



ÉTUDE DE FAISABILITÉ SUR L'UTILISATION DE DRONE POUR LE SUIVI DE L'ACTIVITÉ DE WHALE-WATCHING À LA RÉUNION.

BARBARIT Solène

Avec le
soutien financier de



Table des matières

1. Introduction.....	3
2. Matériel et Méthode	4
2.1 Zone d'étude.....	4
2.2. Collecte des données	4
2.2.1. <i>Suivi depuis un navire</i>	6
2.2.2. <i>Suivi aérien par UAV (Unmanned Aerial Vehicles)</i>	6
2.3. Analyses des données	7
2.3.1. Concordance des deux méthodes d'observation.....	7
2.3.2. Analyse qualitative entre les deux méthodes.....	7
3. Résultats	8
4. Discussion	13
4.1. <i>Comparaison des méthodes de suivi comportementaux depuis un navire et par drone</i>	13
4.2. <i>Avantages des drones</i>	14
4.3. <i>Limites des drones</i>	14
5. Conclusion	15
6. Bibliographie.....	17

1. Introduction

Face aux enjeux croissants de conservation des cétacés, l'évaluation de l'impact des activités anthropiques sur ces espèces devient un axe central de la recherche en biologie de la conservation. Parmi ces activités, le whale-watching connaît une expansion mondiale rapide, soutenue par une demande touristique croissante (O'Connor et al., 2009 ; Hoyt et Parsons, 2014). Toutefois, si cette activité est souvent présentée comme « durable », son développement rapide soulève aujourd'hui de nombreuses interrogations quant à ses effets à court, moyen et long terme sur les espèces ciblées, en particulier dans les zones côtières où résident des populations vulnérables. L'île de La Réunion constitue un cas d'étude particulièrement préoccupant avec l'extension de cette activité, passant 2 structures pouvant réaliser du whale-watching en 2003 (Chazot et al., 2020), à 12 structures en 2009 (O'Connor et al., 2009), à 52 structures dont 40 pratiquant de l'observation en mise à l'eau en 2019 (Chazot et al., 2020) et à 64 structures en 2024 (CEDTM, données non-publiées). Bien que cette activité réponde à une demande touristique importante, elle affecte de nombreuses espèces de cétacés, notamment des espèces résidentes comme le grand dauphin de l'Indo-Pacifique (*Tursiops aduncus*), une espèce côtière sédentaire, classée « En danger » sur la Liste rouge de l'UICN Français (2013), dont les caractéristiques écologiques la rendent particulièrement sensible à la perturbation chronique (Cottarel et al., 2018 ; Fisseau et al., 2023).

Dans ce contexte, l'équipe Quiétude du Centre d'Étude et de Découverte des Tortues Marines (CEDTM) joue un rôle clé en assurant depuis plusieurs années un suivi régulier de l'activité de whale-watching à La Réunion, en lien avec les objectifs de conservation et de sensibilisation du public. Elle vise à mieux comprendre les impacts potentiels de l'activité humaine sur les cétacés et à fournir un appui scientifique aux politiques de régulation de l'écotourisme marin sur l'île.

L'évaluation rigoureuse des impacts de l'activité de whale-watching est indispensable pour proposer des mesures de gestion adaptées au contexte local. Traditionnellement, le suivi de l'activité de whale-watching repose sur une observation directe depuis un navire. Si cette méthode permet une approche fine du comportement des animaux, elle présente toutefois plusieurs limites : nécessité d'une expertise comportementale élevée, difficulté d'estimer certains paramètres et dépendance à la visibilité en mer.

L'une des solutions émergentes pour améliorer les protocoles de suivi consiste à utiliser des drones UAV (Unmanned Aerial Vehicles), en particulier ceux dotés d'un système VTOL (Vertical Take-Off and Landing). Ces drones permettent de collecter des données visuelles et comportementales à haute résolution, depuis un point de vue aérien, avec une perturbation minimale pour les animaux (Fiori et al., 2017 ; Fiori et al., 2019 ; Fettermann et al., 2022 ; Lo et al., 2024). Ils offrent un cadre d'observation plus stable, reproductible, et permettent de conserver des enregistrements vidéo pour un post-traitement rigoureux.

Dans le cadre d'un travail global portant sur l'évaluation de l'impact du whale-watching sur les grands dauphins de l'Indo-Pacifique (*Tursiops aduncus*) de La Réunion, une étude de faisabilité de l'utilisation des drones a été menée en parallèle. L'objectif était de tester leur efficacité comme outil de suivi de l'activité de whale-watching, en comparant directement les données obtenues par drone avec celles issues de l'observation classique depuis un navire. Cette comparaison méthodologique s'est centrée sur l'observation des comportements de surface et des réponses aux interactions humaines. Ce rapport présente les résultats de cette étude de faisabilité. Il vise à déterminer si l'usage de drones peut être intégré de manière efficace dans les protocoles de suivi de l'activité de whale-watching.

2. Matériel et Méthode

2.1 Zone d'étude

La zone d'échantillonnage pour cette étude (figure 1) s'est concentrée sur la côte ouest de l'île de La Réunion dans le sud-ouest de l'océan Indien (21,07°S – 55,20°E). Cette zone d'étude concentre la plus grande partie de l'activité de whale-watching de l'île et représente également la zone préférentielle des *T. aduncus* de la région (Condet & Dulau-Drouot, 2016 ; Cottarel et al., 2018 ; Dulau-Drouot et al., 2008). Ce qui en fait une zone à fort intérêt pour notre étude.

Les relevés sont réalisés sur la bande littorale, en partant du port de Saint-Gilles les Bains et en couvrant la zone entre Saint-Paul et Saint-Leu. Les *T. aduncus* ayant une gamme de profondeur restreintes, avec une moyenne de profondeur de 20 m (Dulau-Drouot et al., 2008), la zone d'étude s'étend de la côte jusqu'à atteindre une bathymétrie de 200 mètres de profondeur.

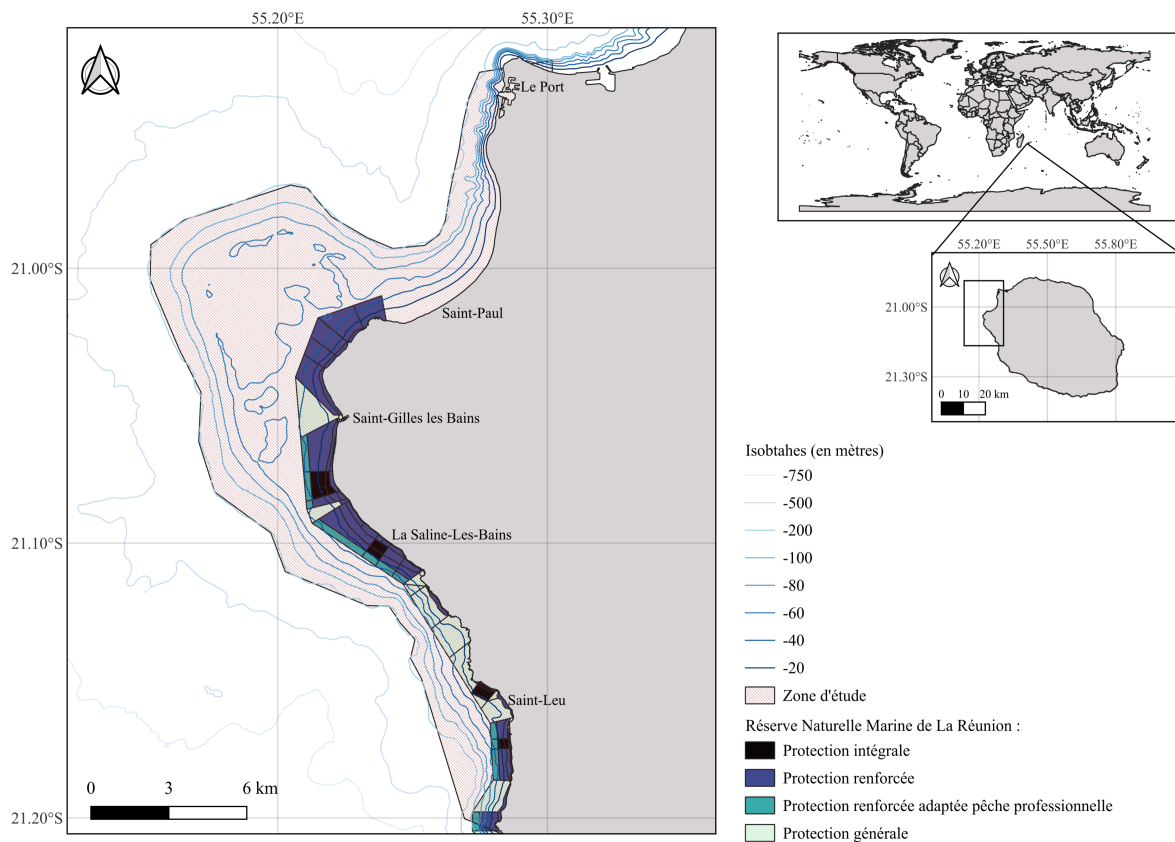


Figure 1: Carte de la zone d'étude des grands dauphins de l'Indo-Pacifique (*Tursiops aduncus*).

2.2. Collecte des données

Les données ont été collectées lors de quatre sorties en mer réalisées entre mars et mai 2025, combinant observations visuelles depuis un navire et observations aériennes par drone (UAV). Des suivi focalisé de groupe (Focal Follow Group Sampling), qui consiste à suivre le comportement d'un groupe de manière continue pour une période donnée, ont été réalisés.

Les sorties ont été réalisées sous conditions météorologiques optimales pour l'utilisation du drone, avec un vent < 10 nœuds et une houle < 2 m (Beaufort ≤ 2). Les sorties se déroulaient entre 8 h et 13 h.

Dès qu'un groupe de dauphins était observé, les relevés comportementaux débutaient et étaient maintenus pendant une durée minimale de 30 minutes, correspondant à l'autonomie de vol des drones utilisés lors des relevés aériens de l'étude de faisabilité (voir 2.2.2.). Les premières

informations collectées comprenaient le nombre total d'individus, la composition du groupe (adultes et juvéniles) et l'activité initiale du groupe au moment de notre arrivé. Ensuite, toutes les trois minutes, un relevé comportemental était effectué afin de documenter l'activité du groupe (tableau 1) et sa réaction aux navires de whale-watching (tableau 2).

Un juvénile est défini comme un individu dont la longueur corporelle est inférieure ou égale aux deux tiers de celle d'un adulte, systématiquement observé nageant à proximité immédiate de ce dernier, et présentant généralement une coloration plus claire que celle des adultes (Shane, 1990 ; Bearzi et *al.*, 1997 ; Van Aswegen et *al.*, 2019). Un groupe est défini comme un ensemble de dauphins observés en association apparente, se déplaçant dans une direction similaire et souvent, bien que pas systématiquement, engagés dans une même activité comportementale (Shane, 1990). Un changement de comportement était pris en compte lorsqu'au moins 50 % des individus du groupe adoptaient simultanément une modification comportementale (Altman, 1974 ; Mann, 1999). En cas de fragmentation du groupe, l'observation se poursuivait sur le sous-groupe majoritaire.

En parallèle, l'activité des navires de whale-watching était également relevée. Ces observations incluaient le nombre de navires présents, leur type d'activité, le nombre de mises à l'eau et de personnes en immersion, ainsi que les éventuelles infractions aux réglementations locales de l'activité (Préfet de La Réunion, 2021).

Tableau 1: Éthogramme des états d'activité des dauphins lors des relevés. Adapté de Quintana Martín-Montalvo et *al.* (2021), Kassamali-Fox et *al.* (2020) et Christiansen et *al.* (2010).

Activité	Définitions
Indéterminée	Le groupe de dauphins est visible mais son comportement ne correspond à aucune des catégories ci-dessus.
Voyage	Les dauphins se propulsent, se dirigeant tous dans la même direction et avançant de manière perceptible sur une trajectoire.
Repos	Les dauphins restent près de la surface et proches les uns des autres. Ils remontent à la surface à intervalles réguliers et de manière coordonnée, sans se propulser.
Milling	Les dauphins nagent mais changent très fréquemment de direction en restant dans la même zone. Font des ronds. Groupe non coordonné, certains individus vont dans un sens, d'autres dans un autre.
Nourrissage/Chasse	Les dauphins réalisent des mouvements en surface rapide et énergiques, changent fréquemment de direction, poursuivent des poissons. Observation d'individus avec des poissons dans la bouche.
Interaction	Toute interaction physique qui a lieu entre les membres d'un groupe, notamment la poursuite, les sauts et le contact corporel.
Reproduction	Comportement d'interaction où les faces ventrales entre 2 individus sont en contact.
Plongée	Le groupe de dauphins plonge de manière synchrone pendant plusieurs minutes et disparaît de la surface de l'eau.

Tableau 2: Éthogramme des réponses des dauphins aux navires de whale-watching. Adapté de Howland (1974), Lusseau et Higham (2003), Bejder et *al.* (2006) et Mesnick et *al.* (2019).

Réponses	Définitions
Approche	Les dauphins se dirigent directement vers les navires ou les nageurs à proximité (<10 m) pendant au moins 5 minutes.
Bowriding	Les dauphins nagent sur les vagues créées par les navires.
Évitement	Les dauphins évitent les navires ou nageurs en s'éloignant clairement, incluant un changement de cap, de vitesse ou de temps de plongée, tout en restant dans la zone.
Fuite	Les dauphins s'éloignent clairement de la zone présentant des navires et des nageurs, incluant un changement de cap, de vitesse ou de temps de plongée.
Indifférence	Absence de réponse évidente des dauphins.
Indéterminé	Le groupe de dauphins est visible, mais son comportement ne correspond à aucune des catégories ci-dessus.

Les deux équipes restaient en communication constante (talkie-walkie) afin de synchroniser les relevés. Chaque session de suivi combinait ainsi une observation visuelle depuis le navire et une observation aérienne par drone.

2.2.1. Suivi depuis un navire

Les relevés du suivi focalisé de groupe ont été réalisés à l'œil nu à bord du navire « Quiétude », un navire semi-rigide de 5,7 m appartenant au CEDTM. Lors de la détection d'un groupe de dauphins, le navire adoptait une approche passive parallèle respectant une distance minimale de 300 mètres et une vitesse réduite à 4 nœuds maximum, afin de minimiser l'influence de l'embarcation sur le comportement des animaux (Lusseau, 2006 ; Cecchetti *et al.*, 2019 ; Fiori *et al.*, 2019). A chaque relevés, le point GPS du navire était noté avec la date et l'heure.

2.2.2. Suivi aérien par UAV (Unmanned Aerial Vehicles)

Les relevés de suivi focalisé de groupe ont été réalisées en collaboration avec un prestataire spécialisé (Mokarran Consultant). Deux modèles de drones (UAV) ont été utilisés successivement au cours de l'étude :

- DJI Mavic 3T Enterprise Thermal : drone à système VTOL (Vertical Take-Off and Landing), équipé de trois capteurs :
 - Une caméra grand-angle (capteur CMOS 1/2", 48 mégapixels, focale équivalente 24 mm, ouverture fixe f/2.8), permettant la capture d'images très haute résolution (8000×6000 px) et l'enregistrement vidéo en 4K.
 - Un téléobjectif (capteur CMOS 1/2", 12 mégapixels, focale équivalente 162 mm, ouverture f/4.4), offrant un zoom optique jusqu'à 8x et un zoom hybride jusqu'à 56x, facilitant l'observation comportementale à distance.
 - Une caméra thermique (résolution 640×512 px, fréquence 30 Hz), utile pour détecter les signatures thermiques à la surface de l'eau et limiter les perturbations liées aux reflets.
- DJI Mavic 3 Pro : utilisé après une panne technique survenue lors de la troisième sortie. Ce drone est également équipé d'un système VTOL et de trois capteurs :
 - Une caméra Hasselblad grand-angle (capteur CMOS 4/3, 20 MP, ouverture variable f/2.8 à f/11), capable d'enregistrer en 5.1K.
 - Un téléobjectif intermédiaire (capteur CMOS 1/1.3", 48 MP, focale équivalente 70 mm).
 - Un téléobjectif longue portée (capteur CMOS 1/2", 12 MP, focale 166 mm), permettant un zoom hybride jusqu'à x28.

Les drones étaient stabilisés par GNSS multi-constellations (GPS, Galileo, BeiDou) et permettaient un vol stationnaire précis. L'autonomie maximale de vol atteignait environ 37 à 38 minutes par batterie, et l'équipement total de neuf batteries assurait une capacité de vol cumulée avoisinant les 4 heures par sortie, sous réserve de conditions météorologiques favorables.

Conformément aux recommandations de la littérature (Fiori *et al.*, 2017 ; Fettermann *et al.*, 2019 ; Smith *et al.*, 2016), les vols étaient réalisés à une altitude de 120 mètres afin de limiter l'impact sonore et visuel du drone sur le comportement des dauphins. L'ensemble des vidéos, photos et trajectoires de vol était enregistré systématiquement. Un retour vidéo en temps réel permettait d'observer directement les groupes de dauphins depuis une tablette, tout en facilitant les analyses comportementales ultérieures.

Le navire pour réaliser les relevés par drone, loué pour l'étude, servait de plateforme d'opérations pour les vols de drone. Il était positionné entre 400 et 800 mètres des dauphins, permettant ainsi des décollages et atterrissages sécurisés selon les conditions de mer et de vent. Le drone ayant une portée de 1000 mètres depuis le point de décollage.

Des points GPS (pinpoint) au-dessus du groupe de dauphin étaient enregistrés toutes les trois minutes, permettant un suivi géoréférencé des déplacements des groupes. À chaque point de suivi, une observation comportementale était réalisée depuis le drone, à la fois en temps réel via la retransmission vidéo et en post-traitement lors de l'analyse fine des enregistrements.

2.3. Analyses des données

L'ensemble des données ont été visualisées et traitées sur le logiciel R Studio (version 4.3.1). Les enregistrements vidéos prient par UAV ont été analysé sur le logiciel VLC media player.

2.3.1. Concordance des deux méthodes d'observation

Afin d'évaluer la concordance entre les deux méthodes d'observation, depuis un navire (FF) et par drone (UAV), sur deux indicateurs clés, à savoir le nombre de navires observés autour des groupes de dauphins et le nombre d'individus présents dans ces groupes, une analyse statistique de type Bland–Altman a été réalisé. Cette méthode permet de comparer les deux techniques de mesure quantitatives en déterminant l'existence d'un biais systématique et la dispersion des différences entre les mesures appariées.

Pour chaque paire d'observations appariées, la moyenne des mesures ($Moyenne_i = (X_i + Y_i) / 2$) et la différence des mesures ($Différence_i = X_i - Y_i$) ont été calculé, où X_i est la valeur observée depuis un navire et Y_i la valeur observée par drone. Ces calculs ont été appliqués séparément aux deux indicateurs étudiés : le nombre de navires autour des groupes de dauphins et le nombre d'individus dans les groupes.

À partir des différences calculées pour chaque paire, la moyenne des différences a été estimé, qui représente le biais moyen entre les méthodes, et l'écart-type des différences. Ces valeurs permettent de caractériser l'écart moyen ainsi que la dispersion autour de ce biais. Pour visualiser l'accord entre les deux méthodes, des graphiques de Bland–Altman ont été réalisés.

Pour compléter cette analyse, et tester formellement l'hypothèse d'absence de biais systématique, des tests non paramétriques de Wilcoxon pour échantillons appariés, adaptés aux données pouvant ne pas suivre une distribution normale, ont été réalisés.

Les hypothèses testées sont pour le nombre de navires et pour le nombre d'individus sont $H_0 = \text{médiane}_{FF} = \text{médiane}_{UAV}$. Un rejet de H_0 indique un biais systématique significatif entre les méthodes. Les p-values associées à ces tests ont été reportées pour chaque indicateur afin d'interpréter la significativité statistique du biais potentiel.

2.3.2. Analyse qualitative entre les deux méthodes

Pour évaluer l'accord qualitatif entre les méthodes d'observation depuis un navire et par drone sur des variables catégorielles, des matrices de confusion ont été construites et le coefficient de Kappa de Cohen a été calculé. Ces analyses permettent d'estimer si les deux méthodes attribuent des classifications similaires à une même situation.

Pour chaque paire d'observations appariées, une matrice de confusion $M = (m_{ij})$ a été générée, où m_{ij} représente le nombre de cas où la méthode depuis un navire a observé la classe i et la méthode par drone la classe j . Ces matrices permettent de visualiser les cas de concordance et de divergence entre les deux méthodes.

Le Kappa de Cohen (κ) a été calculé pour chaque matrice, afin de quantifier l'accord entre les méthodes en tenant compte de l'accord attendu par hasard :

$$\kappa = \frac{P_o - P_e}{1 - P_e} \text{ où } P_o \text{ est la proportion d'accord observée et } P_e \text{ est la proportion d'accord attendue par hasard.}$$

3. Résultats

Les suivis réalisés par UAV ont été comparé avec les données récoltées le même jour par la méthode de « focal follow » depuis un navire. En comparant les résultats généraux recueillis par les deux méthodes, on peut observer des discordances dans les résultats pris en suivi focalisé de groupe par rapport au suivi par UAV (figure 2).

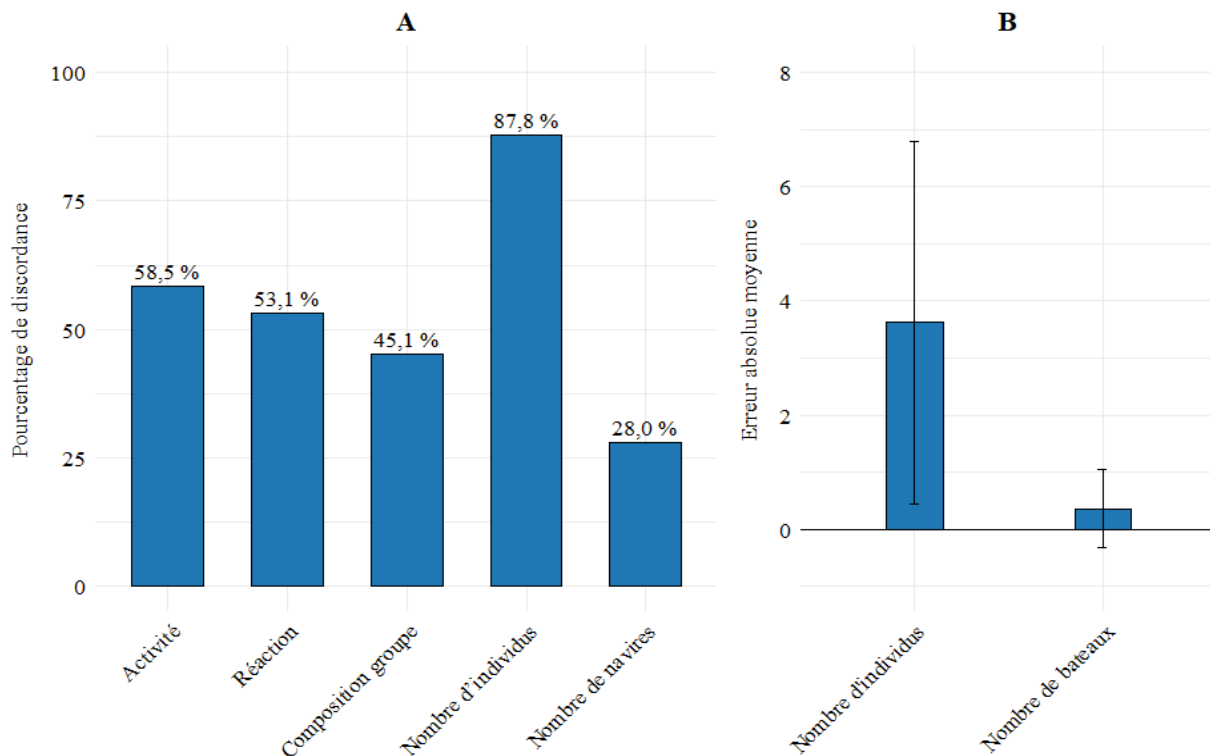


Figure 2: (A) Pourcentage de discordance par variable entre le suivi focalisé de groupe et le suivi par UAV des grands-dauphins de l'Indo-Pacifique. (B) Erreur moyenne absolue ($\pm$ écart-type) pour le nombre d'individus et de bateaux entre le suivi focalisé de groupe et le suivi par UAV.

En analysant les relevés pris depuis un navire avec les images prises par UAV au même moment, on peut constater que dans plus de la moitié des cas, les activités (58,5%) et réactions (53,1%) comportementales des dauphins relevé depuis un navire n'étaient pas similaires (figure 17).

Dans 45,1 % des cas, on observe une discordance de la composition des groupes de dauphins, ce qui peut être dû à la forte discordance du nombre d'individus.

Dans 87,8 % des cas, le nombre d'individus dénombré depuis un navire ne correspond pas à la réalité observée par UAV. En moyenne, une erreur absolue de 3,6 individus est observée en suivi focalisé de groupe depuis un navire (figure 17). Le diagramme de Bland-Altman (figure 3) montre un biais moyen de -1,2 individus, indiquant que le drone a tendance à observer des effectifs légèrement supérieurs à ceux relevés depuis un navire. Les limites d'accord à 95 % sont relativement larges, s'étendant de -10,4 à +8,0 individus, traduisant une variabilité importante des écarts entre les deux méthodes, particulièrement marquée pour les groupes de grande taille. Ce biais est confirmé par le test de Wilcoxon qui révèle une différence significative entre les deux méthodes ($p = 0,0216$).

Dans 28 % des cas, on observe une discordance dans le nombre de navires observé mais la moyenne absolue d'erreur est tout de même faible (0,4) (figure 17). Le biais moyen est proche de zéro (+ 0,15 navire), avec des limites d'accord beaucoup plus resserrées (de -1,33 à +1,62 navires), suggérant une bonne concordance entre les deux approches pour l'estimation du nombre de navires dans la zone d'observation (figure 4). Toutefois, le test de Wilcoxon indique également une différence

significative ($p = 0,0388$), suggérant l'existence d'écarts systématiques légers mais statistiquement détectables. Cela montre une sous-estimation du nombre de navires présent avec le drone.

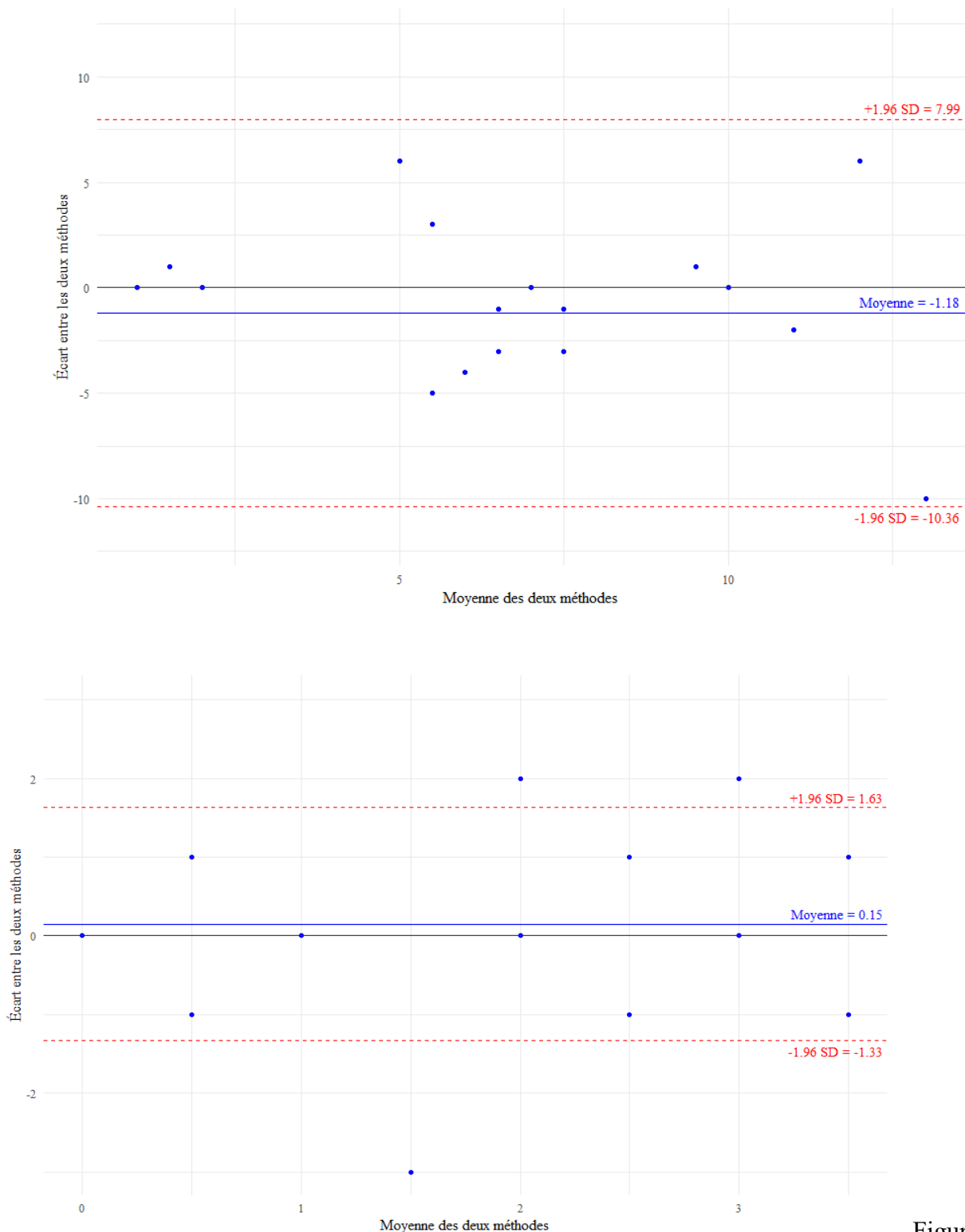


Figure 4:

Analyse de Bland–Altman des différences entre le nombre de navires observés dans la zone d'observation des T.aduncus par suivi focal depuis un navire et par drone. La ligne rouge représente la moyenne des différences (biais), les lignes pointillées grises indiquent les limites d'accord à 95 % (moyenne $\pm 1,96$ SD).

Des analyses plus précises sur les activités comportementales (figure 5) et les compositions des groupes (figure 6) sont réalisées pour mieux comprendre ces chiffres et voir les points de discordances.

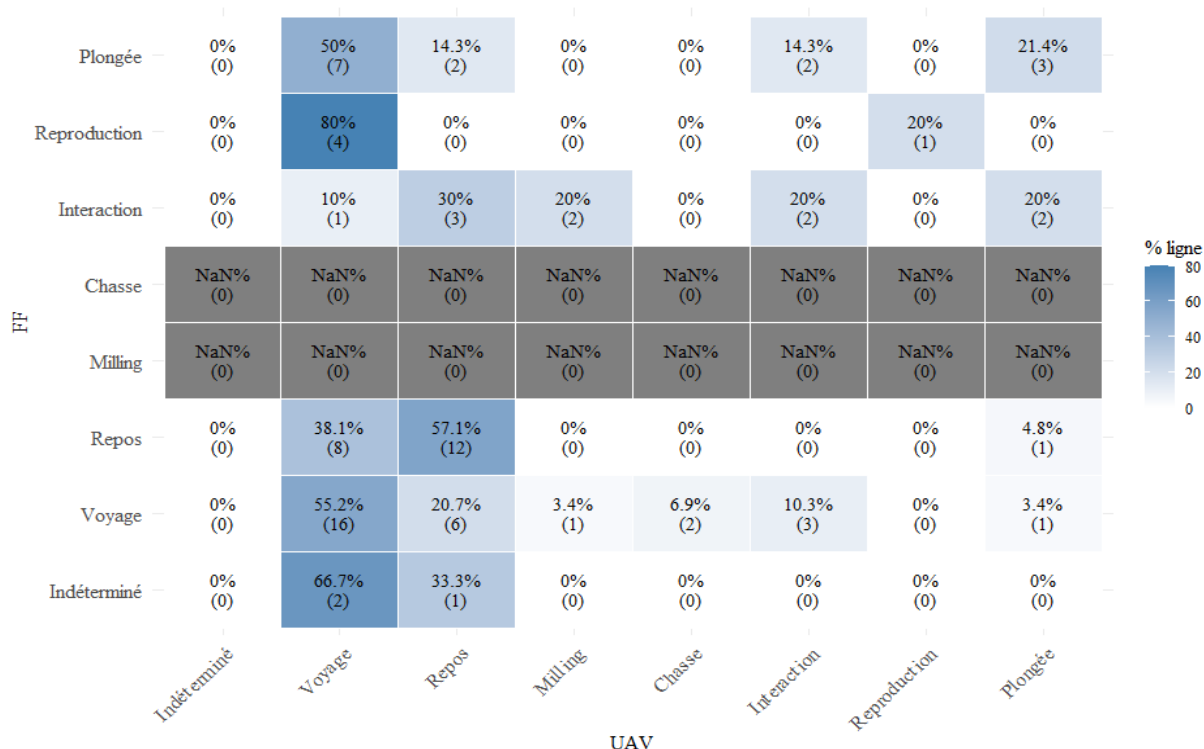


Figure 5: Matrice de confusion illustrant la concordance entre les catégories d'activités comportementales des *T.aduncus* observées par drone (UAV) et par suivi focalisé depuis un navire (FF). Les cellules contiennent les pourcentages relatifs par rapport aux observations du FF, suivis entre parenthèses des occurrences.

Grâce à la figure 5, on peut observer que certains comportements identifiés comme plongée avec le suivi depuis un navire ont été identifiés comme des comportements de voyage (50 %), de repos (14,3 %) ou d'interaction (14,3 %) avec le drone. Le comportement de plongée fut identifié par le drone ne représente que 21,4 % des cas.

Le drone a permis de lever l'ambiguïté sur certains comportements notés comme indéterminés lors des observations depuis un navire. Sur les quatre sorties réalisées avec le drone, pour trois relevés nous avons pu préciser ces incertitudes grâce aux images drones : les individus étaient en voyage (66,7 %) ou en repos (33,3 %) (figure 5).

La Figure 5 met tout de même en évidence la bonne concordance entre les observations depuis un navire et UAV pour certains comportements, notamment le repos et le voyage. Lorsqu'un comportement a été identifié comme « repos » par suivi focalisé, il a été confirmé par le drone dans 57,1 % des cas, tandis que 38,1 % ont été interprétés comme « voyage ». Inversement, lorsqu'un comportement était catégorisé comme « voyage » depuis un navire, le drone l'a confirmé dans 55,2 % des cas, tandis que 20,7 % ont été interprétés comme « repos ».

On peut noter qu'aucun comportement de chasse ou de milling n'ont été détecté avec le suivi depuis le navire alors que ceux-ci ont été identifiés respectivement 2 et 3 fois avec le drone (figure 5). Pour le comportement de milling, celui-ci fut identifié depuis un navire comme du voyage ou de l'interaction (figure 5). Le comportement de chasse identifié par drone, quant à lui, a été identifié comme voyage par l'observation depuis le navire.

L'observation depuis le navire a conduit à classer 5 occurrences comme étant des comportements de reproduction, alors que l'analyse par drone a montré que, dans 4 de ces cas, les dauphins étaient en réalité en voyage (figure 5).

Enfin, les comportements d'interaction sociale présentent une faible concordance entre les deux méthodes d'observation, avec seulement 20 % de recoupement entre le drone (UAV) et le suivi depuis un navire (FF).

L'évaluation de la concordance entre les deux méthodes d'observation montre un accord faible. Le coefficient de Kappa calculé pour l'activité est de 0.204, ce qui correspond, selon l'échelle de Landis et Koch, à un accord faible (entre 0.00 et 0.20). Ce faible niveau de concordance suggère que les deux méthodes aboutissent fréquemment à des classifications divergentes des comportements, en particulier pour certaines catégories d'activités comportementales.

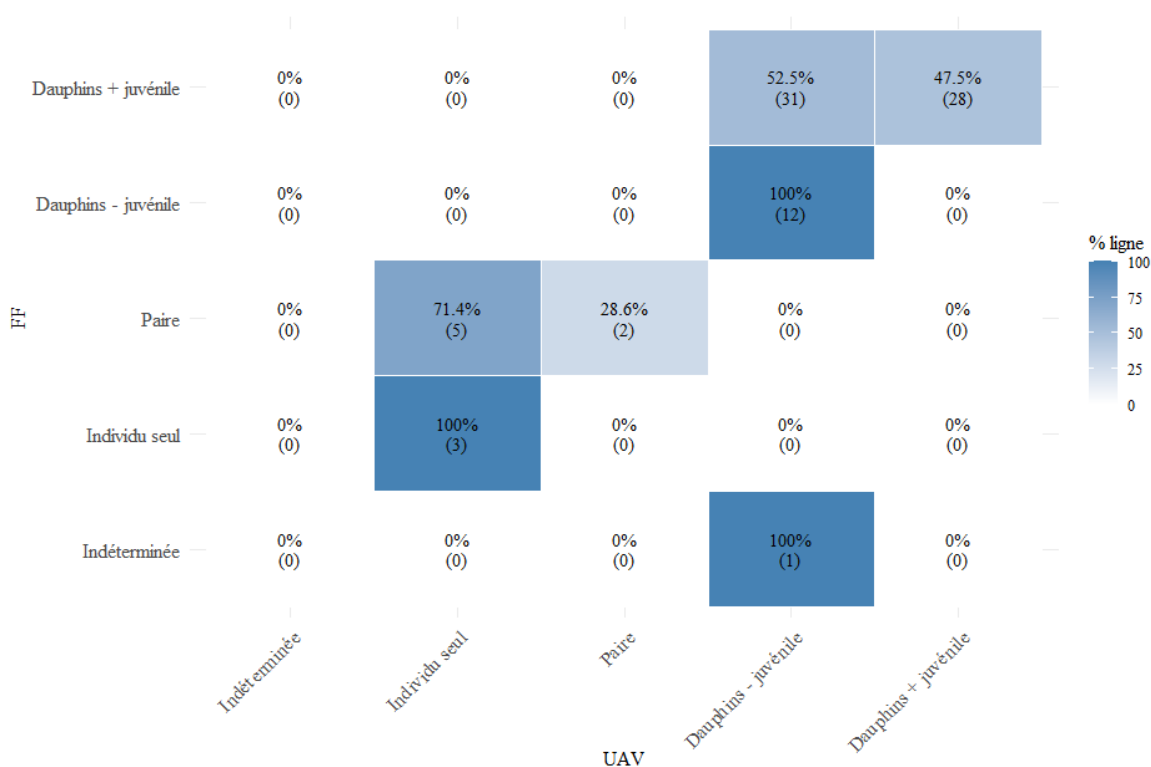


Figure 6:

Matrice de confusion représentant la comparaison des compositions de groupe des *T. aduncus* identifiées par drone (UAV) et par suivi focalisé (FF). Les cellules contiennent les pourcentages relatifs par rapport aux observations du FF, suivis entre parenthèses des occurrences.

La Figure 6 met en évidence des divergences notables entre les compositions de groupes observées par suivi focalisé depuis un navire (FF) et celles identifiées par drone (UAV). Si l'on observe une forte concordance pour certaines catégories, comme les individus seuls et les groupes de dauphins sans juvéniles (100 % de correspondance), d'autres catégories, en particulier les paires, révèlent de gros écart entre les deux méthodes. Dans 71,4 % des cas, des groupes identifiés comme paires depuis le navire ont été identifiés comme un seul individu par le drone (figure 6).

Des discordances apparaissent régulièrement dans les cas où des juvéniles sont supposés présents. Les observations par drone révèlent que 52,5 % des cas ont été classés comme « dauphins + juvénile » alors que ces groupes ne comportaient pas de juvéniles.

Il est à noter que dans les cas où la composition du groupe n'a pas pu être déterminée depuis le navire, le recours au drone a permis de l'identifier (figure 6).

Le coefficient de Kappa obtenu est de 0.327, indiquant un accord modéré entre les observations réalisées par bateau et par drone. Ce résultat met en évidence des divergences persistantes.

Une comparaison attentive entre les données collectées par drone et celles issues des observations depuis un navire révèle un taux d'erreur d'interprétation comportementale de 24,4 % pour les activités comportementales, et de 18,2 % pour les réactions comportementales, lorsque les observations sont réalisées depuis un bateau.

Il est intéressant de noter qu'en comparant les points GPS du groupe de dauphins avec le point GPS du navire du CEDTM qui réalisait les suivis depuis un navire, nous avons constaté que le navire était en moyenne à une distance de 252,37 mètres des dauphins. Le navire qui réalise les observation depuis un navire n'est donc pas toujours à plus de 300 mètres des dauphins, pouvant amené un biais sur le comportement des dauphins.

L'utilisation du drone a permis d'observer et de préciser certains comportements des dauphins à l'approche de navires qui sont difficilement observables avec l'angle de vue permis depuis un navire. L'utilisation du drone a permis d'observer et de caractériser avec précision certains comportements des grands dauphins de l'Indo-Pacifique en réaction à l'approche de navires d'observation.

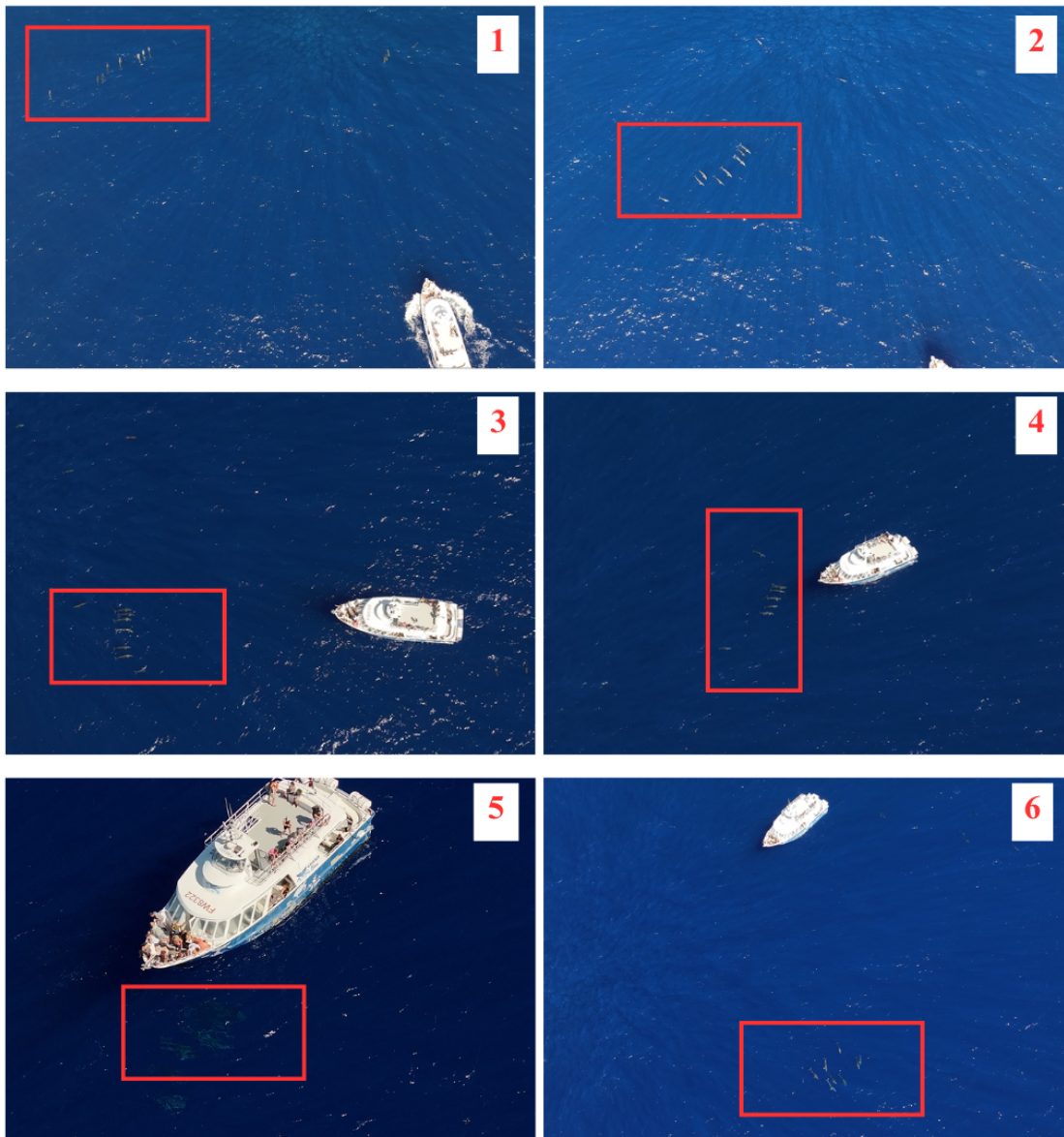


Figure 7: Séquence d'interactions entre un groupe de Grand-dauphin de l'Indo-Pacifique (*Tursiops aduncus*) et un navire d'observation, capturées par drone au large de Saint-Gilles les Bains (La Réunion).

Les images présentées en figure 7 illustrent une séquence comportementale observée à plusieurs reprises lors des suivis par drone des groupes de *T. aduncus* confrontés à l'arrivée de navires d'observation:

1. Le groupe est en voyage en direction opposée à un navire en approche rapide.
2. Les dauphins interrompent leur déplacement et se positionnent face au navire.
3. Le groupe se resserre et reste immobile à proximité du bateau qui se laisse dériver vers les dauphins.
4. Les individus s'approchent lentement de l'embarcation.
5. Les dauphins plongent et modifient leur trajectoire.
6. Le groupe s'éloigne collectivement du navire.

Il est important de noter que l'ensemble de cette séquence peut se produire en moins de trois minutes, ce qui complique son enregistrement en suivi focalisé avec un pas de temps défini. Certains comportements peuvent ainsi être mal interprétés depuis un navire. Dans le cas présenté en figure 16, le temps d'arrêt initial du groupe a duré environ 40 secondes, suivi d'une approche lente vers le navire

de 20 secondes, puis d'une plongée avec un changement de direction sur une durée d'environ une minute.

4. Discussion

4.1. Comparaison des méthodes de suivi comportementaux depuis un navire et par drone.

L'un des principaux écarts constatés entre les deux méthodes concerne l'estimation du nombre d'individus dans les groupes de dauphins. Nous avons constaté une différence significative entre les estimations du nombre d'individus faites depuis un navire et par drone. Les drones tendent à détecter davantage d'individus par rapport aux observations effectuées depuis un navire. Cela s'explique notamment par la vue aérienne dégagée, la possibilité de voir sous la surface et le recours au post-traitement des images, qui permet une vérification plus rigoureuse des observations. Depuis un navire, des individus qui restent en apnée sous la surface, les reflets du soleil et les vagues peuvent ne pas toujours rendre tous les individus observables.

Cette sous-estimation en suivi focalisé depuis un navire peut entraîner des erreurs d'interprétation comportementale. En effet, dans notre protocole, un changement de comportement est considéré lorsqu'au moins 50 % du groupe adopte un nouveau comportement (Altman, 1974 ; Mann, 1999). Or, si le nombre total d'individus est sous-estimé, il est possible qu'un comportement minoritaire soit interprété à tort comme majoritaire. Ainsi, dans plusieurs cas, un comportement visible chez quelques individus en surface a été classé comme comportement global du groupe, alors que le drone révélait qu'une majorité du groupe était immergée, adoptant un autre comportement. En surface, seuls les dauphins actifs sont souvent observés, ce qui peut conduire à une surestimation de comportements comme les interactions sociales ou reproductives. Cette divergence d'interprétation n'est donc pas une véritable erreur, mais plutôt une limitation structurelle du champ de vision depuis le navire. Ce qui a mené à plusieurs reprises à des discordances dans l'interprétation des activités comportementales entre les observations par drone et depuis un navire.

On a estimé ainsi que 29,3 % des comportements et 18,2 % des réactions comportementales ont été mal identifiés lors des observations en mer. Cela peut s'expliquer d'une part par un biais observateur puisque ne sont pas les mêmes personnes qu'habituellement qui ont pris les données depuis un navire, ces personnes étant sur le bateau avec le prestataire drone. L'expérience l'observateur joue sur l'interprétation des comportements. Mais au-delà de ce biais, ces résultats mettent en avant l'intérêt du drone comme un outil complémentaire aux relevés classique pour garantir l'exactitude des données comportementales.

L'angle de vue horizontal depuis un navire peut entraîner des illusions perceptuelles, notamment sur les distances entre individus. Deux dauphins peuvent sembler proches depuis un bateau, mais en réalité être trop éloignés pour constituer une paire selon les critères comportementaux. Le drone, grâce à son angle de vue vertical, corrige ce biais en apportant une estimation plus fiable de la distance entre individus.

Depuis le navire de recherche, qui se situe au-delà de 300 mètres de distance pour ne pas avoir un impact sur les dauphins, certains comportements ou détails (comme un poisson dans la bouche d'un dauphin) peuvent ne pas être perceptible, réduisant ainsi la précision comportementale.

Concernant la détection des navires présents dans la zone d'observation des animaux, une différence significative entre les méthodes a été observée. Contrairement au nombre d'individus, ce sont cette fois les observateurs à bord du navire qui tendent à rapporter plus de navires que les drones. Cela peut s'expliquer par une meilleure visibilité de l'horizon depuis le bateau et un biais de focalisation du drone sur le groupe de dauphin pouvant ainsi omettre des navires plus éloignés ou en périphérie. L'expertise des observateurs avec une observation depuis un navire permet de mieux

observer l'approche des navires dans la zone des 300 mètres autour des dauphins même si des illusions perceptuelles sont possibles.

Le drone permet également une meilleure évaluation des classes d'âge, notamment pour distinguer les juvéniles des subadultes. En effet, selon Van Aswegen et *al.* (2019), les dauphins de plus de 150 cm ne sont plus considérés comme juvéniles, même s'ils restent proches de leur mère. Or, avec les observations depuis un bateau, un dauphin de taille légèrement inférieure suivant un adulte a souvent été classé à tort comme juvénile. Le regard aérien du drone permet une évaluation plus fine des tailles relatives et donc une classification plus rigoureuse des individus.

Ainsi, les deux méthodes sont complémentaires : le drone permet une vue globale verticale et précise des groupes de cétacés et de leurs comportements, tandis que l'observation en mer offre une vision large de la zone, utile pour détecter l'environnement général, dont les navires.

4.2. Avantages des drones

Au-delà de la précision des observations, les drones offrent plusieurs avantages notables. Ils permettent la mesure précise du nombre de respirations, du temps d'apnée et de la fréquence des réorientations. Permettant de préciser les perturbations causées par les navires envers les cétacés.

Les distances entre les dauphins et les navires peuvent être calculées lorsque cela est possible (navire présent dans l'angle de vue de la caméra lorsque celle-ci est parfaitement à l'horizontale). Cependant, l'arrivée sur le marché de drones équipés directement de télémètres (comme le DJI Matrice 4T) ouvre des perspectives pour le suivi réglementaire et le signalement d'infractions aux autorités.

Les vidéos aériennes permettent de réanalyser les comportements ultérieurement et d'ainsi préciser les observations. Ces vidéos offrent également une preuve visuelle en cas de pratiques inappropriées ou de comportements illégaux vis-à-vis des cétacés.

Nous avons pu également voir que les caméras thermiques offrent un avantage dans la recherche des dauphins immergés, en visualisant leur retour à la surface pour respirer. Ce qui est un atout précieux en cas de perte visuelle (annexe 1).

4.3. Limites des drones

Malgré ces avantages, plusieurs limites techniques sont à souligner tel que l'autonomie des batteries. Bien que les drones affichent une autonomie théorique d'environ 35 minutes, le temps réel d'observation est souvent limité à 15–20 minutes, en tenant compte du temps de décollage, d'atterrissage, de recherche des animaux et des conditions de vol. De plus, il faut prendre en compte le temps de remplacement des batteries (5 à 10 minutes) qui peut entraîner la perte de contact avec les animaux et également une perte de suivi.

Le besoin de multiples batteries et le coût associé représentent un frein à une utilisation fréquente par des petites structures. De plus, les coûts liés à la formation du télé-pilote (minimum 2000€ en France), à l'assurance (200€/an minimum) et au matériel (3000€ minimum pour un drone professionnel avec une batterie) restent élevés. En France, un prestataire drone facture généralement entre 350 € et 1500 € la journée en fonction de la spécificité des relevés réalisés. La balance entre équiper la structure et faire appel à un prestataire est à faire en fonction des besoins réguliers ou non d'un drone.

La hauteur de vol réglementaire européenne est limitée à 120 mètres d'altitude (règlement d'exécution (UE) 2019/947) (Commission européenne, 2019), réduisant le champ de vision vertical et peut rendre difficile le suivi de grands groupes de dauphins épars, comme les dauphins long bec (*Stenella longirostris*), qui se dispersent rapidement. À cette altitude, il devient compliqué de suivre plusieurs sous-groupes ou d'estimer la présence de navires dans toute la zone des 300 mètres d'observation. Ce qui représente une perte d'informations pour le suivi simultané des comportements des navires et des dauphins. Pour avoir toutes les informations, l'angle de la caméra doit parfois être

incliné pour capturer l'ensemble de la scène, ce qui déforme la perception des distances si aucun télémètre n'est utilisé. De plus, des zones sont également interdites de survols par drones (zones militaires, couloirs aériens bas, réserves marines), ce qui peut limiter un suivi précis des animaux lorsqu'ils se retrouvent dans ces zones.

La portée des drones représente également une contrainte technique. Ceux utilisés dans le cadre de notre étude avaient une autonomie de vol limitée à 1 000 mètres depuis leur point de décollage. Si cette restriction reste relativement peu contraignante lors d'un lancement depuis un navire, en raison de la mobilité de celui-ci, elle devient plus problématique dans le cas de décollages depuis la terre ferme, où les zones d'observation sont alors fortement limitées.

5. Conclusion

Dans un contexte de pression touristique croissante sur les cétacés à La Réunion, et face aux enjeux de conservation, cette étude a permis de comparer de manière rigoureuse deux méthodes de suivi de l'activité de whale-watching avec l'observation depuis un navire et l'usage de drones.

Les résultats mettent en évidence des différences significatives dans l'interprétation des comportements, le dénombrement des individus et la caractérisation des classes d'âge. Le drone s'est révélé plus précis pour détecter les individus immergés et pour analyser les comportements à faible visibilité depuis un navire. Il a également permis une réanalyse rigoureuse grâce aux enregistrements vidéo et ouvre des perspectives intéressantes en matière de contrôle réglementaire, notamment avec l'arrivée de technologies embarquées comme les télémètres ou les caméras thermiques.

Toutefois, le drone présente encore plusieurs contraintes techniques et logistiques (autonomie, réglementation, coûts), qui en limitent l'usage systématique par les structures locales. De plus, il ne remplace pas totalement la vision d'ensemble qu'offre un observateur expérimenté à bord d'un navire, notamment pour évaluer le contexte environnemental global, y compris la présence et l'approche des autres navires dans la zone d'observation.

Au final, cette étude souligne que les deux méthodes sont complémentaires : leur association permet de fiabiliser les protocoles de suivi comportemental, de réduire les biais d'interprétation, et d'améliorer la qualité des données produites dans le cadre du suivi de l'activité de whale-watching.

Dans cette optique, l'intégration progressive des drones dans les protocoles de suivi menés par des structures comme le CEDTM pourrait renforcer la qualité scientifique des observations tout en apportant un appui concret aux politiques publiques de régulation. Ce type de méthodologie mixte représente une voie prometteuse pour concilier tourisme d'observation, sensibilisation du public et protection effective des cétacés, en particulier dans les zones sensibles comme les eaux côtières de La Réunion.

6. Bibliographie

Altmann, J. (1974). Observational study of behavior— Sampling methods. *Behaviour*, 49(3–4), 227–267. doi: <https://doi.org/10.1163/156853974X00534>

Bearzi, G., Notarbartolo-DI-Sciara, G., & Politi, E. (1997). Social ecology of bottlenose dolphins in the Kvarneric (Northern Adriatic sea). *Marine Mammal Science*, 13(4), 650-668. <https://doi.org/10.1111/j.1748-7692.1997.tb00089.x>

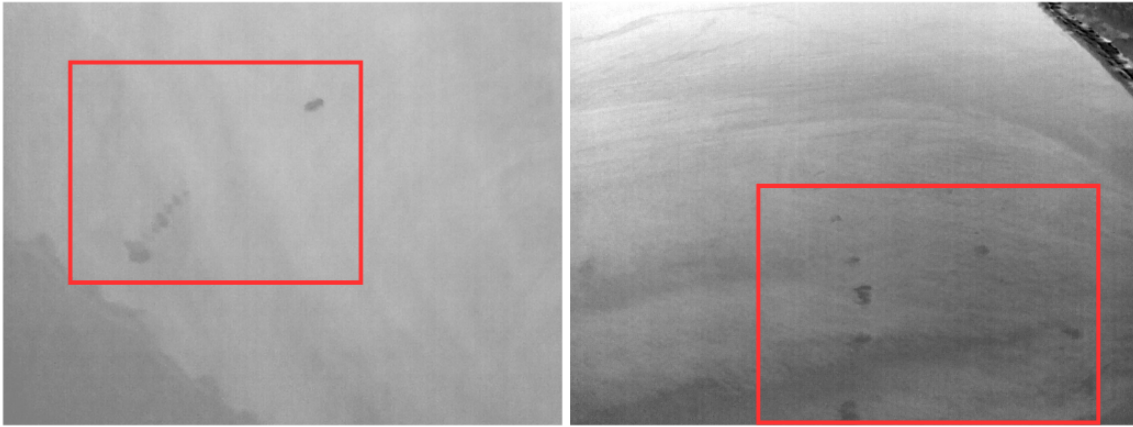
Bejder, L., Samuels, A., Whitehead, H., & Gales, N. (2006). Interpreting short-term behavioural responses to disturbance within a longitudinal perspective. *Animal Behaviour*, 72(5), 1149-1158. <https://doi.org/10.1016/j.anbehav.2006.04.003>

Chazot, J., Hoarau, L., Carzon, P., Wagner, J., Sorby, S., Ratel, M., & Barcelo, A. (2020). Recommendations for Sustainable Cetacean-Based Tourism in French Territories : A Review on the

- Industry and Current Management Actions. *Tourism In Marine Environments*, 15(3), 211-235. <https://doi.org/10.3727/154427320x15943351217984>
- Christiansen, F., Lusseau, D., Stensland, E., & Berggren, P. (2010). Effects of tourist boats on the behaviour of Indo-Pacific bottlenose dolphins off the south coast of Zanzibar. *Endangered Species Research*, 11, 91-99. <https://doi.org/10.3354/esr00265>
- Commission européenne. (2019). Règlement d'exécution (UE) 2019/947 de la Commission du 24 mai 2019 concernant les règles et procédures applicables à l'exploitation d'aéronefs sans équipage à bord. *Journal officiel de l'Union européenne*, L 152, 45–71.
- Condet, M., & Dulau-Drouot, V. (2016). Habitat selection of two island-associated dolphin species from the south-west Indian Ocean. *Continental Shelf Research*, 125, 18-27. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2016.06.010>
- Cottarel G., Dulau V., Mouysset L., Martin J., Philippe J.-S. (2018) Plan Directeur de conservation en faveur des populations de dauphins fréquentant les eaux côtières réunionnaises (2018-2023). Ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie, Direction de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement de La Réunion. GLOBICE, BIOTOPE, 20 pages.
- Dulau-Drouot, V., Boucaud, V., & Rota, B. (2008). Cetacean diversity off La Réunion Island (France). *Journal Of The Marine Biological Association Of The United Kingdom*, 88(6), 1263-1272. <https://doi.org/10.1017/s0025315408001069>
- Fettermann, T., Fiori, L., Gillman, L., Stockin, K.A., Bollard, B. (2022). Drone Surveys Are More Accurate Than Boat-Based Surveys of Bottlenose Dolphins (*Tursiops truncatus*). *Drones* 6, 82. <https://doi.org/10.3390/drones6040082>.
- Fiori, L., Doshi, A., Martinez, E., Orams, M. B., & Bollard-Breen, B. (2017). The Use of Unmanned Aerial Systems in Marine Mammal Research. *Remote Sensing*, 9(6), 543. <https://doi.org/10.3390/rs9060543>
- Fiori, L., Martinez, E., Bader, M. K., Orams, M. B., & Bollard, B. (2019). Insights into the use of an unmanned aerial vehicle (UAV) to investigate the behavior of humpback whales (*Megaptera novaeangliae*) in Vava'u, Kingdom of Tonga. *Marine Mammal Science*, 36(1), 209-223. <https://doi.org/10.1111/mms.12637>
- Fisseau C., Delaspre S., Landes A-E. (2023). Activité d'observation des cétacés à La Réunion : Bilan de la saison des baleines 2023. 67p.
- Howland, H. C. (1974b). Optimal strategies for predator avoidance : The relative importance of speed and manoeuvrability. *Journal Of Theoretical Biology*, 47(2), 333-350. [https://doi.org/10.1016/0022-5193\(74\)90202-1](https://doi.org/10.1016/0022-5193(74)90202-1)
- Hoyt, E., & Parsons, E. (2014). The whale-watching industry : Historical development. From Whale-watching: Sustainable Tourism and Ecological Management, edited by J. Higham, L. Bejder and R. Williams. Published by Cambridge University Press.(p. 57-70). <https://doi.org/10.1017/cbo9781139018166.006>
- Kassamali-Fox, A., Christiansen, F., May-Collado, L. J., Ramos, E. A., & Kaplin, B. A. (2020). Tour boats affect the activity patterns of bottlenose dolphins (*Tursiops truncatus*) in Bocas del Toro, Panama. *PeerJ*, 8, e8804. <https://doi.org/10.7717/peerj.8804>
- Lo, C. F., Nollens, H. H., Nollens, B. A., Sears, M., Hanson, M. B., Weiss, M. N., Sheppard, J., Welch, C., Friel, R., & Gaydos, J. K. (2024). Behavioral responses of Bigg's and Southern Resident killer whales (*Orcinus orca*) to uncrewed aerial vehicle-based breath sample collection. *Marine Mammal Science*. <https://doi.org/10.1111/mms.13192>

- Lusseau, D., & Higham, J. (2003). Managing the impacts of dolphin-based tourism through the definition of critical habitats : the case of bottlenose dolphins (*Tursiops* spp.) in Doubtful Sound, New Zealand. *Tourism Management*, 25(6), 657-667. <https://doi.org/10.1016/j.tourman.2003.08.012>
- Mann, J. (1999). Behavioral sampling methods for cetaceans: A review and critique. *Marine Mammal Science*, 15(1), 102–122. <https://doi.org/10.1111/j.1748-7692.1999.tb00784.x>
- Mesnick, S. L., Ballance, L. T., Wade, P. R., Pryor, K., & Reeves, R. R. (2019). Oceanic Dolphin Societies : Diversity, Complexity, and Conservation. Dans *Ethology and behavioral ecology of marine mammals* (p. 183-209). https://doi.org/10.1007/978-3-030-16663-2_9
- O'Connor, S., Campbell, R., Cortez, H., & Knowles, T. (2009). Whale Watching Worldwide: tourism numbers, expenditures and expanding economic benefits, a special report from the International Fund for Animal Welfare, Yarmouth MA, USA, prepared by Economists at Large.
- Quintana Martín-Montalvo, B., Hoarau, L., Deffes, O., Delaspre, S., Delfour, F., & Landes, A. (2021). Dolphin Watching and Compliance to Guidelines Affect Spinner Dolphins' (*Stenella longirostris*) Behaviour in Reunion Island. *Animals*, 11(9), 2674. <https://doi.org/10.3390/ani11092674>
- Shane, S. H. (1990). Behavior and Ecology of the Bottlenose Dolphin at Sanibel Island, Florida. Dans *Elsevier eBooks* (p. 245-265). <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-440280-5.50016-0>
- Smith, C. E., Sykora-Bodie, S. T., Bloodworth, B., Pack, S. M., Spradlin, T. R., & LeBoeuf, N. R. (2016). Assessment of known impacts of unmanned aerial systems (UAS) on marine mammals : data gaps and recommendations for researchers in the United States. *Journal Of Unmanned Vehicle Systems*, 4(1), 31-44. <https://doi.org/10.1139/juvs-2015-0017>
- Van Aswegen, M., Christiansen, F., Symons, J., Mann, J., Nicholson, K., Sprogis, K., & Bejder, L. (2019). Morphological differences between coastal bottlenose dolphin (*Tursiops aduncus*) populations identified using non-invasive stereo-laser photogrammetry. *Scientific Reports*, 9(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-019-48419-3>

7. Annexes



Annexe 1:

Traces thermiques des grands dauphins de l'Indo-Pacifique observées avec la caméra thermique du drone *DJI Mavic 3T Enterprise Thermal*.