odell, 2008 ; Plön, 2023). Cette hypothèse soulèverait alors un éventuel biais d'identification dans les données de cette étude, lié à la difficulté de distinction des deux espèces.

Cette distribution peut également refléter une forme de déplacement saisonnier entre les côtes et le large comme décrit par Dunphy-Daly *et al.* (2008) aux Bahamas. D'après leurs travaux, les cachalots nains seraient susceptibles d'occuper des zones très profondes au large pendant la saison estivale, puis, sous l'influence de courants favorables et de la migration associée de leurs proies, de revenir plus près des côtes pendant la saison hivernale, entre juin et août. Cette tendance concorde avec les résultats présentés, notamment sur le plan topographique. Cependant, cette étude ne permet pas d'apporter de dimension temporelle aux données traitées, sachant

que les variables océanographiques dynamiques liées à la productivité primaire (concentration en chlorophylle-a) et à la courantologie (composante N0 et E0 de la vitesse des courants de surface) ont été moyennées sur la période 2021-2024. Les prédictions du modèle confirment également les conclusions de Kiszka *et al.*, (2024) qui affirment l'existence d'une zone d'importance mondiale pour *K. sima* au sud et sud-ouest de Saint-Vincent, autour de 650 m de profondeur. En effet, 41% de nos observations ont eu lieu dans ce secteur (Tab 2.).

Bien que la concentration en chlorophylle-a soit souvent utilisée comme proxy pour estimer la disponibilité des proies des cétacés plongeurs profonds, leur alimentation dans des zones dépourvues de lumière suggère qu'il pourrait être pertinent d'explorer l'hypothèse d'un régime reposant sur un réseau trophique profond, fondé sur une production primaire d'origine chimiosynthétique plutôt que photosynthétique.

## 5. Limitations

Malgré le nombre restreint d'observations et l'effort d'échantillonnage très limité en côte au vent, le modèle de distribution a tout de même fait ses preuves puisqu'il a été en mesure de prédire des présences potentielles dans des zones jusqu'ici inéchantillonnées, comme en témoignent les bons niveaux d'indicateurs de performance du TSS à 0,85 et de l'AUC à 0,92. Aucun point d'observation de *Kogia* n'y avait été réalisé, à l'exception d'un seul point confirmé à l'est de Saint-Vincent. À l'inverse, il n'a pas non plus surconsidéré les zones où l'effort d'échantillonnage était le plus intense, à l'image de la Martinique, qui est le point de départ commun à toutes les expéditions. Cependant, l'échantillonnage n'étant pas systématique, l'effort, aléatoire dans son ensemble, était finalement influencé par le repérage des cétacés, puisque la trajectoire du bateau était déviée pour aller à leur rencontre si la situation le permettait, et tout en respectant les règles d'approche. Ceci, combiné à une évaluation encore approximative de la distance de détectabilité, qui dépend fortement de l'observateur, ne permettait pas de calculer la distance exacte à laquelle se trouvait chaque groupe détecté, au moment de leur première observation en surface. Pour valider ou ajuster les prédictions du modèle, il serait alors opportun d'intensifier l'effort côté Atlantique et d'instaurer un protocole plus robuste pour l'évaluation de ces distances, en plaçant par exemple un observateur à poste fixe sur le bateau, qui relève la distance au moyen de jumelles à réticule et d'un

compas intégré. Par ailleurs, la mise en place d'un modèle MaxEnt serait également pertinente à l'avenir, puisqu'il pourrait intégrer à la fois les données de détectations visuelles et acoustiques, ainsi que toutes données provenant d'autres programmes, qu'elles soient ponctuelles ou non, et peu importe la méthode d'échantillonnage dont elles sont issues.

Cette étude a également vu ses limites concernant l'analyse des captures photographiques pour la photo-identification. Sur les 2 024 photos disponibles des 80 ± 19 individus de *Kogia* repérés, seules 27 ont servi de clichés pour identifier les individus marqués les plus distinctifs. Cette perte d'information était en grande partie liée à la qualité des images ne permettant pas leur exploitation, mais aussi aux limites d'analyse du logiciel Flukebook, qui a rencontré des difficultés de fonctionnement, car il utilise pour la première fois un algorithme dédié au traitement d'images de *Kogia*. Une base de données photographiques plus étoffée, ainsi qu'un matériel de meilleure qualité, sont désormais mis à disposition pour approfondir ces recherches dans la continuité de ce travail.

---

## CONCLUSION

Cette étude préliminaire, centrée sur les Kogiidés, offre finalement les premières clés de compréhension de l'écologie de la seule espèce du genre confirmée dans les Petites Antilles : le cachalot nain (*Kogia sima*). Malgré la rareté des rencontres, l'intégration des approches visuelles, acoustiques, et de modélisation a permis d'identifier des schémas de distribution cohérents, de premiers déplacements inter-îles, ainsi que des menaces préoccupantes, principalement d'origine anthropique. Dans la continuité des campagnes scientifiques du programme « Ti Whale An Nou » de la Caribbean Cetacean Society, ces premiers résultats constituent une base précieuse qui contribuera à améliorer, à l'avenir, les capacités de détection et de suivi de l'espèce, enclenchant ainsi une dynamique vertueuse, où chaque avancée facilite de nouvelles découvertes et affine notre compréhension de ces cétacés. L'observation de signaux acoustiques atypiques suggère même une possible particularité locale dans leur vocalisation. Dès lors, un effort accru, tant en matière de suivi que de collaboration régionale, apparaît indispensable pour mieux documenter cette espèce discrète, dont la méconnaissance freine encore la mise en place d'actions de conservation adaptées.

## BIBLIOGRAPHIE

- Baird.R.W. (2009) : Sightings of Dwarf (*Kogia sima*) and Pygmy (*K. breviceps*) Sperm Whales from the Main Hawaiian Islands. DOI: 10.1353/psc.2005.0031
- Baird.R.W., et al. (2021) : Site fidelity, spatial use, and behavior of dwarf sperm whales in Hawaiian waters: using small-boat surveys, photo identification, and unmanned aerial systems to study a difficult-to-study species. DOI: 10.1111/mms.12861
- Baird.R.W., Nelson.D., Lien.J., & Nagorsen.D.W. (1996) : The status of the pygmy sperm whale, *Kogia breviceps*, in Canada. The Canadian Field-Naturalist 110: 525-532. DOI: <https://doi.org/10.5962/p.357508>
- Baird.R.W., Webster.D.L., Aschettino.J.M., Schorr.G.S., & McSweeney.D.J. (2013) : Odontocete cetaceans around the main Hawaiian Islands: Habitat use and relative abundance from small-boat sighting surveys. *Aquatic Mammals* 39: 253-269. DOI: 10.1578/AM.39.3.2013.253
- Barlow.J. (2006) : Cetacean abundance in Hawaiian waters estimated from a summer/fall survey in 2002. *Marine Mammal Science* 22:446-464. DOI: 10.1111/j.1748-7692.2006.00032.x
- Bloodworth.B.E., & Odell.D.K. (2008) : *Kogia breviceps* (Cetacea: Kogiidae). *Mammalian Species*. DOI: 10.1644/819.1
- Bossart.G.D., Odell.D.K., & Altman.N.H. (2007) : Cardiomyopathy in stranded pygmy and dwarf sperm whales. *J Am Vet Med Assoc*. 1985 Dec 1;187(11):1137-40. PMID: 4077624. DOI: 10.1578/AM.33.2.2007.214
- Bradford.L.A., Oleson.M.E., Forney.A.F., Moore.E.J., & Barlow.J. (2021) : Line-transect abundance estimates of cetaceans in U.S. waters around the Hawaiian Islands in 2002, 2010, and 2017. NOAA Technical Memorandum NMFS-PIFSC-115. DOI: <https://doi.org/10.25923/daz4-kw84>
- Caldwell.D.K., Caldwell.M.C., & Arrindell.G. (1973) : Dwarf sperm whales, *Kogia simus*, from the lesser Antillean Island of St. Vincent. *Journal of Mammalogy* 54(2): 515-517. DOI: <https://doi.org/10.2307/1379143>
- Cardona-Maldonado.M.A., & Mignucci-Giannoni.A.A. (1999) : Pygmy and Dwarf Sperm Whales in Puerto Rico and the Virgin Islands, with a Review of *Kogia* in the Caribbean. *Caribbean Journal of Science*, Vol. 35, No. 1-2, 29-37.
- Cawardine.M. (2022) : Field guide to whales, dolphins and porpoises. Bloomsbury wildlife. pp. 288.
- Chivers.S.J., LeDuc.R.G., Robertson.K.M., Barros.N.B., & Dizon.A.E. (2005) : Genetic variation of *Kogia* spp. With preliminary evidence for two species of *Kogia sima*. *Marine Mammal Science* 21:619-634. DOI: 10.1111/j.17487692.2005.tb01255.x
- Claridge, D.E. (2006) : Fine-scale distribution and habitat selection of Beaked whales. MSc in Zoology. University of Aberdeen, Scotland.
- Dunn.C., & Claridge.D. (2013) : Killer whale (*Orcinus orca*) occurrence and predation in the Bahamas. Bahamas Marine Mammal Research Organisation (BMMRO). *Journal of the Marine Biological Association of the UK*. DOI: 10.1017/S0025315413000908
- Dunphy-Daly. M.M., et al. (2008). Temporal variation in dwarf sperm whale (*Kogia sima*) habitat use and group size off Great Abaco Island, Bahamas. *Marine Mammal Science*, 24, 171-182. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.17487692.2007.00183.x>
- Dupin.M. (2024) : Preliminary study of Beaked whale (*Ziphiidae*) distribution, movements, acoustics, and habitat use in the Lesser Antilles. M2 report. University of French Polynesia.
- Garrison.L.P., A. Martinez & Maze-Foley.K. (2010). Habitat and abundance of cetaceans in Atlantic Ocean continental slope waters off the eastern USA. *Journal of Cetacean Research and Management* 11:267-277. DOI: 10.47536/jcrm.v11i3.606
- Gauducheau.V. (2023) : Étude de l'incidence des blessures externes chez les cétacés des Petites Antilles, et caractérisation préliminaire des pressions anthropiques associées. Mémoire de master 2 SPE, Gestion de l'Environnement et Écologie Littorale, Université de la Rochelle. Caribbean Cetacean Society.

- Hadoram.S., & Brett.J., (2020) : Mammifères marins du monde. Delachaux et Niestlé. pp. 384.
- Herr.H., Burkhardt-Holm.P., Heyer.K., Siebert.U., & Selling.J. (2020) : Injuries, Malformations, and Epidermal Conditions in Cetaceans of the Strait of Gibraltar. *Aquatic Mammals*, 46(2), 215–235. DOI: <https://doi.org/10.1578/AM.46.2.2020.215>
- Hildebrand.J.A., et al. (2019) : Assessing Seasonality and Density From Passive Acoustic Monitoring of Signals Presumed to be From Pygmy and Dwarf Sperm Whales in the Gulf of Mexico. *Front. Mar. Sci.* 6:66. DOI: <https://doi.org/10.3389/fmars.2019.00066>
- Hodge.L.E., et al. (2018) : Heard but not seen: occurrence of *Kogia spp.* along the western North Atlantic shelf break. *Marine Mammal Science* 34: 11411153. DOI: 10.1111/mms.12498
- Jeremie.S., et al. (2003) : Échantillonnage visuel et acoustique des populations de Cétacés et de l'Avifaune marine dans les eaux territoriales à la Martinique : Mars-Avril 2003. Estimation de l'abondance et distribution en début de saison sèche (Carême). Rapport Technique SEPANMAR n° 01, 57 pp.
- Jiang.J., et al. (2021) : Study of the relationship between sound signals and behaviors of a sperm whale during the hunting process. *Applied Acoustics* 174, 107745. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2020.107745>
- Kiszka.J & Braulik.G. (2020) : *Kogia sima*, dwarf sperm whale. The IUCN Red List of Threatened Species. e.T11048A50359330. DOI: <https://dx.doi.org/10.2305/IUCN.UK.2020-2.RLTS.T11048A50359330.en>
- Kiszka.J., et al. (2024) : Habitat suitability, occurrence, and behavior of dwarf sperm whales (*Kogia sima*) off St. Vincent and the Grenadines, Eastern Caribbean. DOI: 10.1016/bs.amb.2024.09.002
- Laran.S., Authier.M., Van Canneyt.O., Doremus.G., Watremez.P., & Ridoux.V. (2017) : A comprehensive survey of pelagic megafauna: their distribution, densities, and taxonomic richness in the tropical Southwest Indian Ocean. *Front. Mar. Sci.* 4, 139. DOI: 10.3389/fmars.2017.00139
- Levenson.J., Gero.S., Van Oast.J., & Holmberg.J. (2015) : Flukebook: a cloud-based photo-identification analysis tools for marine mammal research. Software accessible at: <https://www.flukebook.org>
- Luksenburg.J.A. (2014) : Prevalence of External Injuries in Small Cetaceans in Aruban Waters, Southern Caribbean. *PLOS ONE*, 9(2), e88988. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0088988>
- Madsen.P.T., Carder.D.A., Bedholm.K., & Ridgway.S.H. (2005) : Porpoise clicks from a sperm whale nose convergent evolution of 130 kHz pulses in toothed whales? *Bioacoustics* 15:195–206. DOI: 10.1080/09524622.2005.9753547
- Madsen.P.T., Wahlberg.M., & Møhl.B. (2002) : Male sperm whale (*Physeter macrocephalus*) acoustics in a high latitude habitat: implications for echolocation and communication. *Behavioral Ecology and Sociobiology* 53: 31–41. DOI: 10.1007/s00265-0020548-1
- Malinka.C.E., et al. (2021) : Echolocation click parameters and biosonar behaviour of the dwarf sperm whale (*Kogia sima*). *Journal of Experimental Biology*. DOI: 10.1242/jeb.240689
- McAlpine.D.F. (2009) : Pygmy and dwarf sperm whales *Kogia breviceps* and *K. sima*. Pages 936–938 in W. F. Perrin, B. Würsig, J. G. M. Thewissen, eds. *Encyclopedia of marine mammals*. 2nd edition. Academic Press, San Diego, CA. DOI: 10.1016/B978-0-12-373553-9.00212-1
- Merkens.K., et al. (2018) : Clicks of dwarf sperm whales (*Kogia sima*). *Marine Mammal Science*. DOI: 10.1111/mms.12488, pp. 1-16.
- O'Brien.J.M., et al. (2009) : A note on long-distance matches of bottlenose dolphins (*Tursiops truncatus*) around the Irish coast using photo identification. *J. Cetacean Res. Manage.*, 11(1), 69–74. DOI: <https://doi.org/10.47536/jcrm.v11i1.632>
- Plön.S. (2004) : The Status and Natural History of Pygmy (*Kogia breviceps*) and Dwarf (*K. sima*) Sperm Whales off Southern Africa. PhD thesis. Rhodes University, Grahamstown, South Africa, pp. 553.
- Plön.S. (2023) : Pygmy Sperm Whale *Kogia breviceps* (de Blainville, 1838). *Handbook of the Mammals of Europe*, Handbook of the Mammals of Europe. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-319-650388\\_90-1](https://doi.org/10.1007/978-3-319-650388_90-1)

- Plön.S., & Baird.R.W. (2022) : Dwarf Sperm Whale, *Kogia sima* (Owen,1866). *Handbook of the Mammals of Europe*, Handbook of the Mammals of Europe. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-319-65038-8\\_91-1](https://doi.org/10.1007/978-3-319-65038-8_91-1)
- Plön.S., et al. (2023) : Population structure of pygmy (*Kogia breviceps*) and dwarf (*Kogia sima*) sperm whales in the Southern Hemisphere may reflect foraging ecology and dispersal patterns. *Advances in Marine Biology*, Volume 96. Chapter 5. DOI: <https://doi.org/10.1016/bs.amb.2023.09.001>
- Read.A.J., & Westgate.A.J. (1997) : Monitoring the movements of harbour porpoises (*Phocoena phocoena*) with satellite telemetry. *Marine Biology* 130:315–322. DOI: 10.1007/s002270050251
- Ruete.A., & Leynaud.C.G. (2015) : Goal-oriented evaluation of species distribution models' accuracy and precision: True Skill Statistic profile and uncertainty maps. DOI: 10.7287/PEERJ.PREPRINTS.1208
- Smith.A.B., Kloepper.L., Yang.W.C., et al. (2015) : Echolocation beam shape of the Risso's dolphin (*Grampus griseus*). *J Acoust Soc Am*, 137 (4), pp. 2334 2335. DOI: 10.1121/1.4920527
- Sylvestre.J.P. (2014) : Cétacés du monde. Systématique, éthologie, biologie, écologie, statut. Quae. pp. 352
- Vanderlaan.A.S.M., & Taggart.C.T. (2007) : Vessel collisions with whales: The probability of lethal injury based on vessel speed. *Marine Mammal Science*. 23(1): p. 144-156. DOI: 10.1111/j.1748 7692.2006.00098.x
- Violaine.D., et al. (2024) : Records from visual surveys, strandings and eDNA sampling reveal the regular use of Reunion waters by dwarf sperm whales. *Advances in Marine Biology*. Vol 99. DOI: <https://doi.org/10.1016/bs.amb.2024.08.003>
- Virgili.A., et al. (2018) : Combining multiple visual surveys to model the habitat of 72 deep-diving cetaceans at the basin scale : Large-scale modelling of deep-diving cetacean habitats. *Global Ecology and Biogeography*, 28(3), 300-314. DOI: <https://doi.org/10.1111/geb.12850>
- Willis.P.M., & Baird.R.W. (1998) : Status of the dwarf sperm whale, *Kogia simus*, with special reference to Canada. *The Canadian Field-Naturalist* 112: 114-125. DOI: 10.5962/p.358359

- ANNEXE I -  
CATALOGUE PHOTO\_ID 2021-2024



CCS\_Ks\_0001



CCS\_Ks\_0002



CCS\_Ks\_0003



CCS\_Ks\_0004



CCS\_Ks\_0005



CCS\_Ks\_0006



CCS\_Ks\_0007



CCS\_Ks\_0008



CCS\_Ks\_0009



CCS\_Ks\_0010



CCS\_Ks\_0011



CCS\_Ks\_0012



CCS\_Ks\_0013



CCS\_Ks\_0015



CCS\_Ks\_0016



CCS\_Ks\_0017



CCS\_Ks\_0018



CCS\_Ks\_0019



CCS\_Ks\_0020



CCS\_Ks\_0021



CCS\_Ks\_0022



CCS\_Ks\_0023



CCS\_Ks\_0024



CCS\_Ks\_0025



CCS\_Ks\_0026



CCS\_Ks\_0027



CCS\_Ks\_0028

- ANNEXE II -  
EXTRAIT DU JEU DE DONNÉES D'OBSERVATIONS DE KOGIA (2021 - 2024)

Date	espèce	taille min	taille estimée	taille max	nbr juvéniles	photo	île
15/09/2021 09:51	Cachalot nain	5	7	8	NA	Yes	Martinique
18/09/2021 07:54	Cachalot nain	2	2	5	NA	No	Sainte-Lucie
18/09/2021 15:43	Cachalot nain	2	3	5	NA	Yes	Martinique
21/09/2021 16:59	Cachalot nain	4	5	7	NA	Yes	Guadeloupe
29/03/2022 14:19	Cachalot nain	2	2	2	NA	No	SVG
21/06/2022 07:04	Cachalot nain	2	3	5	NA	No	Grenada
26/06/2022 15:24	Cachalot nain	3	5	7	NA	No	SVG
24/09/2022 11:23	Cachalot nain	1	1	2	NA	Yes	Sainte-Lucie
02/10/2022 15:31	Cachalot nain	3	3	3	NA	Yes	Martinique
09/03/2023 13:18	Cachalot nain	2	2	2	NA	Yes	SVG
09/03/2023 18:18	Cachalot nain	2	2	2	NA	Yes	SVG
10/03/2023 07:25	Cachalot nain	2	2	2	NA	No	SVG
18/03/2023 07:40	Cachalot nain	NA	2	NA	NA	No	Sainte-Lucie
11/04/2023 14:38	Cachalot nain	5	7	10	NA	Yes	Guadeloupe
14/04/2023 12:52	Cachalot nain	7	8	10	0	Yes	Martinique
21/07/2023 09:11	Cachalot nain	1	1	1	0	Yes	Guadeloupe
26/10/2023 14:37	Cachalot nain	1	1	2	NA	No	Bonaire
28/10/2023 15:48	Cachalot nain	1	2	2	NA	Yes	Bonaire
24/02/2024 10:08	Cachalot nain	1	2	3	NA	No	Sainte-Lucie
23/03/2024 12:09	Cachalot nain	1	1	1	0	No	SVG
25/03/2024 11:22	Cachalot nain	1	1	1	NA	Yes	SVG
26/03/2024 09:55	Cachalot nain	2	2	3	NA	Yes	SVG
26/03/2024 13:29	Cachalot nain	2	2	2	NA	No	SVG
27/03/2024 16:15	Cachalot nain	NA	NA	NA	NA	Yes	SVG
28/03/2024 09:52	Cachalot nain	2	2	2	0	Yes	SVG
28/03/2024 10:55	Cachalot nain	3	3	3	NA	Yes	SVG
17/04/2024 06:45	Cachalot nain	2	2	2	0	Yes	Martinique
20/06/2024 13:15	Cachalot nain	1	1	1	NA	No	Sainte-Lucie
21/06/2024 08:26	Cachalot nain	2	2	2	NA	Yes	Sainte-Lucie
23/06/2024 13:28	Cachalot nain	1	1	2	NA	Yes	SVG
06/07/2024 06:57	<i>Kogia</i> indéterminé	2	2	2	NA	Yes	Martinique
16/07/2024 07:33	Cachalot nain	3	3	6	1	Yes	Martinique