Juin 2017

Synthèse des études sur les dynamiques de distribution des baleines à bosse dans le sud de la Nouvelle-Calédonie.

DANS LE CADRE DU PROJET WHERE : HUMPBACK WHALE HABITAT EXPLORATIONTO IMPROVE SPATIAL MANAGEMENTIN THE CORAL SEA.

SOLÈNE DERVILLE ET CLAIRE GARRIGUE

Rapport réalisé pour le

Opération Cétacés, B.P. 12827 98802 Nouméa, Nouvelle-Calédonie
Tél : 24 16 34, courriel : op.cetaces@lagoon.nc
www.operationcetaces.nc
Ridet : 476804 001

L'étude réalisée par Colin Curtil dans le cadre de son Master 2 a été partiellement intégrée dans ce rapport

Référence à citer : *Derville S. et Garrigue C. 2017. Synthèse des études sur les dynamiques de distribution des baleines à bosse dans le Grand Lagon Sud de la Nouvelle-Calédonie. Rapport non publié pour le CCCE, Vale. 67p*

SOMMAIRE

SOMMAIRE 2
LISTE DES TABLES 4
LISTE DES FIGURES 4
RESUME 8
INTRODUCTION 10
CONTEXTE DE L'ÉTUDE 10
OBJECTIFS DE L'ÉTUDE 12
STRUCTURE DU RAPPORT 12
1 METHODE DE COLLECTE DES DONNEES 14
1.1 ZONE ET PÉRIODE D'ÉTUDE 14
1.2 PROTOCOLE D'ÉCHANTILLONNAGE DEPUIS LA TERRE 15
1.2.1 DÉTECTION ET SUIVI DES ANIMAUX 15
1.2.2 TECHNIQUES DE LOCALISATION GÉOGRAPHIQUE 15
1.2.3 DONNÉES COLLECTÉES 16
1.2.4 ESTIMATION DE L'EFFORT DE RECHERCHE DEPUIS LA TERRE 16
1.3 PROTOCOLE D'ÉCHANTILLONNAGE EN MER 17
1.3.1 DÉTECTION ET SUIVI DES ANIMAUX 17
1.3.2 DONNÉES COLLECTÉES 18
1.3.3 ESTIMATION DE L'EFFORT DE RECHERCHE EN MER 18
1.4 DONNÉES ENVIRONNEMENTALES 19
1.4.1 DONNÉES TOPOGRAPHIQUES 19
1.4.2 DONNÉES DE TEMPÉRATURE ET DE VENT 21
1.5 OUTILS D'ANALYSE 21
2 LA DISTRIBUTION SPATIO-TEMPORELLE 22
2.1 TRAITEMENT DES DONNÉES 22
2.1.1 ÉTUDE DE LA RÉPARTITION SPATIALE 22
2.1.2 ÉTUDE DE LA PHÉNOLOGIE 23
2.2 RÉSULTATS 24
2.2.1 RÉPARTITION SPATIALE 24
2.2.2 ÉTUDE DE LA PHÉNOLOGIE 28
2.3 CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES 29
3 LA SELECTION DE L'HABITAT 30
3.1 TRAITEMENT DES DONNÉES 30
3.1.1 CARTES ANNUELLES D'INTENSITÉ D'EFFORT 30
3.1.2 GÉNÉRATION DE « POINTS DE CONTRÔLE » 30
3.1.3 MODÈLES DE NICHE ÉCOLOGIQUE 31
3.2 RÉSULTATS 32
3.3 CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES 33

4 L'EFFET DES VARIATIONS CLIMATIQUES 34
4.1 TRAITEMENT DES DONNÉES 34
4.1.1 CARACTÉRISATION DES FLUCTUATIONS ENVIRONNEMENTALES DANS LE GRAND LAGON SUD 34
4.1.2 EFFET DES FLUCTUATIONS ANNUELLES SUR LA DISTRIBUTION SPATIALE 34
4.1.3 EFFET DES FLUCTUATIONS JOURNALIÈRES 35
4.2 RÉSULTATS 35
4.2.1 CARACTÉRISATION DES FLUCTUATIONS ENVIRONNEMENTALES 35
4.2.2 EFFET DES FLUCTUATIONS ANNUELLES SUR LA DISTRIBUTION SPATIALE 38
4.2.3 EFFET DES FLUCTUATIONS JOURNALIÈRES SUR LA FRÉQUENTATION 39
4.3 CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES 41
5 LA SÉGRÉGATION SOCIALE 43
5.1 TRAITEMENT DES DONNÉES 43
5.1.1 ÉTUDE DU COMPORTEMENT D'ÉVITEMENT ENTRE GROUPES SOCIAUX 44
5.1.2 ESTIMATION DE L'HABITAT OCCUPÉ 44
5.1.3 ESTIMATION DU MODÈLE DE SÉGRÉGATION SPATIALE 44
5.2 RÉSULTATS 45
5.2.1 INTERACTIONS ENTRE GROUPES 46
5.2.2 HABITATS UTILISÉS 47
5.2.3 SÉGRÉGATION SPATIALE 48
5.3 CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES 49
6 LES RISQUES ANTHROPIQUES 50
6.1 TRAITEMENT DES DONNÉES 50
6.1.1 EVOLUTION TEMPORELLE DU TRAFIC MARITIME 50
6.1.2 DISTRIBUTION GÉOGRAPHIQUE DU TRAFIC MARITIME 50
6.1.3 INTERACTIONS ENTRE TRAFIC MARITIME ET BALEINES À BOSSE 50
6.2 RÉSULTATS 51
6.3 CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES 54
7 SYNTHESE 56
8 REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES 58
9 ANNEXES 61
ESTIMATION DE LA RÉPARTITION ANNUELLE DES BALEINES À BOSSE DANS LE GRAND LAGON SUD ENTRE 1995 ET 2015 À PARTIR DES OBSERVATIONS EN MER ET DEPUIS LA TERRE. 61

LISTE DES TABLES

Table 1. Résumé de l'effort de rechercher en heure et en jour et du nombre de groupes de baleines à bosse observés par les équipes à terre et en mer par an. 24

Table 2. Nombre de points de présence et de contrôle utilisés dans la modélisation de la niche écologique des baleines à bosse du Grand Lagon Sud.Les points de présences correspondent aux groupes observés en mer et à ceux uniquement observés depuis la terre. 31

Table 3. Effort d'échantillonnage et nombre de groupes de baleines observés dans le Grand Lagon Sud par an (#G_{avecMP} = nombre de groupes incluant une maman-petit, #G_{sansMP} = nombre de groupes n'incluant pas de maman-petit). Nb: pas de recherche en mer en 2008.45

Table 4. Types de groupes sociaux observés dans le Grand Lagon Sud au cours de toutes les saisons de recherche conduites entre 1995 et 2015. Les pourcentages moyens sont donc calculés sur n=20 ans. 45

LISTE DES FIGURES

Figure 1. Zone d'étude du Grand Lagon Sud de la Nouvelle Calédonie. La terre apparait en noir, les récifs émergés en gris clair et les isobathes tous les 200m sous forme de lignes grises. Les repères bleus représentent la balise d'enregistrement de température de Goro ainsi que la position au Sud de l'îlot Ugo où la température mesurée par satellite a été extraite. 14

Figure 2. Grille de la zone d'étude du Grand Lagon Sud utilisée par l'équipe à terre pour localiser les groupes de baleines à la surface de l'eau. Chaque case a une taille de 1x1 mile nautique. 15

Figure 3. Modélisation de l'effort de recherche terrestre en se basant sur la distance au cap N'Doua. (A) forme de la fonction logistique utilisée pour modéliser l'évolution de l'intensité de l'effort en un point donné (axe des ordonnées) en fonction de la distance au cap (axe des abscisses). (B) Exemple de carte d'effort terrestre journalier. L'intensité de l'effort est représentée sur une échelle de couleur (effort de plus en plus intense du bleu vers le rouge). Les zones en pointillés sont masquées aux yeux des observateurs situés au cap N'Doua. La terre apparait en noir, les récifs émergés en gris et les isobathes tous les 200m en lignes grises. 17

Figure 4. Traces suivies par l'équipe en mer en 2012 (A) et carte de l'intensité de l'effort en mer pour cette même année (B).L'intensité de l'effort est comprise entre 0 (pas de couleur) et 100, et s'échelonne sur une palette de couleur du bleu au rouge. La terre apparait en noir, les récifs émergés en gris et les isobathes tous les 200m en lignes grises. ... 19

Figure 5. Rasters des variables topographiques utilisées pour caractériser l'habitat des baleines à bosse dans le Grand Lagon Sud.A noter que la rugosité est affichée sur une échelle de couleur transformée avec une racine carrée. La terre apparait en noir. 20

Figure 6. Position des groupes de baleines à bosse observés par l'équipe en mer (A) et uniquement observés par l'équipe à terre (B). La terre est représentée en noir, les récifs émergés en gris clair et les isobathes tous les 200m en lignes grises. 25

Figure 7. Estimation de la distribution spatiale moyenne des baleines à bosse dans le Grand Lagon Sud entre 1995 et 2015 à partir des observations en mer et à terre. La probabilité de présence est représentée sur une échelle du bleu (faible probabilité) au rouge (forte probabilité). Les zones non colorées sont considérées comme trop peu échantillonnées pour pouvoir y produire une estimation. Les deux contours noirs au sein de la zone d'estimation représentent les contours à 90% et 50% de probabilité de présence sur une échelle de 1 à 100. La zone la plus au centre correspond donc au cœur de la distribution moyenne des baleines à bosse. La terre est représentée en noir et les récifs émergés en gris. 26

Figure 8. Estimation de la répartition annuelle des baleines à bosse dans le Grand Lagon Sud entre 1995 et 2015 à partir des observations en mer et depuis la terre. La probabilité de présence est représentée sur une échelle du bleu (faible probabilité) au rouge (forte probabilité). Les zones non colorées sont considérées comme trop peu échantillonnées pour pouvoir y produire une estimation. Les deux contours noirs au sein de la zone d'estimation représentent les contours à 90% et 50% de probabilité de présence sur une échelle de 1 à 100. Les groupes de baleines à bosse observés en mer sont représentés par des cercles noirs de taille proportionnelle au nombre d'individus dans le groupe (de 1 à 10). Les groupes de baleines à bosse observés depuis la terre mais non observés en mer sont représentés par des triangles blancs. La terre est représentée en noir et les récifs émergés en gris. 27

Figure 9. Exemple de variations annuelles du taux de rencontre Tterre calculé à partir des données collectées à terre. Les courbes colorées représentent différentes méthodes de décomposition des séries temporelles (orange = GAM, vert = moyenne mobile, bleu = régression polynomiale).....28

Figure 10. Taux de rencontre pour *Tterre* depuis 1995, toutes années confondues. La courbe rouge représente le GAMM (Generalized Additive Mixed Model) utilisé pour caractériser les variations du taux de rencontre en fonction des variables jours et année. Une transformation logarithmique a été appliquée aux données afin de rendre le profil de la courbe plus visible. 29

Figure 11. Courbes de sélection de l'habitat par les baleines à bosse visitant le Grand Lagon Sud. Dans chacun des six panneaux, l'ordonnée représente la probabilité de présence des baleines à bosse (comprise entre 0 et 1) et l'abscisse représente une variable explicative du modèle. Les lignes continues représentent les prédictions moyennes obtenues sur les 1000 jeux de données générés (nb: ne pas prêter attention aux couleurs, elles correspondent à des réglages différents du même algorithme statistique). Les lignes en pointillées correspondent aux intervalles de confiance à 95% calculés sur les prédictions. Plus l'intervalle entre les lignes continues et les lignes en pointillés augmente, plus l'incertitude sur la relation modélisée est importante.....33

Figure 12. Cartes des températures de surface moyenne et de son écart type calculées à partir des images satellitaires MURSST pour la période 2003-2015 entre Juillet et Septembre. 36

Figure 13. Température de surface moyennée autour de l'îlot Ugo situé à proximité du cap N'Doua, entre juillet et septembre de chaque année. Les températures sont calculées à partir de trois sources de données: une *in situ* (GOROSST) et deux satellitaires (MURSST et OISST). Le centre de chaque barre représente la température moyenne, et les extrémités des barres représentent le minimum et le maximum observés. Les années les plus chaudes et les plus froides retenues pour les modèles de fluctuations annuelles sont représentées en rouge et en bleu. 37

Figure 14. Température de surface MURSST enregistrée autour de l'ilot Ugo, situé à proximité du cap N'Doua, entre juillet et septembre de chaque année. Les données journalières sont représentées pour quatre années consécutives (2009 – 2012).....37

Figure 15. Représentation de la répartition journalière du régime des vents au phare Amédée (1995 à 2016). La direction du vent est symbolisée par les barres colorées, chacune représentant une fourchette de 30° dont les limites sont spécifiées le long du périmètre du cercle (0° = Nord). La longueur des barres représente le nombre de jours correspondant à chaque fourchette, et la couleur représente la force du vent dans chaque fourchette. 38

Figure 16. Superposition des courbes de sélection de l'habitat par les baleines à bosse du Grand Lagon Sud durant 3 types d'années: les années chaudes (1998 & 2010, en rouge), les années froides (1996 & 2006, en bleu) et les années intermédiaires (en gris). Dans les deux panneaux, l'ordonnée représente la probabilité de présence des baleines à bosse (comprise entre 0 et 1) et l'abscisse représente une variable explicative du modèle. Les lignes continues représentent les prédictions moyennes obtenues sur les 1000 jeux de données générés (nb: les 5 lignes par couleur correspondent à des réglages différents du même algorithme statistique, ne pas en tenir compte). Les lignes en pointillées correspondent aux intervalles de confiance à 95% calculés sur les prédictions. Plus l'intervalle entre les lignes continues et les lignes en pointillés augmente, plus l'incertitude sur la relation modélisée est importante. 39

Figure 17. Courbe de réponse partielle de la fréquentation en fonction de la SST pour le GAM avec un décalage de 0 jours. L'axe des ordonnées représente le taux de rencontre prédit par le modèle lorsque la SST varie (avec jour et année fixés à leur moyenne). Cet axe est recentré sur 0. Le long de l'axe des abscisses, un « rug plot » représente la distribution de la variable SST dans le jeu de données. Chaque trait vertical est séparé du suivant par 1 % des données.....40

Figure 18. Courbe de réponse partielle à la direction du vent pour le GAM à décalage 0. L'axe des ordonnées représente le taux de rencontre prédit par le modèle lorsque la direction du vent varie (avec jour, année et force du vent fixés à leur moyenne). Cet axe est recentré sur 0. Le long de l'axe des abscisses, un « rug plot » représente la distribution de la variable « direction du vent » dans le jeu de données. Chaque trait vertical est séparé du suivant par 1 % des données. Etant donné que la direction du vent suit une répartition de 10° en 10°, cela crée une graduation régulière.....41

Figure 19. Distribution géographique des groupes de baleines à bosse observés lors des missions en mer conduites entre 1995 et 2015 (n=1312). Les groupes avec maman-petit apparaissent en rouge (n=206) et les groupes sans maman-petit apparaissent en bleu (n=1106).La terre est représentée en gris foncé, les récifs émergés en gris clair et les isobathes tous les 200m en lignes grises. 43

Figure 20. Diagramme en boîte représentant la distance moyenne observée entre groupes avec MP et tout autre type de groupe (G_{avecMP}, R = groupes compétiteurs, P = paires, S = solitaires, panneau A). Le trait plein noir à l'arrière-plan du panneau A, représente la valeur moyenne, alors que les traits en pointillés représentent les quartiles sur l'ensemble des groupes. Les valeurs exactes pour chaque catégorie sont reportées par des points au premier plan. Le panneau B représente la distance moyenne divisée par le temps écoulé entre les observations de groupes avec MP et tout autre type de groupe. .46

Figure 21. Diagramme en boîte de distance à la côte et de profondeur moyenne au niveau des positions où ont été observés des groupes avec (G_{avecMP}) ou sans MP (G_{sansMP}). Les points en bout de distribution représentent les valeurs extrêmes.....47

Figure 22. Projection géographique des zones d'utilisation préférentielles des groupes avec MP (en rouge) et sans MP (en bleu). La zone violette correspond à la zone utilisée par tous les types de groupes. Cette estimation ne représente que le "cœur" de la répartition et

doit donc être considérée comme une sous-estimation de la zone effectivement occupée par ces animaux. La terre est représentée en noir et les récifs émergés en gris clair.48

Figure 23. Zones de plus fort trafic maritime (pointillés) et principale route de navigation commerciale (trait rouge) dans le Grand Lagon Sud. La terre est représentée en noir et les récifs émergés en gris clair. 51

Figure 24. Nombre moyen de bateaux relevés par l'équipe à terre en début de matinée (1997-2013). 52

Figure 25. Evolution de la proportion de groupes avec MP observés sur la route de navigation commerciale. Ces observations sont celles effectuées par l'équipe en mer. 52

Figure 26. Evolution du nombre total de groupes avec MP observés dans l'ensemble du Lagon Sud. Ces observations sont celles effectuées par l'équipe en mer. 53

Figure 27. Zones de chevauchement entre la route de navigation commerciale et les zones d'utilisation préférentielles des groupes de baleines à bosse avec ou sans maman-petit. La route commerciale est délimitée par une ligne rouge. La terre est représentée en gris foncé et les récifs émergés en gris clair. 54

RESUME

L'étude a porté sur les observations de baleines à bosse réalisées dans le Grand Lagon Sud durant les missions de recherche conduites par Opération Cétacés en hiver austral de 1995 à 2015. Ce jeu de données exceptionnel de par son étendue temporelle et sa robustesse a permis d'investiguer les facteurs susceptibles d'affecter la distribution de ces cétacés migrateurs durant leur période de reproduction. En particulier, l'effet de l'environnement et des interactions sociales sur la distribution des baleines a été évaluée à plusieurs échelles temporelles.

Au cours de la période d'étude, l'effort de recherche représente 716 jours passés en mer, et 769 à terre depuis le Cap N'Doua, avec un total de 641 jours au cours desquels les deux méthodes d'échantillonnage ont été conduites en simultanée. Plus de 1300 groupes de baleines ont été étudiés par l'équipe en mer. À ceux-ci s'ajoutent plus de 900 groupes observés uniquement par l'équipe à terre ce qui démontre l'intérêt de combiner ces deux méthodes d'étude afin de maximiser le taux de détection sur l'ensemble de la zone d'étude.

La distribution annuelle des baleines à bosse dans le Grand Lagon Sud est restée relativement constante sur l'ensemble de la période d'étude. Le cœur de la distribution se situe entre l'îlot Ugo, le récif de Gué et l'ile Ouen.

Le pic de fréquentation calculé à partir des observations faites depuis la terre, se situe entre le 15 août et le 1er septembre sur l'ensemble du jeu de données. Néanmoins, ce pic varie d'une année à l'autre, sans lien avec les fluctuations environnementales de grande amplitude tel que le phénomène ENSO. Il est difficile d'établir la date du pic à l'échelle annuelle, tant les fluctuations journalières de la fréquentation sont importantes.

La fréquentation du Grand Lagon Sud par les baleines à bosse varie fortement à l'échelle de quelques jours, et ce en partie en réponse aux fluctuations des conditions environnementales locales. En particulier, le vent (et plus précisément les changements de régime entre vent d'ouest et alizés) affecte la fréquentation de la zone d'observation du Cap N'Doua. Le taux de rencontre est plus élevé par alizés que par vent d'ouest. L'effet de la température de surface de l'eau est lui beaucoup plus limité : les baleines favorisent les eaux de 22,5 - 23°C dans une moindre mesure.

Les baleines à bosse utilisent préférentiellement les eaux d'environ 80m de profondeur, proches de la côte mais ouvertes à la circulation océanique. Malgré des changements de température de surface relativement importants d'une année à l'autre (+2°C en moyenne en 2010 comparé à 2006), cette préférence d'habitat reste inchangée,

suggérant une forte plasticité face aux fluctuations de température locales liées au phénomène ENSO.

Les interactions sociales ont un effet sur la distribution des baleines à bosse à l'échelle du Grand Lagon Sud. Les femelles accompagnées d'un baleineau ont tendance à éviter le contact rapproché avec d'autres individus, quel que soit le type de groupe social concerné. Par conséquent, les femelles avec baleineau fréquentent davantage les zones peu profondes et proches de la côte, la baie de Prony et les abords du Cap N'Doua en particulier, alors que les autres individus se rencontrent un peu plus au large.

Ce comportement de ségrégation sociale a donc pour conséquence un risque accru de collisions chez les femelles suitées qui occupent préférentiellement les zones côtières où le trafic maritime est le plus important. L'augmentation du trafic maritime dans la zone ne semble pas avoir provoqué de déplacements des femelles avec baleineau jusqu'à présent, ce qui implique une augmentation du risque de collisions dans les années à venir si la population de baleines à bosse continue à s'accroître et que les femelles avec baleineau continuent à utiliser préférentiellement la zone côtière du Grand Lagon Sud.

INTRODUCTION

Contexte de l'étude

Au cours des dernières décennies, le changement climatique est apparu comme une évidence qui incite aujourd'hui les écologistes et les conversationnistes à se pencher davantage sur le lien étroit existant entre les espèces et le climat. Au sein des écosystèmes marins, les changements de températures affectent déjà de nombreuses espèces à tous les niveaux de la chaîne alimentaire (Poloczanska et al., 2013; Sydeman et al., 2015), mais les mécanismes sous-jacents restent en grande partie méconnus, qu'il s'agisse d'impacts sur la phénologie[1], la démographie ou la distribution des espèces. En particulier, l'impact du changement climatique sur les cétacés est considéré comme la "grande inconnue" (Thomas et al., 2015; Clapham, 2016). Sachant que les cétacés sont des endothermes (des animaux à sang chaud) situés au sommet de la chaîne alimentaire, les changements de températures devraient principalement avoir un impact indirect, au travers de changements entre les relations proies-prédateurs ou par modification de leurs habitats (Sydeman et al., 2015). Dans les prochaines années, il a été estimé que 88% des espèces de cétacés verront leurs aires de distribution modifiées par le changement climatique (MacLeod 2009). Cette modification de distribution n'aura pas forcément d'impact négatif sur toutes les populations concernées, mais il est clair que des espèces cosmopolites telles que la baleine à bosse (*Megaptera novaeangliae*) seront affectées dans leur migration et que leur utilisation des habitats de reproduction et de nourrissage, s'en trouvera modifiée. Une meilleure compréhension des dynamiques de distribution et de l'habitat des baleines à bosse est donc essentielle afin de permettre leur conservation et de faciliter la mise en œuvre d'une gestion efficace en réponse au changement climatique.

Si les habitats requis pour la reproduction des baleines à bosse se trouvent modifiés, il est probable que certains individus seront plus affectés que d'autres, en particulier les mères accompagnées d'un baleineau. Ces dernières dépensent beaucoup d'énergie pendant la période de reproduction et leurs besoins physiologiques doivent être respectés pour assurer la survie du baleineau au cours de sa première année (Lammers et al. 2007). Plusieurs études ont montré que les femelles suitées occupent une niche écologique[2] particulière comparée aux autres groupes sociaux présents sur les zones de reproduction. Elles favorisent généralement les eaux peu profondes et proches de la côte (Martins et al. 2001, Frankel & Clark 2002, Ersts & Rosenbaum 2003, Oviedo & Solís 2008, Félix & Botero-Acosta 2011, Lindsay et al. 2016). Ce comportement spatial peut les rendre plus susceptibles d'être affectées par un dérangement lié aux activités anthropiques côtières (Cartwright et al. 2012). La compréhension des modèles de

[1] Phénologie : étude de l'apparition d'événements périodiques (annuels le plus souvent) dans le monde vivant, déterminée par les variations saisonnières du climat (source : Wikipedia).
[2] Niche écologique : la somme des conditions biotiques et abiotiques nécessaires à la viabilité d'un organisme vivant.

ségrégation sociale[3] constitue donc une étape essentielle à la protection de ces groupes particulièrement sensibles aux risques anthropiques et climatiques.

La baleine à bosse a fait l'objet d'importantes opérations de chasse baleinière sur les zones de nutrition antarctiques, et dans une moindre mesure, sur les couloirs migratoires et les territoires de reproduction. Les effectifs actuels des populations océaniennes ne constituent qu'un faible pourcentage de leur abondance passée (Constantine et al. 2012 ; Jackson et al. 2015). Ce constat a conduit l'UICN (Union Internationale pour la Conservation de la Nature) à classer les populations Océaniennes comme « en danger» (Childerhouse et al. 2009). La population de baleines à bosse présente en hiver austral dans le Grand Lagon Sud de la Nouvelle-Calédonie a fait l'objet d'une étude saisonnière quasi-continue par l'association Opération Cétacés depuis le milieu des années 90. Une approche multidisciplinaire combinant génétique, photo-identification, étude comportementale et bioacoustique a permis de mieux comprendre les dynamiques et le comportement de cette population. Ces études ont notamment révélé la fragilité du stock néo-calédonien (Constantine et al. 2012), soulignant sa reproduction autonome (Garrigue et al. 2004) et montrant qu'elle constitue une unité de gestion indépendante au sein de la région océanienne (Garrigue et al. 2011b, Garrigue et al. 2011a). De telles caractéristiques la rendent particulièrement fragile à toute menace potentielle. Le Grand Lagon Sud est actuellement considéré comme le principal territoire de reproduction de cette population et l'inscription de cette zone au Patrimoine Mondial de l'Humanité par l'Unesco atteste de son importance pour cette espèce emblématique. C'est pourquoi la conservation des baleines à bosse dans cette zone et la gestion des activités qui s'y déroulent constituent des mesures prioritaires.

La zone côtière proche du Grand Lagon Sud est le lieu de développement d'un projet minier mené par l'entreprise Vale NC. Cette exploitation minière, l'activité portuaire lui étant associée ainsi que l'augmentation du trafic maritime en résultant, peuvent potentiellement induire nombre de changements dans la zone d'occupation des baleines à bosse. Pour cette population, les risques potentiels liés à une fréquentation maritime plus soutenue du Grand Lagon Sud incluent une modification de la fréquentation et de l'usage de la zone pouvant entraîner une perturbation des comportements reproducteurs ainsi qu'une augmentation des risques de collision. En dehors du trafic maritime lié à l'exploitation minière, le Grand Lagon Sud est également largement fréquenté par des bateaux de plaisance ainsi que par des embarcations touristiques proposant des sorties en mer dans le but spécifique d'observer les baleines à bosse (Schaffar et al. 2010 ; Schaffar et al. 2013).

Aujourd'hui, nous proposons de valoriser le jeu de données collecté depuis plus de vingt ans, exceptionnel de par la quantité, la qualité et la diversité des informations disponibles, pour répondre à des questions d'intérêt fondamental pour l'espèce et pour sa conservation. L'objectif général de notre projet est de comprendre les facteurs expliquant la dynamique de distribution des baleines à bosse du Grand Lagon Sud dans le but

[3] Ségrégation sociale : désigne ici la séparation géographique entretenue entre groupes de catégorie sociale (âge, sexe etc.) différentes.

d'estimer les habitats critiques, d'évaluer leur statut et de participer à la conservation de l'espèce dans la région.

Objectifs de l'étude

Cette étude portera sur l'écologie spatiale des baleines à bosse dans le Grand Lagon Sud et tentera de répondre à diverses questions relatives à la distribution de l'espèce dans la région et aux facteurs environnementaux et comportementaux affectant leur répartition. Les thèmes abordés et les questions auxquelles nous tenterons de répondre sont les suivants:

1 **La distribution spatio-temporelle**

La distributionspatiale des baleines à bosse dans le Grand Lagon Sud a-t-elle évoluée au cours des 20 dernières années ?

Quel est la date moyenne du pic de fréquentation des baleines dans le Lagon Sud ? Ce pic est-il fixe ou bien se décale t-il d'une année à l'autre ?

2 **La sélection de l'habitat**

Quelles variables environnementales expliquent la présence de baleines à bosse au sein du Grand Lagon Sud ?

3 **L'effet des variations climatiques saisonnières et journalières**

Les variations interannuelles de distribution spatiale des baleines à bosse dans le Grand Lagon Sud peuvent-elles être corrélées à des phénomènes climatiques annuels tels que ENSO (El NiñoSouthern Oscillation)?

Les fluctuations environnementales (vent et température) peuvent-elles avoir un effet sur la fréquentation du Grand Lagon Sud par les baleines à l'échelle journalière?

4 **La ségrégation sociale**

La distribution et l'utilisation des habitats des baleines à bosse dans le Grand Lagon Sud répondent-elles à des facteurs sociaux ? Les femelles accompagnées d'un baleineau utilisent-ils l'espace différemment du reste de la population ?

5 **Les risques anthropiques**

Le trafic maritime peut-il avoir un impact sur les baleines à bosse dans le Grand Lagon Sud ?

Structure du rapport

Les méthodes exactes d'analyse et de modélisation sont détaillées dans chaque section. La première partie de ce rapport est relative aux méthodes de collecte des données. La zone d'étude, les différents protocoles d'échantillonnage et les données environnementales y sont décrits. Les analyses relatives à chacun des cinq objectifs sont ensuite présentées séparément. En effet, les méthodes de traitement et d'analyse des données ont évolué d'un objectif à l'autre et seront donc décrites dans chacune des sections. Les résultats relatifs à chaque objectif de recherche sont également décrits et

discutés séparément. Chaque section est close par un paragraphe récapitulatif. Les conclusions en lien avec chacun des cinq objectifs du projet d'étude sont rappelées brièvement en fin de rapport.

1 METHODE DE COLLECTE DES DONNEES

1.1 Zone et période d'étude

Cette étude s'intéresse à la population de baleines à bosse visitant le Grand Lagon Sud de la Nouvelle-Calédonie durant l'hiver austral. La zone d'étude a été délimitée de la façon suivante: entre 166,4°E et 167,6°E de longitude et entre 23,3°S et 22,18°S de latitude(Figure 1).Le travail de terrain a été conduit entre juillet et septembre de chaque année, de 1995 à 2016.

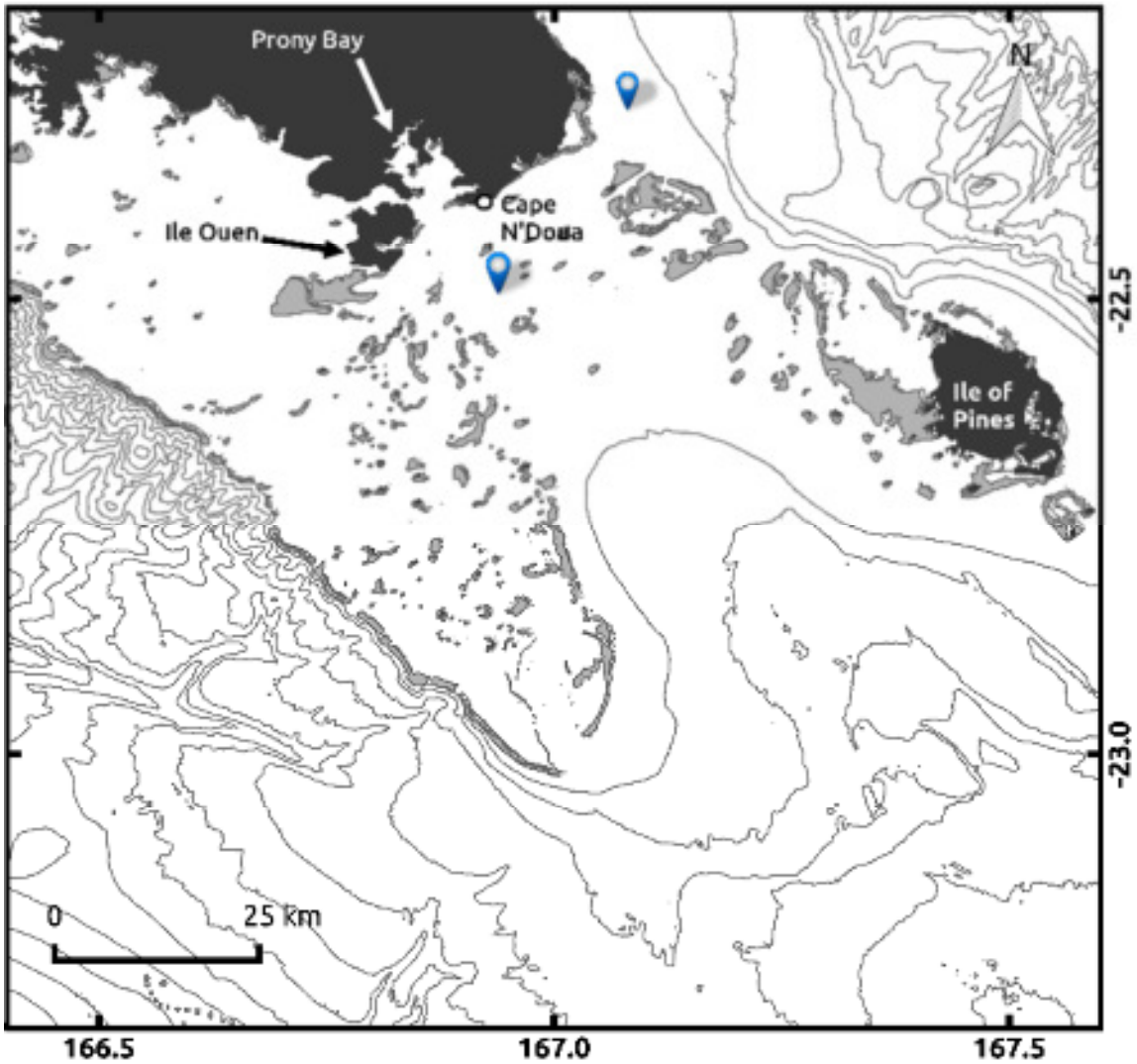


Figure 1. Zone d'étude du Grand Lagon Sud de la Nouvelle Calédonie. La terre apparait en noir, les récifs émergés en gris clair et les isobathes tous les 200m sous forme de lignes grises. Les repères bleus représentent la balise d'enregistrement de température de Goro ainsi que la position au Sud de l'îlot Ugo où la température mesurée par satellite a été extraite.

1.2 Protocole d'échantillonnage depuis la terre

1.2.1 Détection et suivi des animaux

La **station d'observation terrestre** se situe à proximité du **phare du cap N'Doua**. Elle culmine à 189 mètres d'altitude et offre un point de vue à 180° sur la principale zone d'occupation des baleines à bosse dans le Grand Lagon Sud. Seules les eaux situées directement au pied du cap N'Doua et longeant la côte alentour (Bonne Anse et baie du Nord), la grande rade de la baie de Prony, la baie Tranquille, le port de Goro, et les eaux situées au-delà du canal de la Havanah et du canal Woodin ne sont pas visibles. L'équipe terrestre est constituée de un à cinq observateurs équipés de jumelles et d'une radio VHF permettant de communiquer en permanence avec l'équipe de recherche en mer. Lorsqu'un groupe de baleines est détecté, la position est communiquée à l'équipe en mer.

1.2.2 Techniques de localisation géographique

Trois techniques ont été utilisés entre 1995 et 2016 afin de localiser la position des groupes de baleines observés depuis le cap N'Doua. Premièrement, durant les premières années de l'étude, le positionnement des groupes observés depuis le cap se faisait principalement par **description** textuelle, par exemple "1 mile nautique au nord du récif Gué". La position géographique précise en latitude-longitude de ces observations a été établie *a posteriori* en utilisant le site www.georep.nc. Deuxièmement, pendant certaines années (et notamment 2013 à 2016), une **grille** de la zone d'étude a également été utilisée (Figure 2) afin de repérer la position des groupes dans des cases de 1x1 mile nautique.

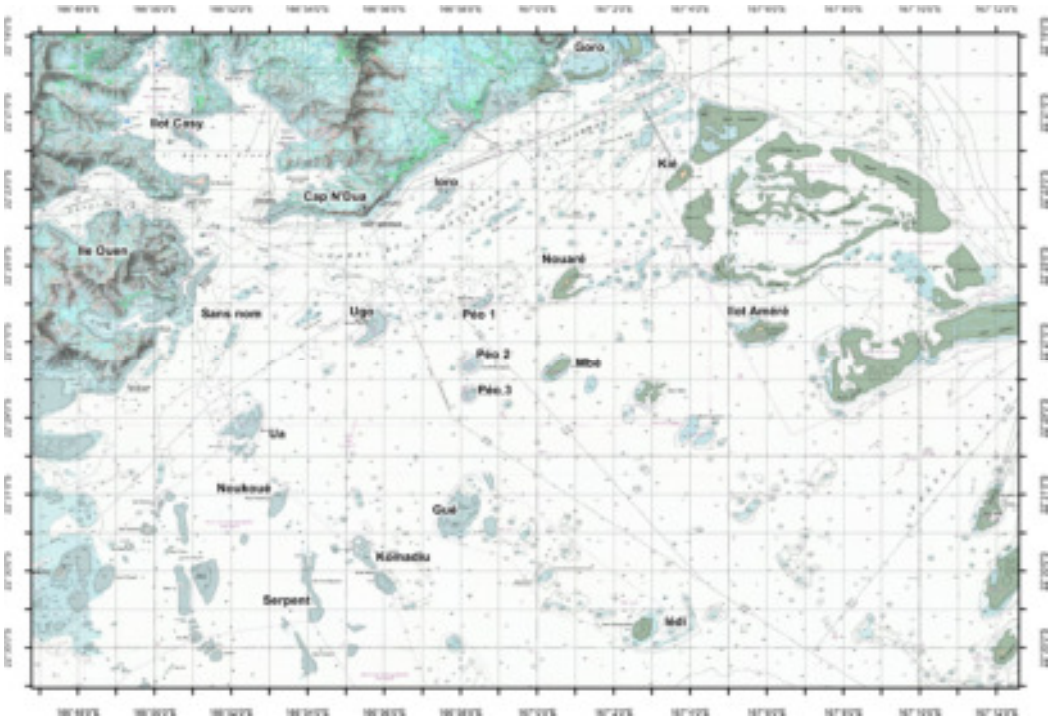


Figure 2. Grille de la zone d'étude du Grand Lagon Sud utilisée par l'équipe à terre pour localiser les groupes de baleines à la surface de l'eau. Chaque case a une taille de 1x1 mile nautique.

Dans ces cas, la latitude-longitude de ces observations correspond au centre de la case de la grille dans laquelle les positions ont été repérées. Enfin, entre 2005 et 2012 les positions des groupes de baleines ont été enregistrées à l'aide d'un théodolite[4]. Relié au système d'exploitation informatique *Cyclopes* (Kniest & Paton 2001), cet instrument de géomètre permet de déterminer la position exacte en latitude-longitude d'une baleine à la surface de l'eau.

1.2.3 Données collectées

À chaque détection d'un groupe de baleines à bosse, les informations suivantes sont notées à l'aide d'un dictaphone puis numérisées *a posteriori*:

- La date ;
- L'heure ;
- les **coordonnées géographiques** (par description textuelle, repérage sur la grille ou positionnement au théodolite) au début de suivi ;
- Le **type de groupe social** ;
- L'étude(ou non) du groupe par l'équipe en mer.

Lors d'une observation faite depuis la terre, le **type de groupe social** est résumé de façon simplifié car il est difficile de détecter le nombre et la taille exacte des animaux depuis le cap N'Doua, d'autant plus si le groupe se situe à grande distance. On distingue simplement trois types de groupes: les animaux solitaires, les groupes de deux animaux (dont les paires maman-petit) et les groupes de plus de 2 baleines.

1.2.4 Estimation de l'effort de recherche depuis la terre

Pour chaque jour de suivi à terre, l'heure de début et de fin de suivi ont été enregistrées, ce qui a permis de **calculer la durée journalière de suivi depuis la terre, *Tobs***. L'effort de recherche a ensuite été modélisé sur une grille de la zone d'étude de 500x500m de résolution en fonction de la durée du suivi et de la distance au cap N'Doua. En effet, la capacité à détecter une baleine à la surface diminue lorsque la distance entre la baleine et les observateurs situés au cap N'Doua augmente. Une fonction logistique a permis de modéliser l'effort en un point de coordonnées (x, y) et au jour (t):

$$Effort_{terre}(x,y,t) = Tobs_{terre}\frac{(t)*100}{1+\exp(-\sqrt{d(x,y)-12})}$$

où *Tobs(t)* est la durée de suivi le jour t (en heures décimales), et *d(x, y)* est la distance (en km) entre le cap N'Doua et le point de coordonnée*s (x, y)*où se situe le groupe de

[4] Théodolithe : instrument utilisé pour réaliser des mesures de triangulation, c'est-à-dire de la localisation géographique à distance.

baleines. Le point d'inflexion[5] de la courbe a été fixé à 12km en se basant sur les résultats de Schaffar et al (Schaffar et al., 2013, Figure 3). Nous avons également considéré que la distance maximale de détection d'un animal était de 40km (à partir d'une analyse préliminaire de la distribution des baleines observées depuis la terre).

Ainsi, nous avons construit des cartes journalières d'effort terrestre (Figure 3) dont les valeurs des pixels ont ensuite été sommées afin de produire 20 **cartes annuelles d'intensité d'effort depuis la terre**. Ces cartes ont enfin été recentrées sur une échelle de 1 à 100.

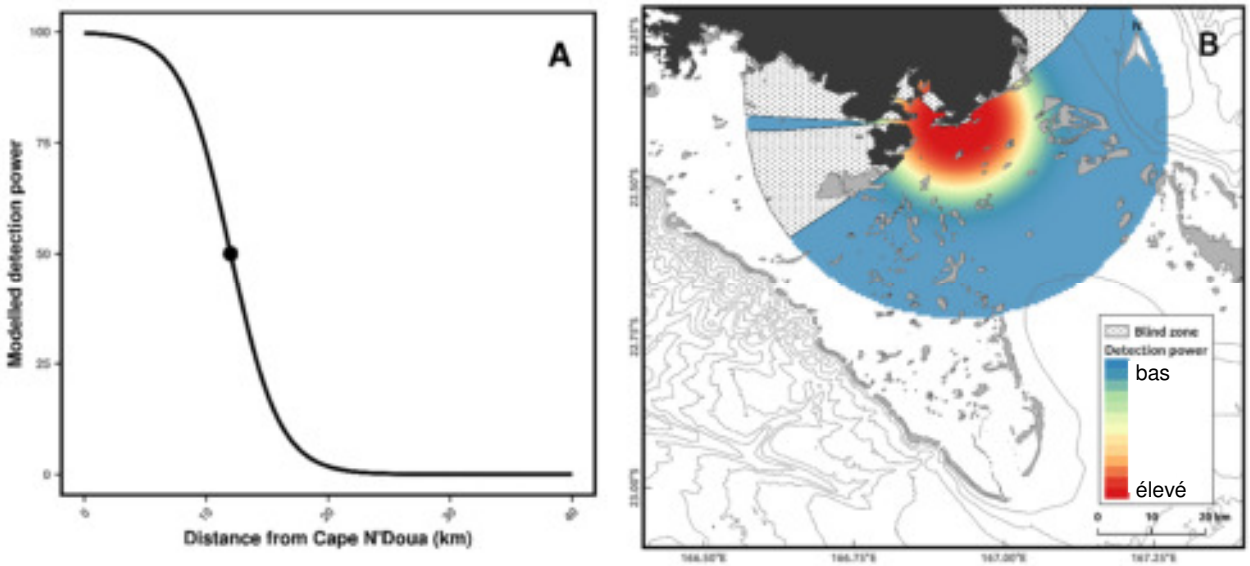


Figure 3. Modélisation de l'effort de recherche terrestre en se basant sur la distance au cap N'Doua. (A) forme de la fonction logistique utilisée pour modéliser l'évolution de l'intensité de l'effort en un point donné (axe des ordonnées) en fonction de la distance au cap (axe des abscisses). (B) Exemple de carte d'effort terrestre journalier. L'intensité de l'effort est représentée sur une échelle de couleur (effort de plus en plus intense du bleu vers le rouge). Les zones en pointillés sont masquées aux yeux des observateurs situés au cap N'Doua. La terre apparait en noir, les récifs émergés en gris et les isobathes tous les 200m en lignes grises.

1.3 Protocole d'échantillonnage en mer

1.3.1 Détection et suivi des animaux

L'équipe en mer effectue ses recherches depuis **une embarcation semi-rigide de 6m**. Trois à cinq observateurs expérimentés sont embarqués et observe le plan d'eau sur 360° à l'œil nu. Le travail de recherche ne s'effectue que dans des conditions de mer inférieures ou égales à 3 sur l'échelle de Beaufort ce qui correspond à la présence de quelques « moutons » d'écume à la surface et un vent autour de 10 nœuds. L'équipe en mer est en **contact permanent avec l'équipe à terre grâce à une radio VHF** et peut ainsi bénéficier des informations communiquées par cette dernière si un groupe de baleines est détecté dans la zone. Lorsqu'un groupe de baleines est rencontré,

[5]Point d'inflexion : un point où s'opère un changement de concavité d'une courbe.

l'embarcation s'approche du groupe et se déplace parallèlement à celui-ci afin de réaliser un **suivi focal**. Pour plus de détails sur les méthodes d'échantillonnage en mer, consulter Garrigue et al. (2001).

1.3.2 Données collectées

À chaque rencontre avec un groupe de baleines à bosse, les informations suivantes sont notées à l'aide d'un dictaphone puis numérisées *a posteriori*:

- La date ;
- **L'heure et les coordonnées géographiques** (la latitude et la longitude relevées sur un GPS en degrés et minutes décimales en WGS84) du début de suivi ;
- **Le type de groupe social** ;
- **La composition du groupe (nombre et taille des individus)** ;
- L'heure et les coordonnées géographiques de fin de suivi ;
- Le moyen de détection du groupe (groupe détecté par : les observateurs en bateau, les observateurs à terre ou via une source d'information extérieure).

La **taille de l'animal** est classée en trois catégories : adulte, juvénile et baleineau. Chez les baleines à bosse, un baleineau se définit comme un animal qui mesure au maximum un tiers de la taille de l'adulte et qui est toujours à proximité voire en contact physique avec celui-ci. Le juvénile est un individu qui n'a pas atteint la taille de maturité sexuelle.

Le **type de groupe social** peut être définit de façon plus ou moins complexe selon l'objectif de l'étude. Pour la présente étude, la classification des groupes sociaux se limite aux groupes incluant une mère et son petit (abrégés "GavecMP" et incluant les mères-petits seules, les mères-petits accompagnées d'une escorte ainsi que les mères-petits accompagnées d'un groupe compétiteur[6]) et aux groupes n'incluant pas de mère-petit (abrégés "GsansMP" et incluant les paires de deux individus, les groupes de 3 individus ou plus et les individus solitaires).

1.3.3 Estimation de l'effort de recherche en mer

A partir de 2003, un **GPS** était systématiquement embarqué durant les recherches en mer, permettant ainsi d'enregistrer la trace suivie par le bateau chaque jour. En revanche, les années précédentes, la **trace GPS du bateau** n'a pas été enregistrée. Afin de reconstituer la distribution spatiale de l'effort en mer de 1995 à 2002, toutes les positions enregistrées dans les carnets de bord ont été reliées (coordonnées géographiques de début de suivi de groupe, de fin de suivi de groupe ou d'arrêt pour échantillonnage acoustique), reconstituant ainsi des **"pseudo-traces" journalières**.

[6] Groupe compétiteur : Plusieurs individus adultes engagés dans des activités de reproduction, avec comportement compétitif.

Ces traces et pseudo-traces ont été interpolées à une position toutes les 30 sec puis découpées en portions “en effort” et “hors-effort” de recherche. Les portions hors-effort correspondent soit à de la navigation sans recherche de baleines, soit à du temps passé en suivi focal d’un groupe de baleines, auquel cas nous considérons que les observateurs ne cherchaient pas à détecter de nouveaux groupes et n’étaient donc pas en effort. A partir des portions “en effort” des traces, on a ensuite estimé l’effort de recherche sur une grille de la zone d’étude de 500x500m de résolution. Toutes les positions du bateau« en-effort » ont été regroupées par année et une surface de densité en a été extraite à l’aide d’une régression locale en 2 dimensions (appelée LOESS, function *loess()* sous R appliquée avec un paramètre de lissage de 0.005). Des **cartes annuelles d’intensité d’effort en mer** ont ainsi été obtenues pour chaque saison, comparables sur une échelle de 1 à 100 (exemple: Figure 4).

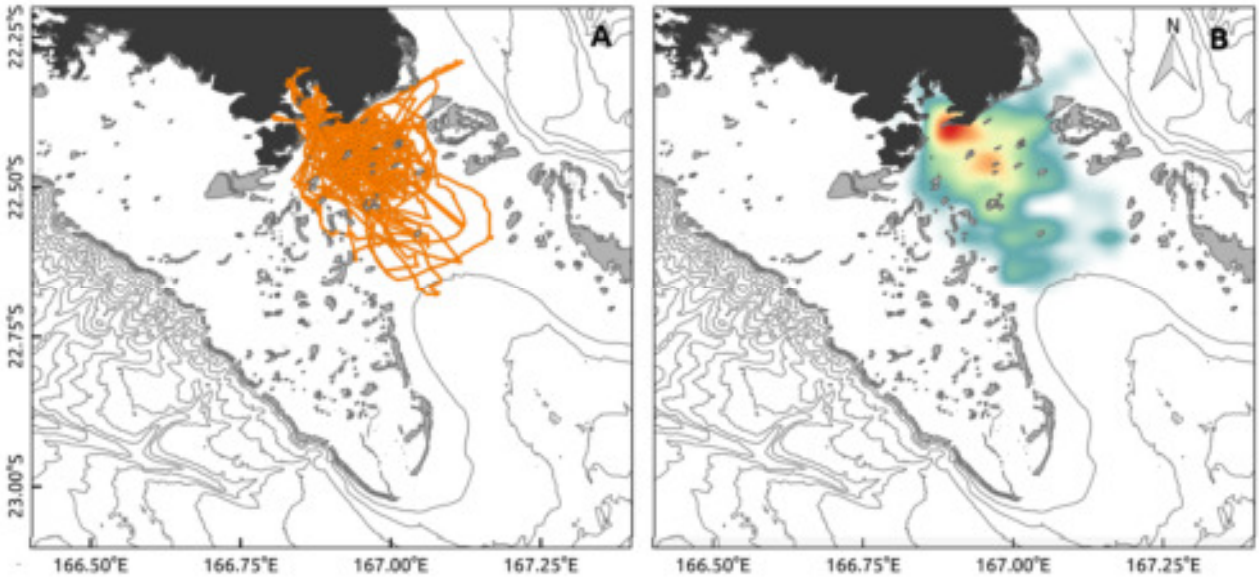


Figure 4. Traces suivies par l’équipe en mer en 2012 (A) et carte de l’intensité de l’effort en mer pour cette même année (B).L’intensité de l’effort est comprise entre 0 (pas de couleur) et 100, et s’échelonne sur une palette de couleur du bleu au rouge. La terre apparait en noir, les récifs émergés en gris et les isobathes tous les 200m en lignes grises.

1.4 Données environnementales

1.4.1 Données topographiques

Les traits de côtes ainsi que les **cartographies récifales** du Grand Lagon Sud ont été acquises à partir du “Millenium Coral Reef Project” (version 8, Andréfouët et al., 2008). La **distance à la terre** et la **distance aux récifs** les plus proches ont été calculées à partir de ces cartes, selon une grille de 500x500m de résolution (Figure 5). La distance à la terre correspond à la distance à la côte la plus proche en excluant les îlots, c’est-à-dire en ne prenant en compte que la Grande Terre, l’ile Ouen et l’ile de Pins. Les données de bathymétrie ont été fournies par la DTSI “Service de la Géomatique et de la Télédétection” (en accès libre sur le site Georep, www.geoportal.gouv.nc) à une résolution de 100x100m. C’est une compilation des sondes hydrographiques du SHOM et distribuée sous la forme d’un modèle numérique de terrain (MNT). Les zones non hydrographiées ont été remplies

par extrapolation/croisement avec les images aériennes et satellites (source Lefèvre IRD).Trois variables topographiques ont été dérivées de la bathymétrie: **la pente** (en radians), **l'orientation de la pente** (sans unité, cette métrique indique dans quelle direction la pente est orientée et à quel point l'inclinaison est importante), et **la rugosité du fond** (sans unité, cette métrique correspond à la différence entre les valeurs maximales et minimales de bathymétrie d'un pixel et des 8 pixels l'entourant).

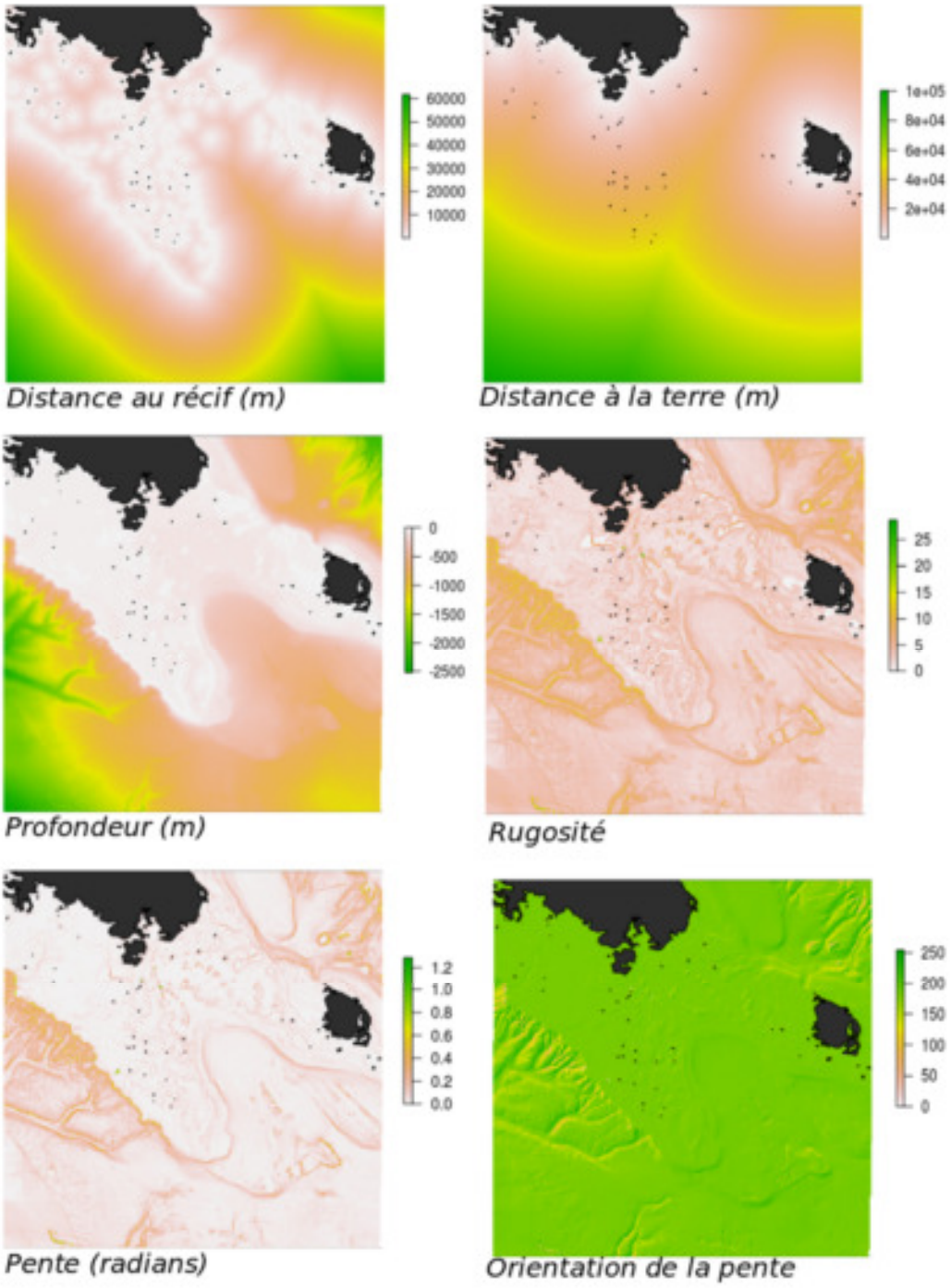


Figure 5. Rasters des variables topographiques utilisées pour caractériser l'habitat des baleines à bosse dans le Grand Lagon Sud. A noter que la rugosité est affichée sur une échelle de couleur transformée avec une racine carrée. La terre apparait en noir.

1.4.2 Données de température et de vent

Dans un premier temps, la **température de surface** de l'eau a été mesurée par **télédétection satellitaire** sur l'ensemble du Grand Lagon Sud. Deux jeux de données fournis par la NASA ("National Aeronautics and Space Administration", Etats-Unis) en libre accès sur le site www.coastwatch.pfeg.noaa.gov ont été téléchargés afin de couvrir l'ensemble de la période d'étude avec la meilleure précision possible. Les mesures de type "Multi-Scale Ultra High Resolution SST" **(MURSST**) sont les plus précises (1x1km de résolution spatiale, à un pas de temps journalier) mais ne sont disponibles qu'à partir de 2002. Les données de type "NCEP Level 4 Optimally interpolated SST" (**OISST**) sont moins précises (1x1° de résolution, à un pas de une semaine) mais couvrent l'intégralité de la période d'étude de 1995 à 2016.

Par ailleurs, la température de surface de l'eau a également été collectée ***in situ*** par une bouée océanographique située dans le canal de la Havanah (station -22,2725°S 167,10716°E) et dont les enregistrements sont téléchargeables sur le site www.data.observatoire-gops.org. Ces données (**GOROSST**) sont disponibles à haute résolution temporelle (toutes les 30min, ce qui permet de calculer une moyenne journalière de la température) mais ont été interrompues à plusieurs reprises durant la période d'étude.

La direction (en degrés) et la force du vent (en nœuds) ont été fournies par la **station météorologique du Phare Amédée** (source: Météo France). Ces mesures sont disponibles depuis 1996 avec un pas de temps journalier.

1.5 Outils d'analyse

Toutes les analyses ont été réalisées à l'aide de logiciels libre d'accès: le logiciel **QGIS** pour la cartographie (version 2.18.3, QGIS Development Team, 2016) et le logiciel **R** (version 3.3.2, R Core Team, 2016) pour le traitement des données et la modélisation statistique.

Les **tests statistiques** réalisés utilisent une "***valeur-p***" afin d'estimer la certitude avec laquelle une hypothèse est satisfaite. Nous nous sommes basés sur des seuils de significativité classiques: valeur-p < 0,05 (* = faible présomption), valeur-p < 0,01 (** = forte présomption), valeur-p < 0,001 (*** = très forte présomption).

2 LA DISTRIBUTION SPATIO-TEMPORELLE

Rappel des questions : La distribution spatiale des baleines à bosse dans le Grand Lagon Sud a-t-elle évoluée au cours des 20 dernières années ?

Quel est la date moyenne du pic de fréquentation des baleines dans le Lagon Sud ? Ce pic est-il fixe ou bien se décale t-il d'une année à l'autre ?

2.1 Traitement des données

La première partie de cette étude est basée sur la combinaison des observations effectuées en mer et depuis la terre entre 1995 et 2015. La position géographique, la date et la taille des groupes de baleines sont utilisés, ainsi que les cartes annuelles d'intensité d'effort en mer et depuis la terre.

2.1.1 Étude de la répartition spatiale

La **distribution annuelle** des groupes de baleines à bosse dans le Grand Lagon Sud a été estimée pour chaque saison d'étude de 1995 à 2015 en utilisant une **estimation de densité par noyau**. Cette méthode statistique permet de calculer la probabilité de distribution d'une variable aléatoire dans de multiples dimensions. Ici, l'estimation par noyau a été appliquée avec une fonction gaussienne en deux dimensions (latitude et longitude) aux positions géographiques des groupes de baleines observés en mer et des groupes observés par l'équipe à terre mais n'ayant pas fait l'objet d'un suivi en mer afin de ne pas dupliquer les groupes dans le jeu de données final.

Un **poids statistique** a été attribué à chaque observation de façon à prendre en compte **le nombre d'individus** contenu dans le groupe et **l'intensité de l'effort de recherche** dans la zone. En effet, il est important de donner plus de poids aux observations ayant eu lieu dans des zones peu échantillonnées. En d'autres termes, on veut prendre en compte le fait que la probabilité d'observer un animal dans une zone où l'effort de recherche a été intense (ici par exemple autour de Bonne Anse) est plus élevée que dans une zone peu étudiée (ici par exemple la réserve Merlet), et ce indépendamment de la préférence des baleines pour ces zones.

Chaque observation reçoit donc un poids:

- Pour les groupes observés en mer: ce poids est égal au nombre d'individus dans le groupe multiplié par l'inverse de l'intensité annuelle de l'effort en mer à cette position ;

- Pour les groupes observés depuis la terre: ce poids est égal à l'inverse de l'intensité annuelle de l'effort depuis la terre à cette position.

- Répartition moyenne

Dans un premier temps, la répartition moyenne des baleines à bosse a été estimée sur toute la période d'étude de 1995 à 2015. Toutes les observations, à la fois celles faites en

mer et celles faites uniquement depuis la terre (c'est-à-dire qu'on ne duplique pas les groupes observés à la fois par la mer et par la terre), ont été combinées et une estimation de densité par noyau y a été appliquée en utilisant un poids par observation comme décrit ci-dessus.

- Répartition annuelle

Dans un second temps, la répartition des baleines à bosse a été estimée pour chaque année. Deux estimations de densité distinctes ont été réalisées: une pour les groupes observés en mer et une pour tous les groupes observés uniquement depuis la terre. Les poids ont été utilisés dans l'estimation par noyau comme décrit précédemment. Nous avons ainsi obtenu des cartes annuelles de densité de baleines observées en mer d'une part et depuis la terre d'autre part. Pour chaque année *i*, ces deux types de cartes ont été combinés selon la formule suivante:

$$\text{Densite estimée totale(i)} = Densite\ mer\ (i) + Densite\ terre\ (i) \times \frac{Nombre\ de\ groupes\ terre\ (i)}{Nombre\ de\ groupes\ mer\ (i)}$$

Où (i) représente chaque année.

Cette méthode de calcul a permis d'équilibrer l'impact du jeu de données terrestre par rapport au jeu de données marin dans l'estimation de la densité totale. Ainsi, l'apport des données de terre à l'estimation de densité totale est proportionnel au nombre de groupes observés par l'équipe à terre.

2.1.2 Étude de la phénologie

L'étude de la **phénologie**, c'est-à-dire du rythme temporel avec lequel les baleines visitent le Grand Lagon Sud (pic de fréquentation saisonnier), a été étudiée à partir des **données récoltées par l'équipe de terre uniquement**. Pour cette analyse seulement, tous les jours d'étude à terre entre 1995 et 2016 ont été utilisés, même ceux pour lesquels il n'y avait pas d'équipe en mer.

Un taux de rencontre a été calculé à partir du nombre d'animaux observés par unité de temps. L'unité de temps correspond ici à *Tobs* (Cf section 1.2.4), le temps de suivi à terre par jour. Quant au nombre d'animaux par groupe observé, il n'est pas toujours identifiable précisément pour les observateurs à terre. Un système de pondération a donc été mis en place, afin d'obtenir un proxy du nombre d'animaux présents dans chaque groupe observé depuis la terre:

Une baleine seule comptera pour 1 point ;

Une paire, pour 2 points;

Un groupe de plus de deux baleines pour 3 points ;

Un groupe à la composition non déterminée pour 2 points.

Le **taux de rencontre, *Tterre***, est finalement calculé pour chaque jour d'étude selon la formule suivante :

$$taux\ de\ rencontre\ (baleines\ /\ heure) = \frac{Nombre\ de\ baleines\ observees}{Temps\ on\ effort\ (heures)}$$

Dans un second temps, les séries temporelles de taux de rencontre journaliers ont été décomposées (c'est-à-dire que la tendance générale en a été extraite) en utilisant trois approches statistiques : les « **moving windows** » (ou moyenne mobile), les **régressions polynomiales** (de degré 2 et 3) et les **GAM** (« Generalized Additive Models », ou modèle additifs généralisés, Hastie & Tibshirani 1990). Sans entrer dans le détail de ces modèles, ceux-ci ont été choisis pour leur capacité à extraire des relations plus ou moins complexes dans un signal. En effet, la moving window aura tendance à rester très proche des données et donc à révéler de petites fluctuations du taux de rencontre en fonction du temps alors que la régression polynomiale se limitera à révéler une tendance globale (en forme de cloche ou de U).

Une méthode dérivée du GAM, appellée « Generalized Additive Mixed Model » ou modèle additif mixte généralisé (GAMM) a en particulier permis de modéliser l'effet combiné de l'année et du jour de l'année (mesurant ainsi le moment de la saison auquel l'observation est faite) sur le taux de rencontre. C'est ce qu'on appelle une décomposition de séries temporelle en un signal intra-annuel et un signal inter-annuel. Le signal inter-annuel, représenté ici par la variable année, a été inclus dans le GAMM en temps qu'effet « aléatoire » ou « random ».

2.2 Résultats

2.2.1 Répartition spatiale

De 1995 à 2015, les équipes à terre et en mer ont travaillé en simultané au cours de 641 jours d'échantillonnage, et l'équipe en mer a travaillé seule durant 75 jours supplémentaires. Le jeu de données concerné s'étale donc sur 716 jours au total (Table 1).

Table 1. Résumé des sorties effectuées en heure et en jours, et du nombre de groupes de baleines à bosse observés par les équipes à terre et en mer par an. L'effort correspond ici à l'intégralité du temps de sorties (incluant donc les portions en- et hors-effort pour la mer).

	Effort à terre		Effort en mer		Nombre de groupes suivis	
Saison	**Heures**	**Jours**	**Heures**	**Jours**	**À terre seulement**	**En mer**
1995	73,15	18	111,4	27	8	25
1996	260,0	48	335,4	55	45	56
1997	202,3	37	263,5	44	29	56
1998	225,2	47	294,7	50	18	44
1999	219,1	43	267,4	46	11	26
2000	209,2	39	286,6	45	9	43
2001	165,7	28	279,4	40	23	50
2002	116,6	21	163,15	27	3	18
2003	208,6	36	261,9	39	22	74
2004	0	0	40,1	5	-	21
2005	192,9	32	235,5	33	25	63

2006	264,7	40	289,3	41	80	107
2007	270,4	44	341,4	47	124	130
2009	186,25	32	235,3	32	56	70
2010	189,0	33	226,5	34	67	92
2011	205,7	37	262,45	38	113	134
2012	157,1	29	198,55	29	72	98
2013	163,3	25	185,1	25	51	98
2014	130,2	23	194,9	28	9	40
2015	171,9	29	217,4	31	101	99
Total	3611,1	641	4689,9	716	866	1344
Moyenne ± Ecart type	180,6 ± 64,8	32,1 ± 11,3	234,5 ± 75,6	35,8 ± 11,2	43,3 ± 38,3	67,2 ± 35,6

Globalement, cela représente une moyenne de 32 jours d'effort par saison à terre et 36 en mer. Pour les besoins de cette analyse nous n'avons sélectionné que les jours d'étude où l'équipe en mer a travaillé ce qui explique l'absence de données pour 2008 où seule l'équipe à terre était présente. En 2004, la campagne dans le Grand Lagon Sud a été limitée à quelques jours et l'effort à terre était inexistant. Au total, 2210 groupes de baleines ont été observés par les équipes à terre et en mer, avec un maximum de 254 groupes en 2007 et un minimum de 21 groupes en 2002 (Figure 6).

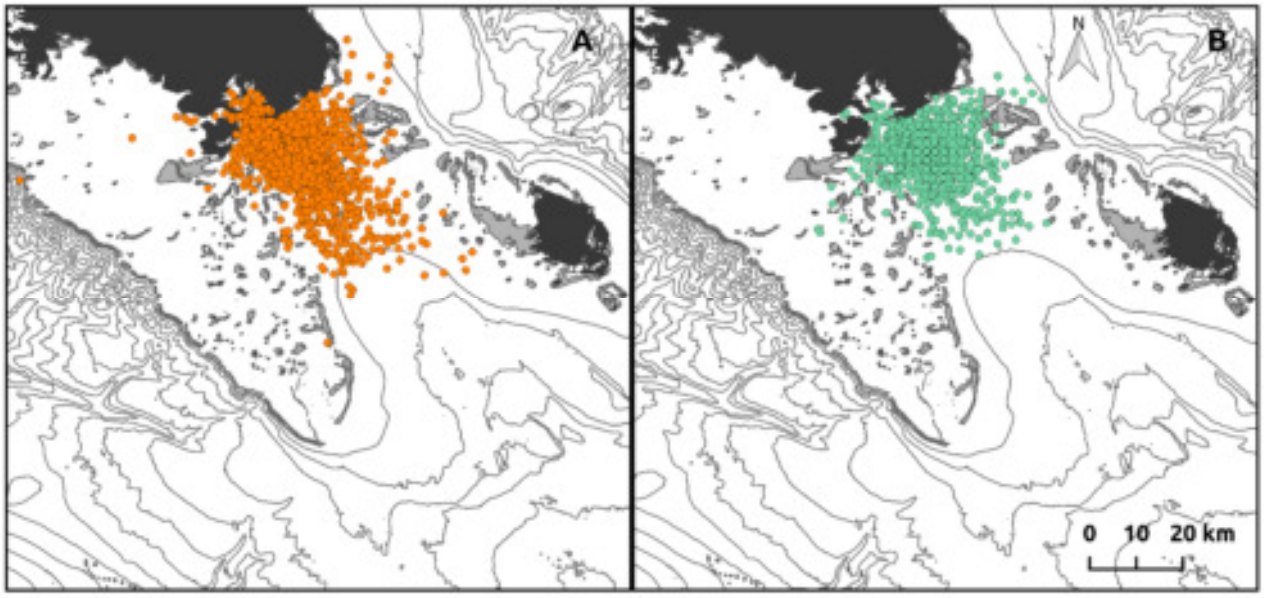


Figure 6. Position des groupes de baleines à bosse observés par l'équipe en mer (A) et uniquement observés par l'équipe à terre (B). La terre est représentée en noir, les récifs émergés en gris clair et les isobathes tous les 200m en lignes grises.

La carte globale de répartition géographique des groupes entre 1995 et 2015 montre une préférence pour la zone côtière située à la sortie de la baie de Prony, le cœur de la distribution étant entouré par les récifs de Ugo, Ua et Gué (Figure 7). On constate également que la distribution dans son ensemble semble limitée à l'ouest par les récifs de

la corne Sud et à l'est par la réserve Merlet. En effet, peu de groupes ont été observés dans la réserve[7], même si l'on tient compte des observations faites depuis la terre.

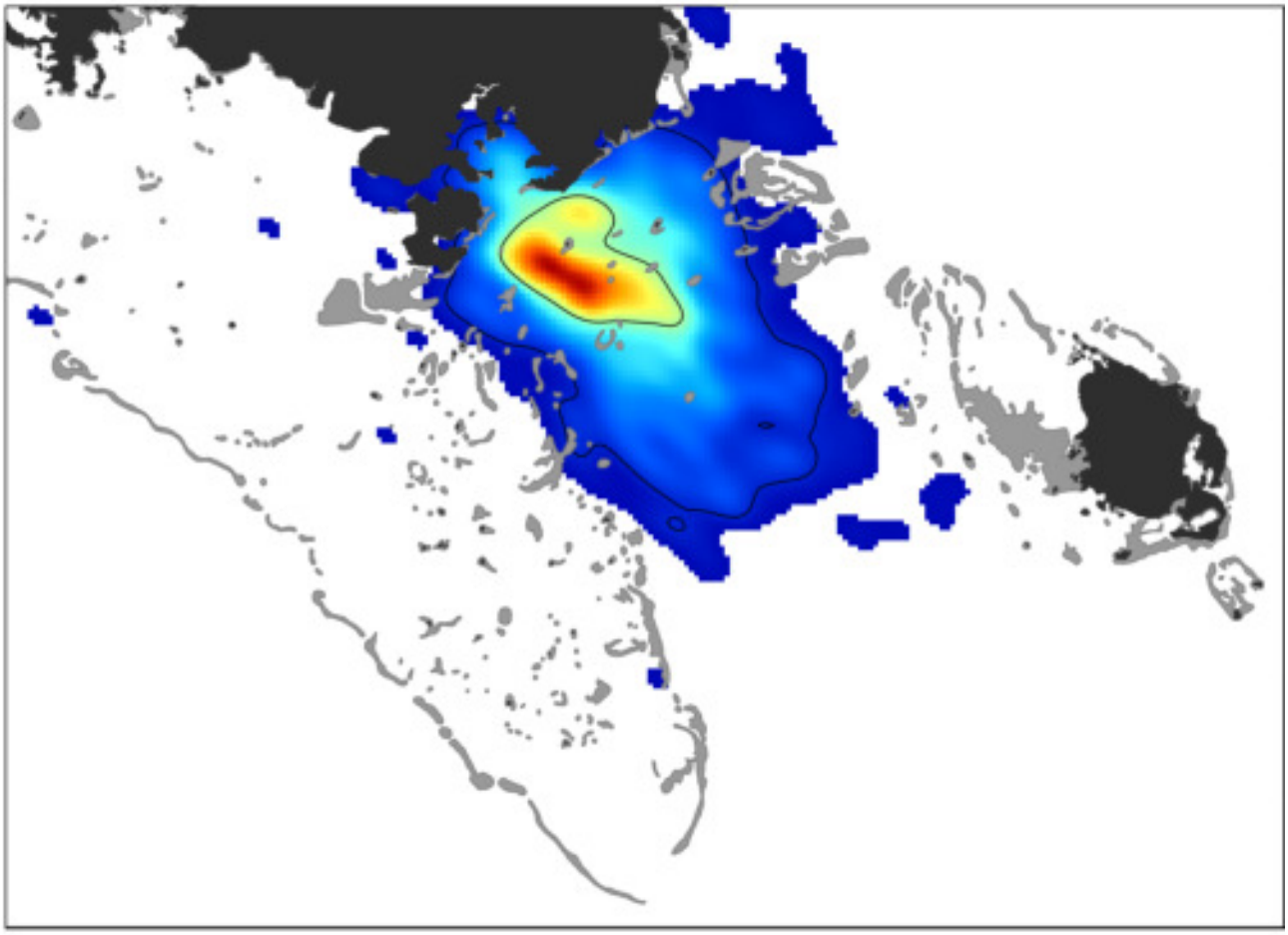


Figure 7. Estimation de la distribution spatialemoyenne des baleines à bosse dans le Grand Lagon Sud entre 1995 et 2015 à partir des observations en mer et à terre. La probabilité de présence est représentée sur une échelle du bleu (faible probabilité) au rouge (forteprobabilité). Les zones non colorées sont considérées comme trop peu échantillonnées pour pouvoir y produire une estimation. Les deux contours noirs au sein de la zone d'estimation représentent les contours à 90% et 50% de probabilité de présence sur une échelle de 1 à 100. La zone la plus au centre correspond donc au cœur de la distribution moyenne des baleines à bosse. La terre est représentée en noir et les récifs émergés en gris.

Si l'on s'intéresse aux distributions à l'échelle saisonnière, on constate que la zone de distribution spatiale des baleines est très similaire d'une année à l'autre, en tout cas en son cœur (Figure 8).

[7] Une autorisation de pénétrer dans la réserve Merlet a été donnée au bateau de recherche par la province Sud entre 1996 et 2007, puis en 2015.

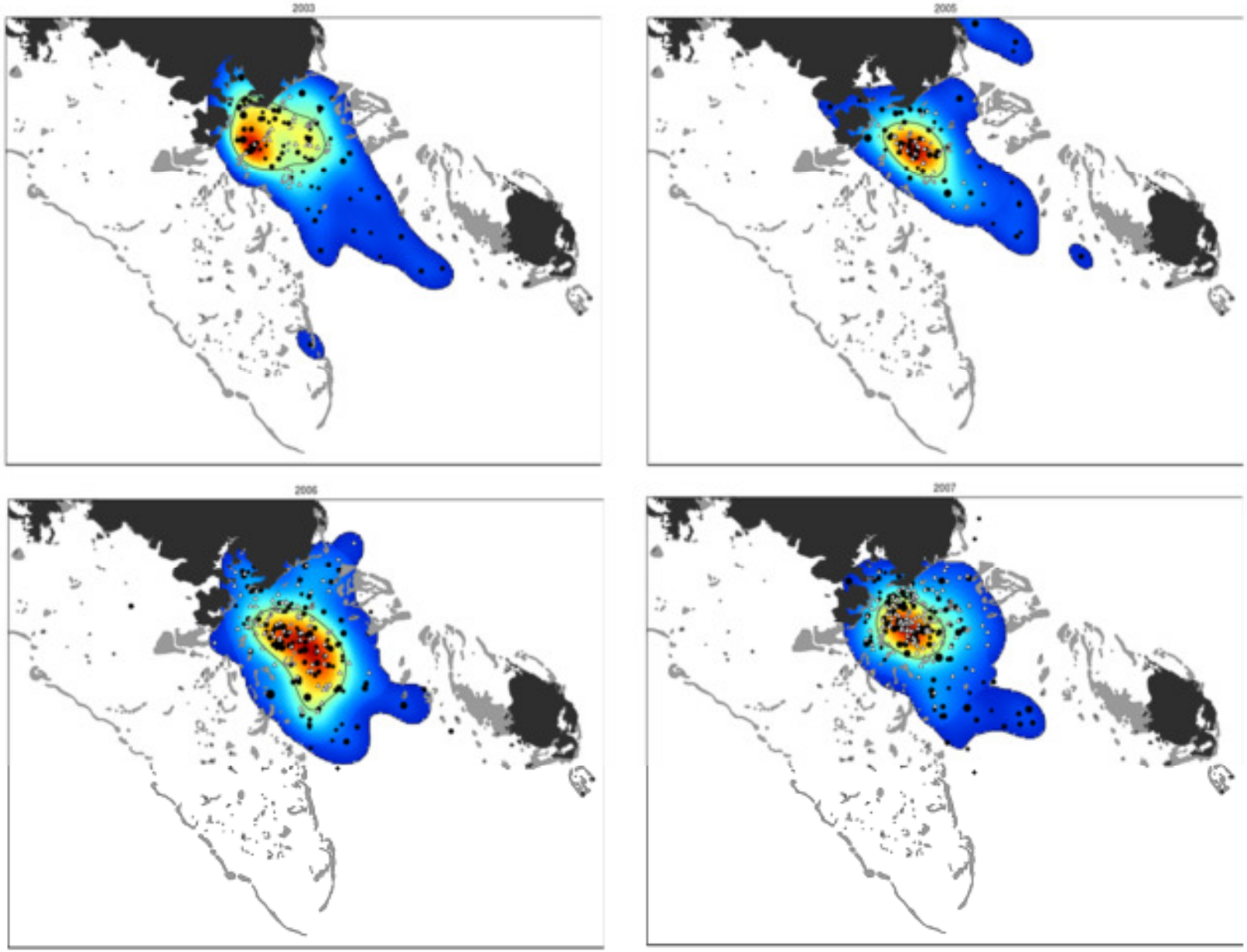


Figure 8. Estimation de la répartition annuelle des baleines à bosse dans le Grand Lagon Sud entre 1995 et 2015 à partir des observations en mer et depuis la terre. La probabilité de présence est représentée sur une échelle du bleu (faible probabilité) au rouge (forte probabilité). Les zones non colorées sont considérées comme trop peu échantillonnées pour pouvoir y produire une estimation. Les deux contours noirs au sein de la zone d'estimation représentent les contours à 90% et 50% de probabilité de présence sur une échelle de 1 à 100. Les groupes de baleines à bosse observés en mer sont représentés par des cercles noirs de taille proportionnelle au nombre d'individus dans le groupe (de 1 à 10). Les groupes de baleines à bosse observés depuis la terre mais non observés en mer sont représentés par des triangles blancs. La terre est représentée en noir et les récifs émergés en gris.

2.2.2 Étude de la phénologie

Le taux de rencontre journalier enregistré par l'équipe à terre a été calculé pour 794 jours d'étude, répartis entre 1995 et 2016. À l'échelle journalière, Tterre varie de façon importante : entre 0 et 7 baleines par heure d'un jour d'étude à l'autre. Si l'on s'intéresse à l'évolution du taux de rencontre au cours d'une saison de reproduction, c'est-à-dire de début juillet à fin septembre de chaque année, on constate que celui-ci ne suit pas de tendance générale en pic mono-modal ; c'est-à-dire que l'on n'observe pas qu'un seul pic (Figure 9). L'étendue de la période d'étude n'étant pas exactement identique chaque année, il semble que le suivi n'ait parfois pas duré assez longtemps pour capturer l'ensemble de la période de reproduction. C'est le cas de l'année 2009, au cours de laquelle on observe une augmentation continue de la fréquentation (Figure 9), laissant penser que lorsque le suivi de terrain s'est arrêté début septembre, la saison de reproduction n'était pas terminée et que beaucoup de baleines étaient encore présentes dans le Grand Lagon Sud.

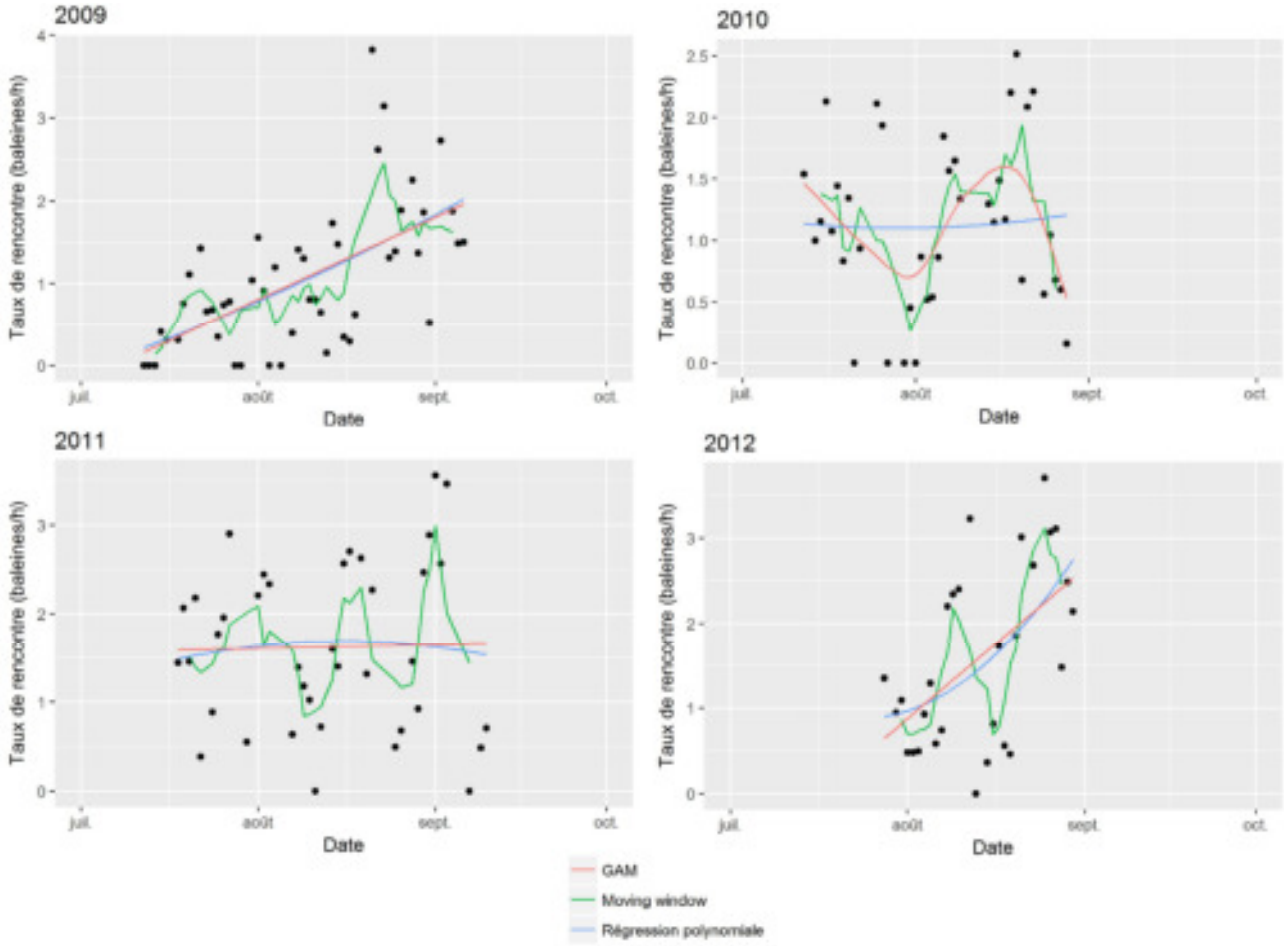


Figure 9. Exemple de variations annuelles du taux de rencontre Tterre calculé à partir des données collectées à terre. Les courbes colorées représentent différentes méthodes de décomposition des séries temporelles (orange = GAM, vert = moyenne mobile, bleu = régression polynomiale).

Par ailleurs, dans la majorité des années, on ne discerne pas un seul pic de fréquentation mais plusieurs pics de faible amplitude. Contrairement aux deux autres méthodes de régression utilisées ici, la méthode d'analyse de séries temporelle par

moyenne mobile montre bien ces fluctuations à fine échelle temporelle (Figure 9). Ces fluctuations à l'échelle journalière masquent donc le signal de « pic » de fréquentation attendu.

En revanche, si l'on combine les taux de rencontre sur l'ensemble des années d'étude, on distingue un pic de fréquentation situé dans la deuxième quinzaine du mois d'août (Figure 10). Globalement, le modèle de régression de type GAMM montre que les variables année et jour de l'année expliquent à elles seules près de 30% de la variabilité du taux de rencontre.

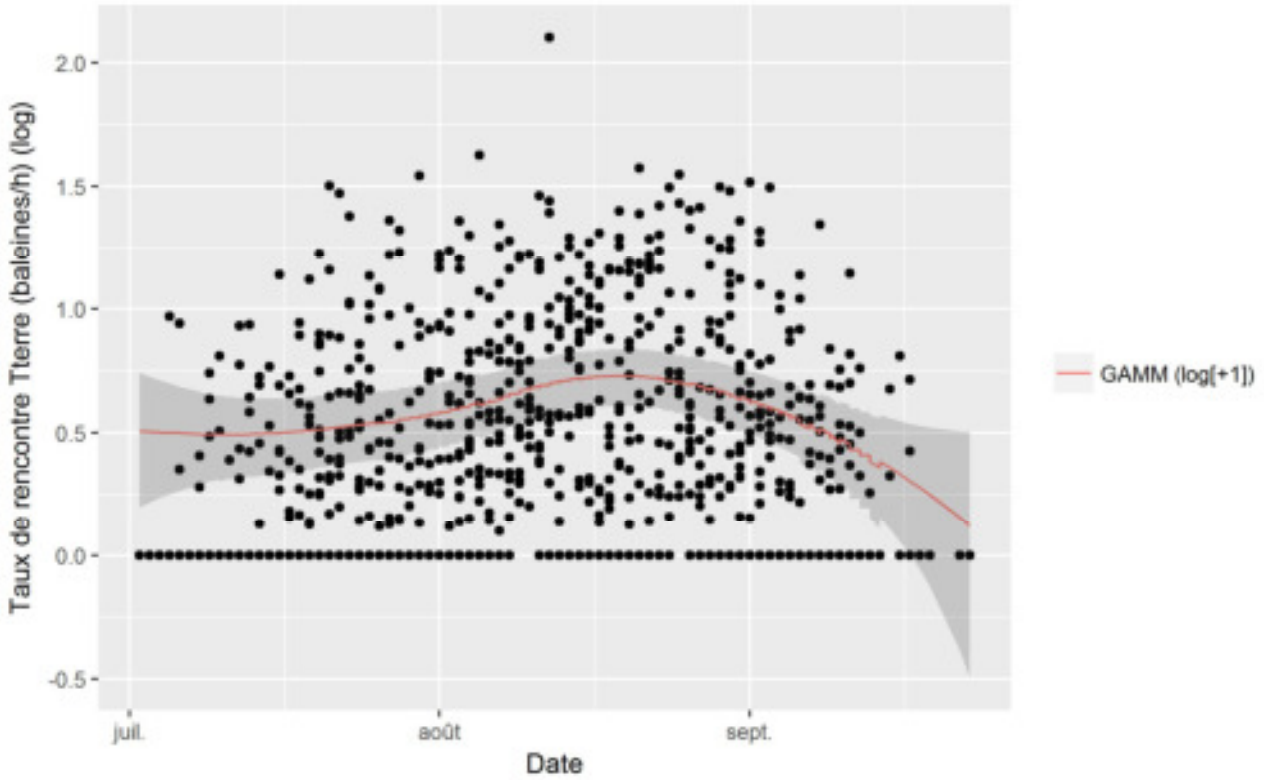


Figure 10. Taux de rencontre pour *Tterre* depuis 1995, toutes années confondues. La courbe rouge représente le GAMM (Generalized Additive Mixed Model) utilisé pour caractériser les variations du taux de rencontre en fonction des variables jours et année. Une transformation logarithmique a été appliquée aux données afin de rendre le profil de la courbe plus visible.

2.3 Conclusions et perspectives

A l'issue de cette analyse de la distribution spatio-temporelle des baleines à bosse dans le Grand Lagon Sud, la zone principalement occupée par l'espèce a pu être identifiée et apparait très **stable d'une année à l'autre**entre1995et2015. Par ailleurs, le **pic de fréquentation qui se situe en moyenne durant la 3ème semaine d'août,** s'est avéré moins net à l'échelle annuelle que ce qui était attendu. Il semble en effet que la fréquentation du Grand Lagon Sud par les baleines à bosse soit soumise à de **fortes fluctuations à l'échelle journalière** qui masquent l'effet global de "pic" attendu dans une zone de reproduction. Ces résultats justifient donc de se pencher sur les effets potentiels de changements environnementaux sur le comportement spatial et temporel des baleines à bosse, non seulement à l'échelle saisonnière mais aussi journalière.

3 LA SELECTION DE L'HABITAT

Rappel des questions : Quelles variables environnementales expliquent la présence de baleines à bosse au sein du Grand Lagon Sud ?

3.1 Traitement des données

La seconde partie de notre étude s'est basée sur la **combinaison des observations effectuées en mer et depuis la terre entre 1995 et 2015**. La position géographique des groupes de baleines observés, les cartes d'intensité d'effort en mer et depuis la terre et les données topographiques du Grand Lagon Sud ont été utilisées.

3.1.1 Cartes annuelles d'intensité d'effort

Pour chaque saison, la carte d'intensité de l'effort en mer et la carte d'intensité de l'effort à terre ont été combinées afin de produire une carte d'intensité d'effort total annuelle. Pour chaque case de coordonnées (*x,y*) de la grille d'effort total pour l'année *t*, on a donc:

$$Effort_{total}(x,y,t) = Effort_{mer}(x,y,t) + Effort_{terre}(x,y,t) * \frac{Tobs_{terre}(t)}{Tobs_{mer}(t)}$$

avec $Effort_{mer}(x,y,t)$ l'intensité de l'effort en mer au point de coordonnées *(x,y)* durant l'année *t*, $Effort_{terre}(x,y,t)$ l'équivalent pour l'effort depuis la terre, et $Tobs_{terre}(t)$ et$Tobs_{mer}(t)$ la durée totale de suivi durant l'année *t* (en heure), pour l'équipe à terre et l'équipe en mer respectivement.

Les **cartes annuelles d'intensité d'effort** ont ensuite été recentrées sur une échelle de 1 à 100% afin d'être comparables entre elles.

3.1.2 Génération de « points de contrôle »

Afin d'étudier les préférences environnementales d'un animal, il est nécessaire de comparer les conditions rencontrées dans les zones où l'espèce est présente, avec les conditions qui sont à sa disposition. On parle d'analyse des zones **utilisées par rapport aux zones disponibles**. La zone disponible doit être échantillonnée afin de décrire l'ensemble des conditions environnementales que l'animal peut rencontrer dans la zone d'étude et de pouvoir comparer ces conditions avec la **niche écologique** effectivement occupée par l'espèce.

A partir des cartes annuelles d'intensité d'effort, un échantillonnage de **"points de contrôle » a été réalisé afin d'échantillonner les conditions environnementales dans la zone disponible pour les baleines**. Ces points de contrôle ont été générés au hasard sur la zone d'étude. La probabilité de "piocher" un point de contrôle dans une case de la

grille d'effort était proportionnelle à l'intensité de l'effort en cette position. Ce protocole d'échantillonnage a donc permis de prendre en compte la variation de la distribution de l'effort d'une année à l'autre. D'autre part, le nombre total de points de contrôle échantillonnés par saison, a été choisi comme proportionnel à la durée totale de suivi durant cette saison. Par conséquent, le ratio de points de présence/contrôle annuel est proportionnel au taux de rencontre annuel.

Cet échantillonnage a été répliqué 1000 fois. Une fois chacun des échantillons de points de contrôle combiné aux points de présence, on obtient donc 1000 jeux de données binomiaux tel que décrit dans la Table 2.

Table 2. Nombre de points de présence et de contrôle utilisés dans la modélisation de la niche écologique des baleines à bosse du Grand Lagon Sud. Les points de présences correspondent aux groupes observés en mer et à ceux uniquement observés depuis la terre.

Saison	# présences	# points de contrôle
1995	33	110
1996	101	357
1997	85	279
1998	62	311
1999	37	291
2000	52	297
2001	73	267
2002	21	167
2003	96	282
2004	21	24
2005	88	257
2006	187	332
2007	254	367
2009	126	252
2010	159	249
2011	247	280
2012	170	213
2013	149	209
2014	49	195
2015	200	233
Total	2210	4972
Moyenne ± Ecart type	110,5 ± 72,7	248,6 ± 81,6

3.1.3 Modèles de niche écologique

Afin de caractériser la niche écologique des baleines à bosse dans le Grand Lagon Sud, les conditions environnementales rencontrées au niveau des positions des 1000 jeux de données de présence/points de contrôle ont été extraites. En particulier, la profondeur, la pente, l'orientation de la pente, la distance à la terre et la distance au récif ont été extrait au niveau des points d'intérêt à partir des rasters décrits en section1.4.1.

La niche écologique a été modélisée en utilisant un **modèle additif généralisé** (GAM, Hastie & Tibshirani, 1990). Cette approche permet de modéliser les relations non-linéaires entre une variable binomiale (présences et points de contrôle) et une série de variables explicatives continues. Ici, six variables sont utilisées: les cinq variables environnementales mentionnées ci-dessus, ainsi que l'année. En effet, l'inclusion de l'année dans le modèle a permis de prendre en compte l'évolution de la fréquentation de la zone entre 1995 et 2015, indépendamment de l'utilisation de l'habitat. Un total de 1000 modèles a été produit (un par jeu de données généré, voir section3.1.2). Chaque modèle est construit à partir de 95% d'un jeu données, puis les performances du modèle sont testées sur les 5% restants, selon une méthode appelée "Monte-Carlo cross validation". Cette séparation du jeu de données entre la portion "entrainement du modèle" et la portion "évaluation du modèle" est une étape essentielle du processus de modélisation.

A partir de ces modèles, des **courbes de sélection de l'habitat** sont produites. Pour cela, chaque variable explicative est analysée tour à tour: l'effet des fluctuations de cette variable sur la probabilité de présence est évalué alors que toutes les autres variables sont fixées à leur moyenne. Ceci permet d'évaluer les **conditions environnementales préférentielles** pour chaque variable présente dans le modèle.

3.2 Résultats

En moyenne, la profondeur, la distance à la terre, la distance au récif, la pente et l'année avaient un effet significatif sur la probabilité de présence de baleines à bosse. Ces paramètres expliquaient en moyenne 8,9 % (± 0,3%) de la déviance des jeux de données d'entrainement et 8,1% (± 2,6%) des jeux de données d'évaluation. La similarité de ces deux métriques démontre la bonne capacité prédictive du modèle. Les baleines à bosse avaient une préférence pour les eaux de 80 à 110m de profondeur, situées à environ 2,5km d'une côte et 10km d'un récif et avec un fond marin présentant une pente intermédiaire d'environ 30°(Figure 11). Enfin, le modèle semble bien prendre en compte une augmentation de la fréquentation (augmentation du taux de rencontre) du Grand Lagon Sud entre 2003 et 2010 environ, puis sa stabilisation dans les années les plus récentes.

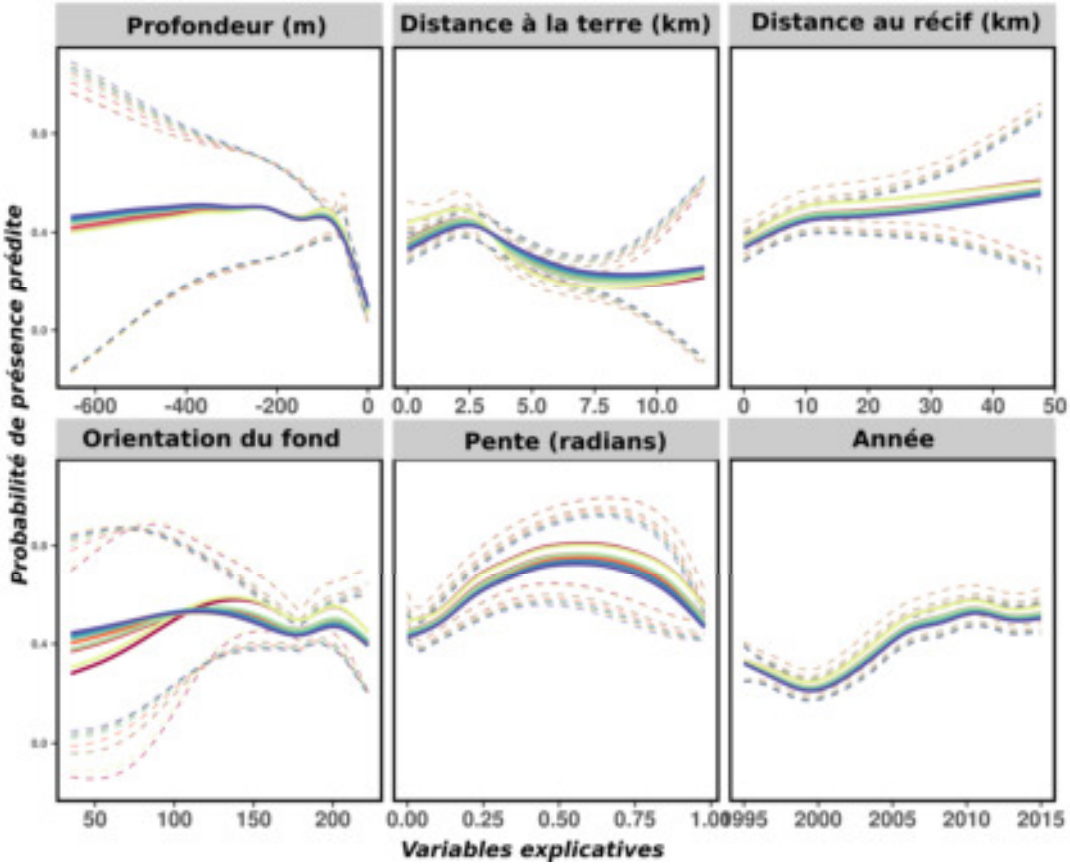


Figure 11. Courbes de sélection de l'habitat par les baleines à bosse visitant le Grand Lagon Sud. Dans chacun des six panneaux, l'ordonnée représente la probabilité de présence des baleines à bosse (comprise entre 0 et 1) et l'abscisse représente une variable explicative du modèle. Les lignes continues représentent les prédictions moyennes obtenues sur les 1000 jeux de données générés (nb: ne pas prêter attention aux couleurs, elles correspondent à des réglages différents du même algorithme statistique). Les lignes en pointillées correspondent aux intervalles de confiance à 95% calculés sur les prédictions. Plus l'intervalle entre les lignes continues et les lignes en pointillés augmente, plus l'incertitude sur la relation modélisée est importante.

3.3 Conclusions et perspectives

La modélisation de la niche écologique des baleines à bosse dans le Grand Lagon Sud a révélé une **préférence pour des eaux relativement peu profondes (80m) et proches de la côte**, en accord avec d'autres études similaires menées dans le Pacifique (Smith et al., 2012; Lindsay et al., 2016). Malgré la proximité avec la côte, les baleines semblent cependant **favoriser des eaux ouvertes sur le large présentant des influences océaniques** et non entouréesde récifs, ce qui expliquerait donc la **faible fréquentation de la réserve Merlet**. La présence de "plateaux" dans les courbes de sélection d'habitat prédit également une fréquentation relativement importante des eaux plus profondes et plus éloignées de la côte. Sachant que les baleines à bosse se concentrent également sur les monts sous-marins du Sud de l'ile des Pins (Garrigue et al., 2015), il est possible que la fréquentation de la zone semi-océanique séparant la baie de Prony de ces monts sous-marins soit relativement importante mais simplement hors de portée lors de sorties de recherche en bateau réalisée à la journée depuis Prony et invisible depuis le cap N'Doua.

4 L'EFFET DES VARIATIONS CLIMATIQUES

Rappel des questions : Les variations interannuelles de distribution spatiale des baleines à bosse dans le Grand Lagon Sud peuvent-elles être corrélées à des phénomènes climatiques annuels tels que ENSO (El NiñoSouthern Oscillation)?

Les fluctuations environnementales (vent et température) peuvent-elles avoir un effet sur la fréquentation du Grand Lagon Sud par les baleines à l'échelle journalière?

4.1 Traitement des données

4.1.1 Caractérisation des fluctuations environnementales dans le Grand Lagon Sud

Des cartes de température de surface ont été produites à forte résolution spatiale (grille de 1x1km) grâce aux données de MURSST satellitaires. Ces cartes ont été compilées afin d'établir une carte de la **température de surface moyenne hivernale** (entre juillet et septembre) sur la période 2003-2015. Une carte de l'écart type sur cette moyenne a également été calculée afin de caractériser la variabilité des conditions de température dans la région.

La température de surface a été extraite à partir des cartes de OISST et de MURSST dans un rayon de 12km autour de l'ilot Ugo (166,93°E; 22,46°S, Figure 1), au cœur de la distribution des baleines à bosse dans le Grand Lagon Sud. Afin d'estimer les **fluctuations journalières de température** dans la région, la MURSST (relevée avec une meilleure résolution que la OISST) a été représentée sous forme de séries temporelles par année (avec un pas de temps journalier).

Afin de caractériser les **fluctuations annuelles de température** dans la région, la MURSST et la OISST ont été moyennées mensuellement puis ces moyennes ont été comparées aux moyennes mensuelles calculées à partir de la balise de Goro (GOROSST, Figure 1). Trois séries temporelles ont ainsi été obtenues et représentées conjointement afin de classifier les années en 3 catégories: les **années les plus chaudes**, les **années les plus froides** et les **années de température intermédiaires**.

Enfin, cette classification a été mise en correspondance avec le ***Southern Oscillation Index* (SOI)**, un indice atmosphérique permettant d'établir les fluctuations du **phénomène ENSO** dans le Pacifique.

4.1.2 Effet des fluctuations annuelles sur la distribution spatiale

Cette section porte sur l'impact des **fluctuations de température observées à l'échelle annuelle** en relation avec le phénomène ENSO, sur l'utilisation des habitats par les baleines à bosse. En effet, on pose l'hypothèse que les baleines s'adaptent aux changements de température en utilisant l'espace lagonaire différemment.

Les jeux de données de présence/contrôle décrits en section 3.1.2 ont été divisés par années et répartis en trois sous-ensembles: les années chaudes (1998, 2010), les années froides (1996, 2006) et les années moyennes.

Des **modèles de niche écologiques distincts** ont été produits sur ces trois sous-ensembles suivant la même méthode qu'en section 3.1.3. Au vu des résultats obtenus précédemment sur l'ensemble de la période d'étude, les modèles généralisés additifs ont ici simplement été appliqués à deux variables explicatives: la **distance à la terre** et la **profondeur**.

Les **courbes de sélection d'habitat** ont été calculées et comparées entre les 3 sous-ensembles d'années. En cas de changement de comportement spatial en réponse aux fluctuations de température, les courbes devraient présenter des pics à différentes valeurs pour les 3 sous-ensembles. Ceci démontrerait en effet un changement dans la distance à la terre et/ou la profondeur préférentielle en réponse aux changements de température.

4.1.3 Effet des fluctuations journalières

Des **modèles GAM** ont été construits afin d'estimer le lien entre le taux de rencontre journalier *Tterre* (Cf section 2.1.2) et la MURSST d'une part, ou le vent d'autre part. Cette analyse est menée sur les données allant de 2002 à 2015. Dans chacun de ces deux modèles, l'année et le jour de l'année ont également été utilisés comme variables explicatives. En effet, il est important d'incorporer ces variables temporelles dans les modèles afin d'exclure leur effet confondant et d'extraire l'effet des variables environnementales (vent et SST) indépendamment du moment auquel l'observation a lieu.

La qualité des modèles est évaluée grâce au R^2 (mesurant le niveau d'ajustement du modèle aux données), au Critère d'Akaike (AIC : mesure de la qualité d'un modèle sur un critère de parcimonie, le modèle d'AIC le plus faible est sélectionné) et à la variance expliquée. Les GAM ont été appliqués avec une méthode de lissage de courbe de type REML et une famille de distribution de type gaussienne.

Enfin, chaque modèle a été testé avec plusieurs « **décalages** » dans la série temporelle des taux de rencontre. L'objectif est, par exemple, de déterminer si un vent d'ouest fort peut avoir une influence sur le taux de rencontre observé le lendemain ou le surlendemain dans le Grand Lagon Sud. Pour cela, on modélise successivement le taux de rencontre au jour *i* en fonction des conditions au jour *i*, puis au jour *i-1*, puis au jour *i-2*, etc.

4.2 Résultats

4.2.1 Caractérisation des fluctuations environnementales

En moyenne le Grand Lagon Sud est caractérisé en hiver austral par des températures de surface entre 22,0 et 22,4°C (Figure 12). La zone la plus froide se situe autour de l'Ile Ouen. Sur la côte Est on constate la présence d'eaux plus chaudes apportées par le courant du Vauban. Ce courant est particulièrement instable comme en dénote la carte de

l'écart type de la température de surface entre deux saisons dans la Figure 12. A l'opposé, la zone centrale du Grand Lagon Sud présente l'écart type le plus faible et donc les conditions de température les plus stables. La terre et les récifs émergés apparaissent en blanc.

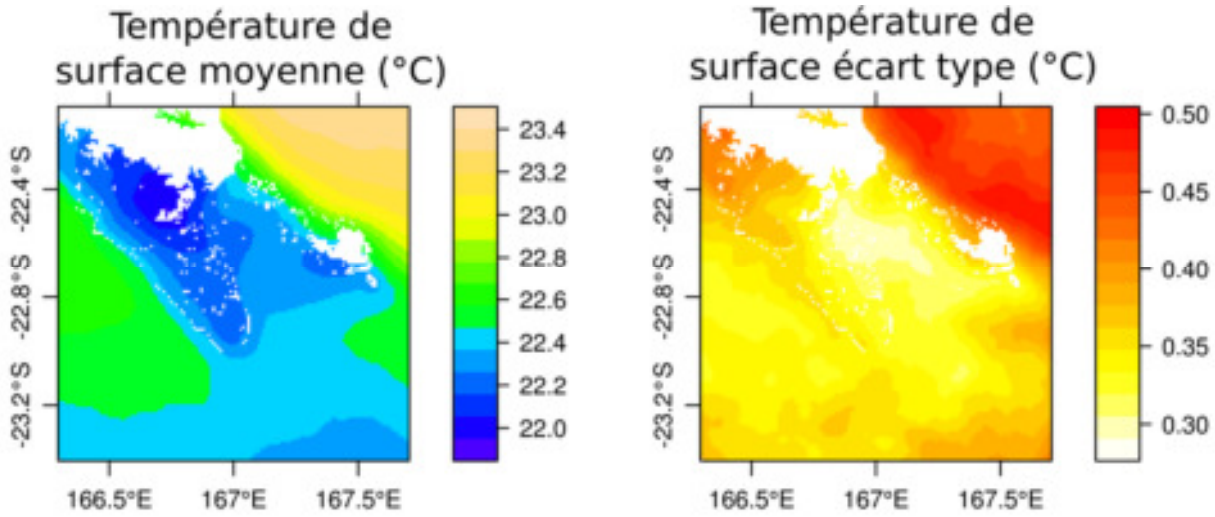


Figure 12. Cartes des températures de surface moyenne et de son écart type calculées à partir des images satellitaires MURSST pour la période 2003-2015 entre Juillet et Septembre.

A une échelle annuelle, les températures de surface moyennes mesurées localement évoluent d'une année à l'autre (Figure 13). On constate que les températures mesurées au niveau de la balise de Goro (GOROSST) sont généralement supérieures à celles mesurées par les satellites autour de l'ilot Ugo (MURSST et OISST). Sachant que la balise de Goro se situe à l'extérieur de la passe de la Havanah, ce résultat est en adéquation avec les données de température moyennes observées dans la Figure 12.

De façon générale, on observe cependant une forte cross-corrélation[8] entre les séries temporelles issues des trois sources de données (Figure 13). Les années 1998 et 2010 étaient les plus chaudes (OISST moyenne: 24,03°C et 23,74°C respectivement) et correspondaient à des années La Niña. Les années 1996 et 2006 étaient les plus froides (OISST moyenne: 22,35°C et 22,21°C respectivement) et correspondaient à des années El Niño.

Par ailleurs, les valeurs journalières moyennes de SST mettent en évidence le cycle saisonnier d'évolution de la température dans le Grand Lagon Sud (Figure 14). Dans l'ensemble, la température baisse de juillet à aout, puis remonte en septembre, marquant la fin de l'hiver austral en Nouvelle-Calédonie. Des fluctuations de plus faibles amplitude sont cependant visibles sur un pas de temps de quelques jours, par exemple fin juillet 2008.

Enfin, l'analyse du régime des vents enregistré au phare Amédée permet de mettre en évidence la dominance de l'alizée (de 75 à 135°) dans le Grand Lagon Sud de Nouvelle-Calédonie, et le caractère exceptionnel des évènements de coups d'Ouest (Figure 15).

[8] Cross-corrélation : similarité entre deux séries temporelles d'un signal définit sur la même période de temps.

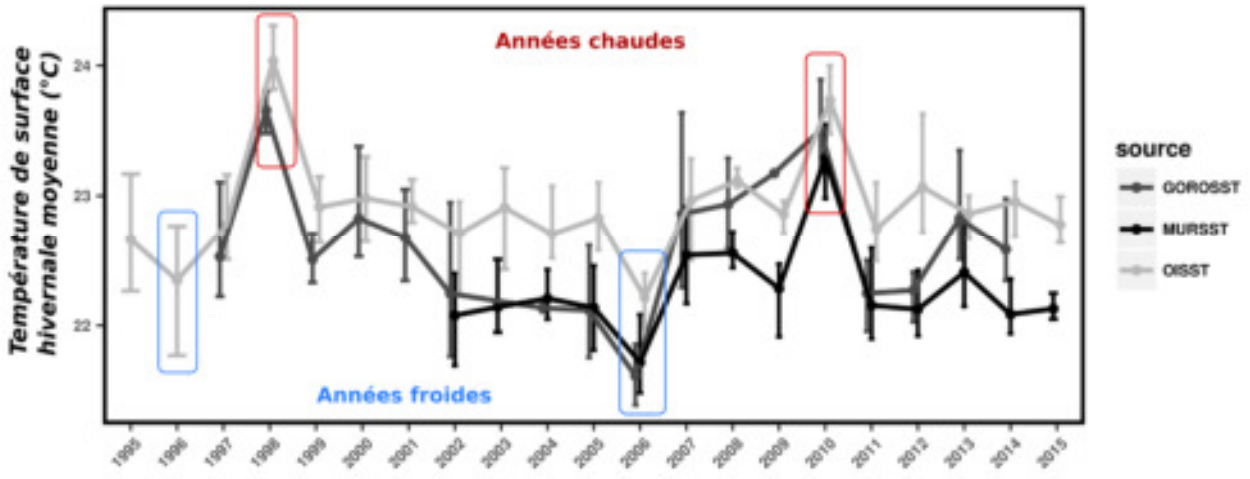


Figure 13. Température de surface moyennée autour de l'îlot Ugo situé à proximité du cap N'Doua, entre juillet et septembre de chaque année. Les températures sont calculées à partir de trois sources de données: une *in situ* (GOROSST) et deux satellitaires (MURSST et OISST). Le centre de chaque barre représente la température moyenne, et les extrémités des barres représentent le minimum et le maximum observés. Les années les plus chaudes et les plus froides retenues pour les modèles de fluctuations annuelles sont représentées en rouge et en bleu.

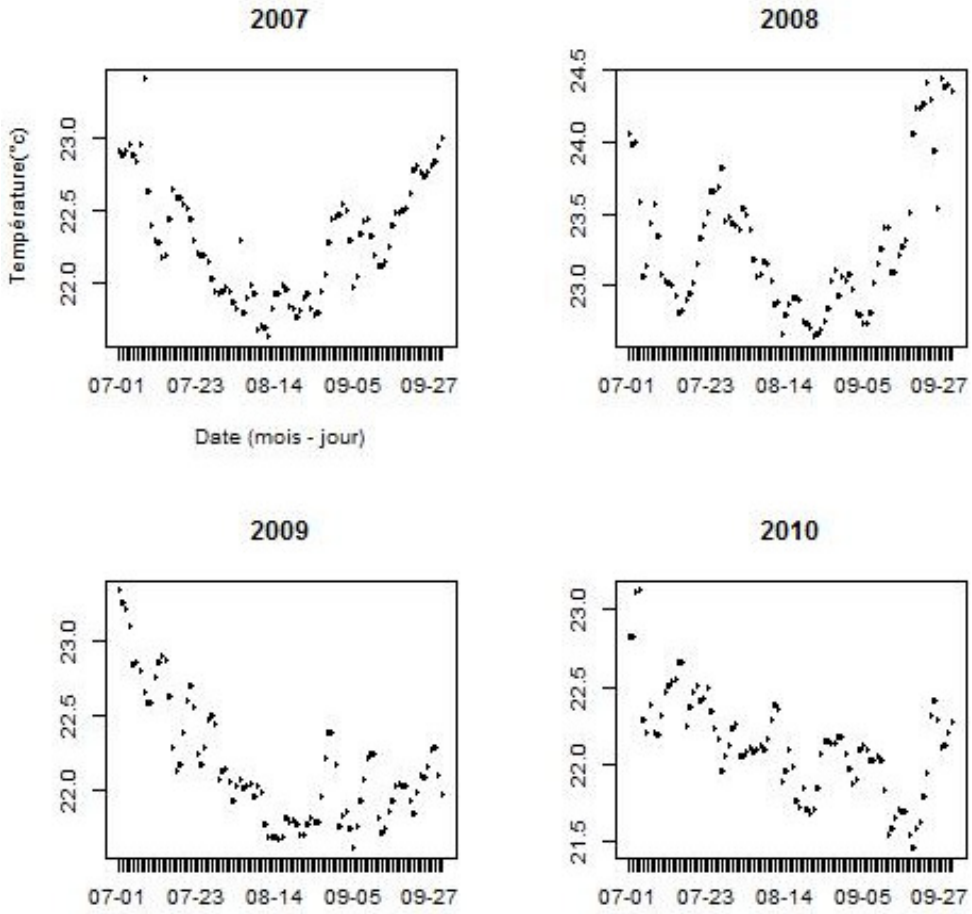


Figure 14.Température de surface MURSST enregistrée autour de l'ilot Ugo, situé à proximité du cap N'Doua, entre juillet et septembre de chaque année. Les données journalières sont représentées pour quatre années consécutives (2009 – 2012).

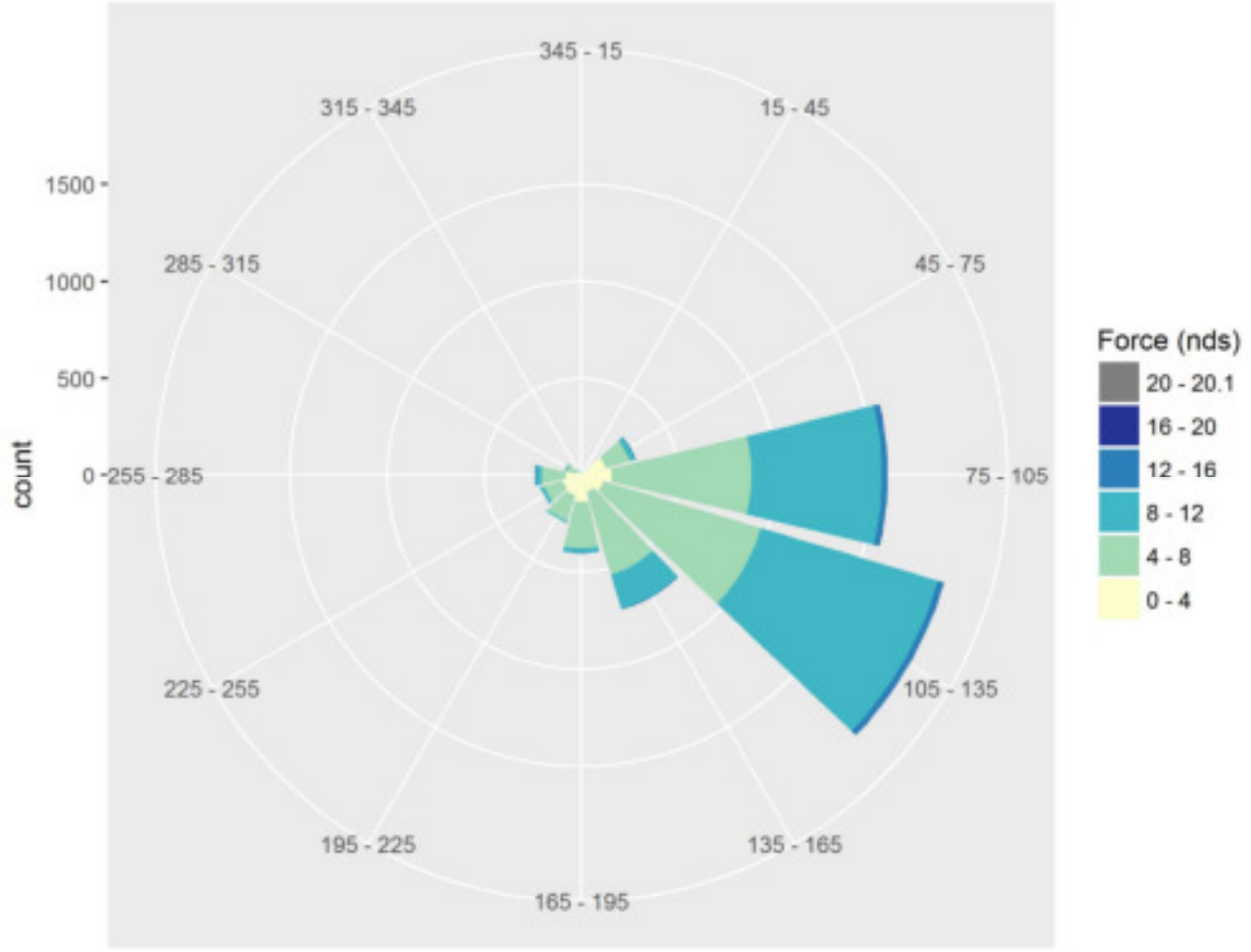


Figure 15. Représentation de la répartition journalière du régime des vents au phare Amédée (1995 à 2016).La direction du vent est symbolisée par les barres colorées, chacune représentant une fourchette de 30° dont les limites sont spécifiées le long du périmètre du cercle (0° = Nord). La longueur des barres représente le nombre de jours correspondant à chaque fourchette, et la couleur représente la force du vent dans chaque fourchette.

4.2.2 Effet des fluctuations annuelles sur la distribution spatiale

La déviance expliquée par les modèles était comprise entre 11,87 et 9,23% pour le sous-ensemble d'années chaudes, entre 10,27 et 9,18% pour le sous-ensemble d'années moyennes, et entre 7,97 et 6,85% pour le sous-ensemble d'années froides. Les courbes de sélection de l'habitat (Figure 16) présentaient un profil très plat pour la distance à la terre, en directe conséquence de la faible contribution de ce paramètre aux modèles. D'autre part, les courbes de sélection de la profondeur semblaient différentes pour les 3 sous-ensembles d'années mais les intervalles de confiance sur ces prédictions étaient trop grands pour permettre une interprétation écologique. Il semble donc que les préférences d'habitats des baleines relatives à la distance à la terre et la profondeur ne soient pas affectées par les fluctuations de température à l'échelle annuelle.

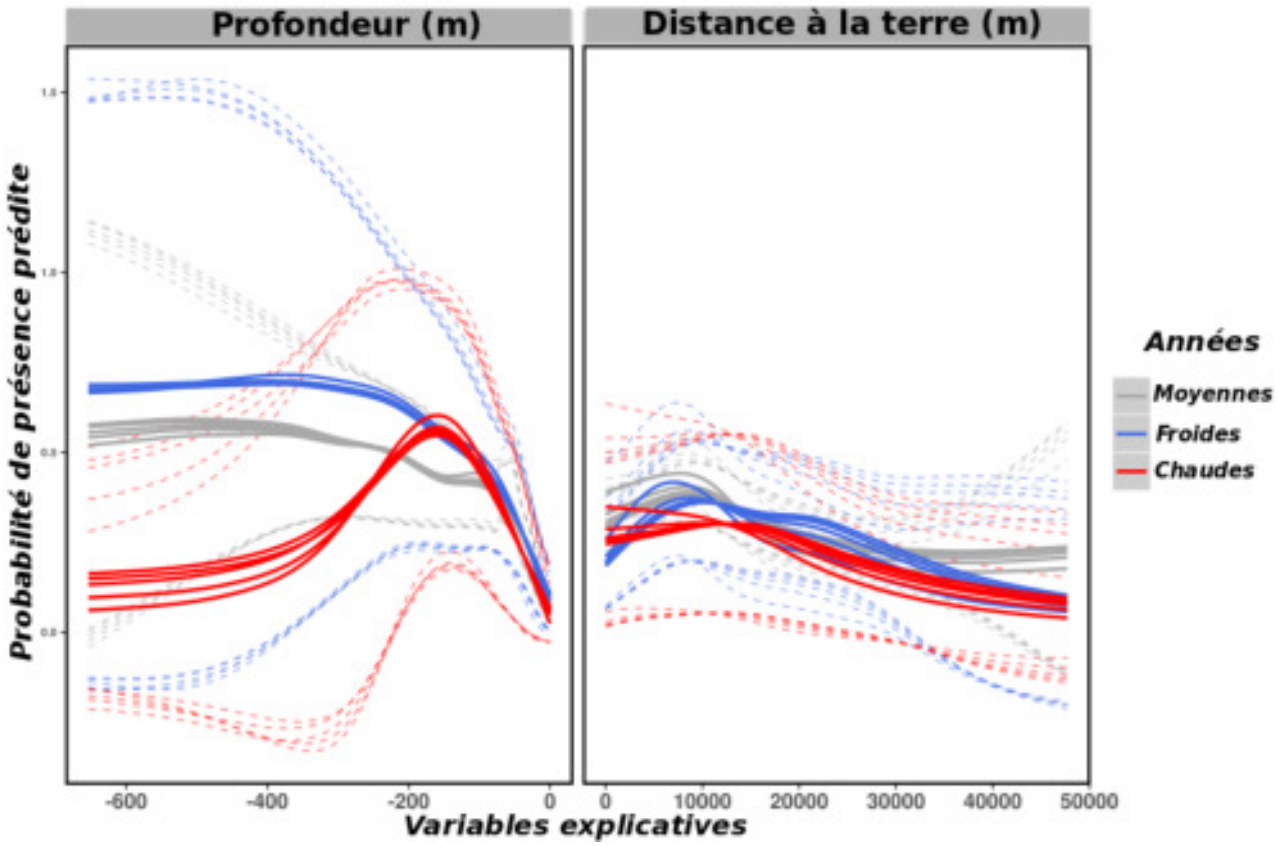


Figure 16. Superposition des courbes de sélection de l'habitat par les baleines à bosse du Grand Lagon Sud durant 3 types d'années: les années chaudes (1998 & 2010, en rouge), les années froides (1996 & 2006, en bleu) et les années intermédiaires (en gris). Dans les deux panneaux, l'ordonnée représente la probabilité de présence des baleines à bosse (comprise entre 0 et 1) et l'abscisse représente une variable explicative du modèle. Les lignes continues représentent les prédictions moyennes obtenues sur les 1000 jeux de données générés (nb: les 5 lignes par couleur correspondent à des réglages différents du même algorithme statistique, ne pas en tenir compte). Les lignes en pointillées correspondent aux intervalles de confiance à 95% calculés sur les prédictions. Plus l'intervalle entre les lignes continues et les lignes en pointillés augmente, plus l'incertitude sur la relation modélisée est importante.

4.2.3 Effet des fluctuations journalières sur la fréquentation

Les modèles de taux de rencontre journalier en fonction du vent et de la SST ont été construits sur 468 jours de données Tterre.

Les modèles GAM incluant la SST comme variable explicative semblent avoir une efficacité globalement comparable au modèle nul n'incluant que le jour et l'année. En effet, l'AIC diminue peu dans ces modèles (de 1127,9 à 1124,6 pour un décalage de 0), et la variance expliquée n'augmente pas beaucoup (de 32,8% à 34.8% pour un décalage de 0). Cet effet diminue encore pour un décalage de 1 ou 2. Globalement, la SST semble donc avoir un effet très limité sur le taux de rencontre (valeur-p =0.049 à décalage 0). On distingue une température préférentielle, entre 22,5 et 23°C à laquelle le taux de rencontre est plus important (Figure 17).

Les modèles GAM incluant les variables relatives au vent suggèrent une influence significative de la direction du vent sur le taux de rencontre, indépendamment de sa force (diminution de l'AIC de 1127,9 à 720). La direction du vent mesurée le jour même (valeur-p = 0,008) et la veille (valeur-p = 0,002) affectent donc significativement la fréquentation du Lagon Sud. La variance expliquée par les variables année, jour, direction et force du vent atteint globalement 47%. Le taux de rencontre est maximal pendant les vents d'alizés (100-150° = direction Sud-Est) et diminue par vent d'ouest (Figure 18).

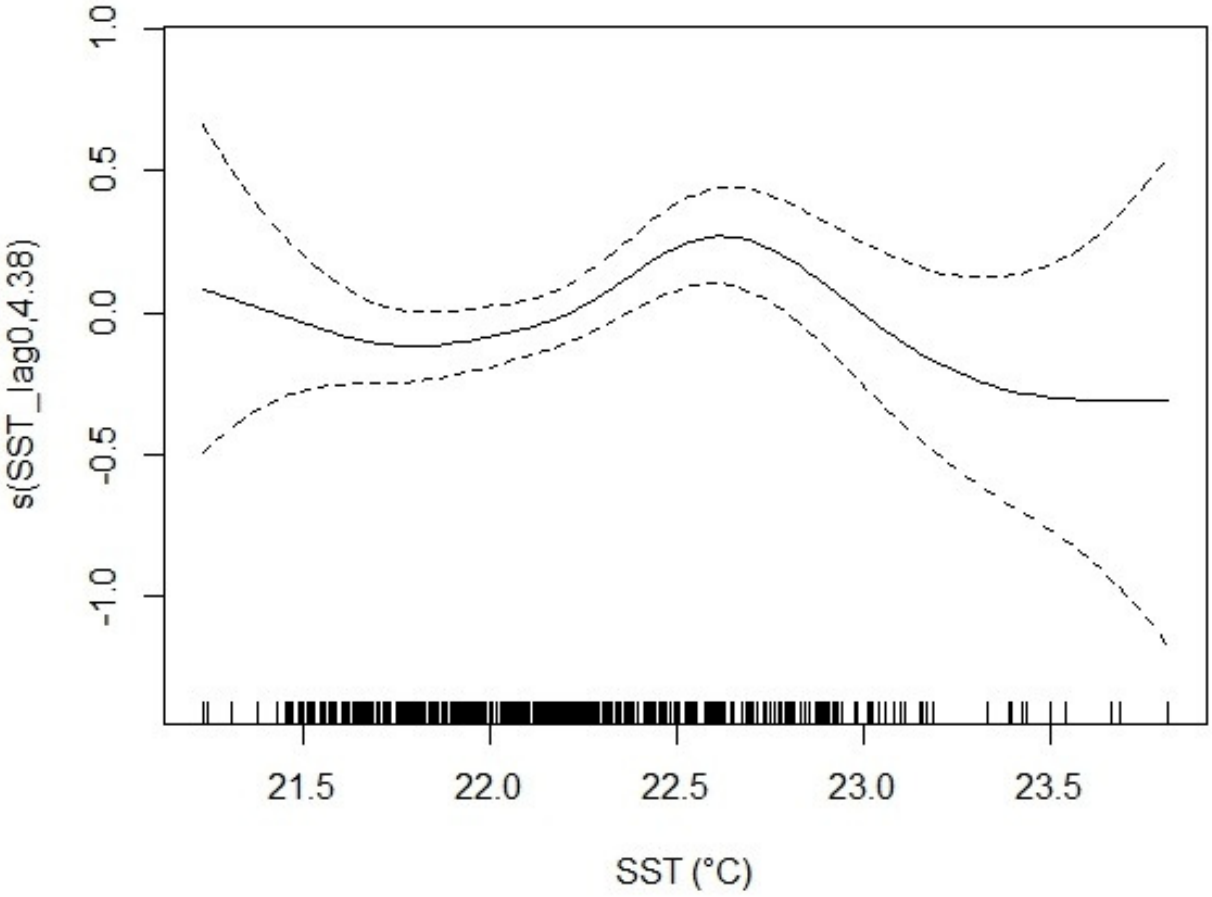


Figure 17. Courbe de réponse partielle de la fréquentation en fonction de la SST pour le GAM avec un décalage de 0 jours. L'axe des ordonnées représente le taux de rencontre prédit par le modèle lorsque la SST varie (avec jour et année fixés à leur moyenne). Cet axe est recentré sur 0. Le long de l'axe des abscisses, un « rug plot » représente la distribution de la variable SST dans le jeu de données. Chaque trait vertical est séparé du suivant par 1 % des données.

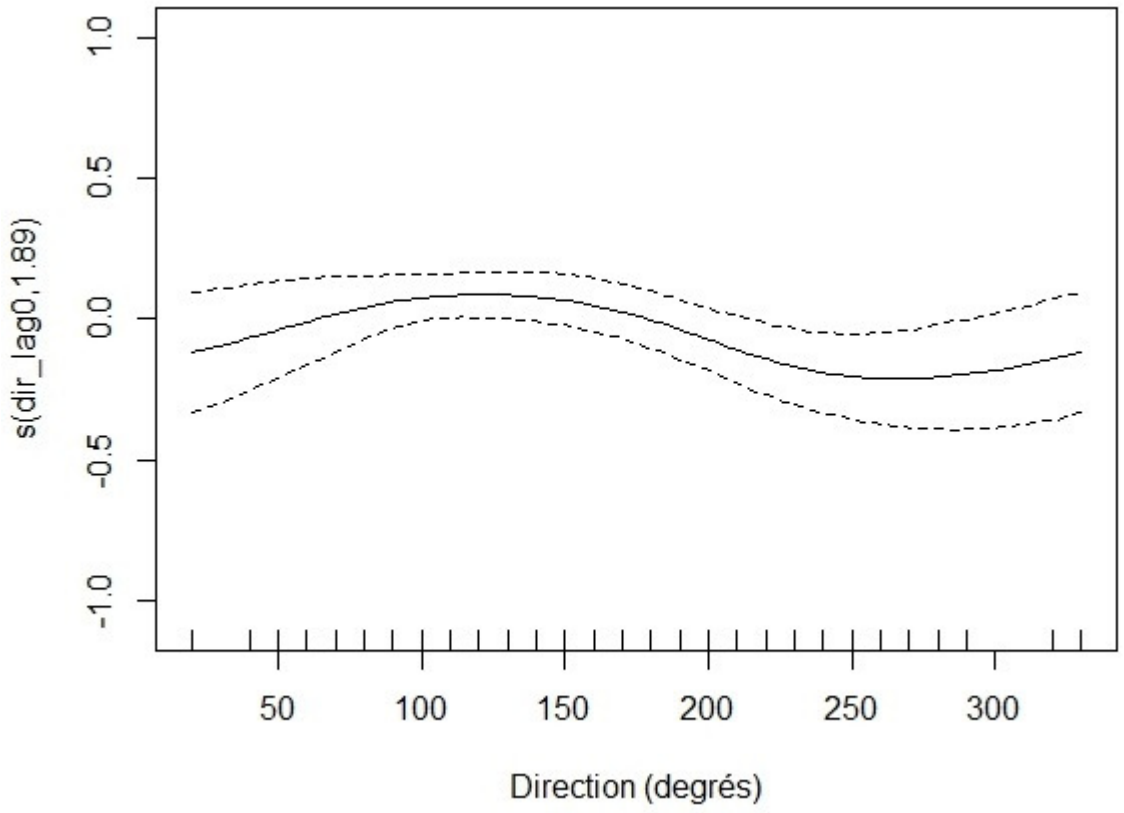


Figure 18. Courbe de réponse partielle à la direction du vent pour le GAM à décalage 0. L'axe des ordonnées représente le taux de rencontre prédit par le modèle lorsque la direction du vent varie (avec jour, année et force du vent fixés à leur moyenne). Cet axe est recentré sur 0. Le long de l'axe des abscisses, un « rug plot » représente la distribution de la variable « direction du vent » dans le jeu de données. Chaque trait vertical est séparé du suivant par 1 % des données. Etant donné que la direction du vent suit une répartition de 10° en 10°, cela crée une graduation régulière

4.3 Conclusions et perspectives

Le Grand Lagon Sud apparait comme une **région dynamique**, présentant des fluctuations de conditions océaniques à des échelles variées.

D'une saison à l'autre, des **changements de température de surface moyenne de plus de 2°C** ont été observés en lien avec le phénomène ENSO. Spatialement, l'intensité de ces variations peut être atténuée ou au contraire amplifiée selon que l'on se situe dans la zone proche de la baie de Prony et de l'Ile Ouen qui montre une certaine stabilité, ou au niveau de la passe de la Havanah, particulièrement dynamique. Cependant, **l'utilisation des habitats par les baleines à bosse à l'échelle saisonnière n'a pas semblé être affectée par ces changements de température**. Ce résultat pourrait être expliqué par une forte **plasticité** des baleines à bosse aux fluctuations de température au sein de leur zone de reproduction.

D'un jour à l'autre, d'importants changements du taux de fréquentation ont en revanche été observés dans la zone côtière du Grand Lagon Sud. Le régime de vent explique partiellement ces variations **: le taux de rencontre diminue quand les alizés dominants tournent, entre autres lors des coups d'Ouest**. Il est peu probable que la

direction du vent ait un effet direct sur la physiologie ou le comportement des baleines à bosse, des animaux aquatiques. Le rôle de cette variable est plus probablement indirect, c'est-à-dire que **la direction du vent agit sur l'hydrologie dans le Grand Lagon Sud**, ce qui a un effet sur les baleines à bosse. Plusieurs études ont mis en évidence les liens entre le vent et la circulation de masses d'eaux dans le Lagon Sud (Douillet et al, 2001 ; Pinazo et al, 2004). Hénin et Cresswell (2005) ont de plus montré le lien entre la dominance d'alizée et la présence d'un upwelling à l'ouest du lagon Sud, à l'extérieur de la barrière de corail, ainsi que la contre-influence d'évènements de coups d'ouest sur ce phénomène hydrologique. Il est probable que des fluctuations hydrologiques de ce type au sein du Lagon Sud soient responsables d'ajustement de distribution opérés par les baleines à bosse, se traduisant ainsi dans nos modèles par une influence significative de la direction du vent. Bien que le lien entre température et fréquentation du lagon soit ténu, **les animaux semblent favoriser les eaux entre22,5 et 23°C**. Cependant, cette relation n'explique qu'une faible partie de la variabilité observée dans la fréquentation journalière. Le **développement de nouveaux systèmes de télémétries à plus forte résolution, les "GPS fast-locs"** pourraient apporter davantage de réponses à ces fluctuations de fréquentation de la zone côtière en nous permettant d'appréhender les mouvements à fine échelle des baleines à bosse dans le Sud de la Nouvelle-Calédonie. En effet, contrairement aux balises ARGOS utilisées par le passé pour suivre les déplacements des baleines à bosse, les balises de type « GPS fast-locs » pourront enregistrer les positions géographiques des animaux à quelques mètres près (au lieu de quelques kilomètres pour la technologie ARGOS).

5 LA SÉGRÉGATION SOCIALE

Rappel des questions : La distribution et l'utilisation des habitats des baleines à bosse dans le Grand Lagon Sud répondent-elles à des facteurs sociaux ? Les femelles accompagnées d'un baleineau utilisent-ils l'espace différemment du reste de la population ?

5.1 Traitement des données

La partie 5de l'étude s'est concentrée sur les **données collectées en mer** dans le Grand Lagon Sud de 1995 à 2015 (Figure 19). Cette analyse utilise la position géographique et l'heure à laquelle les groupes de baleines ont été rencontrés en mer, en lien avec les caractéristiques du milieu.

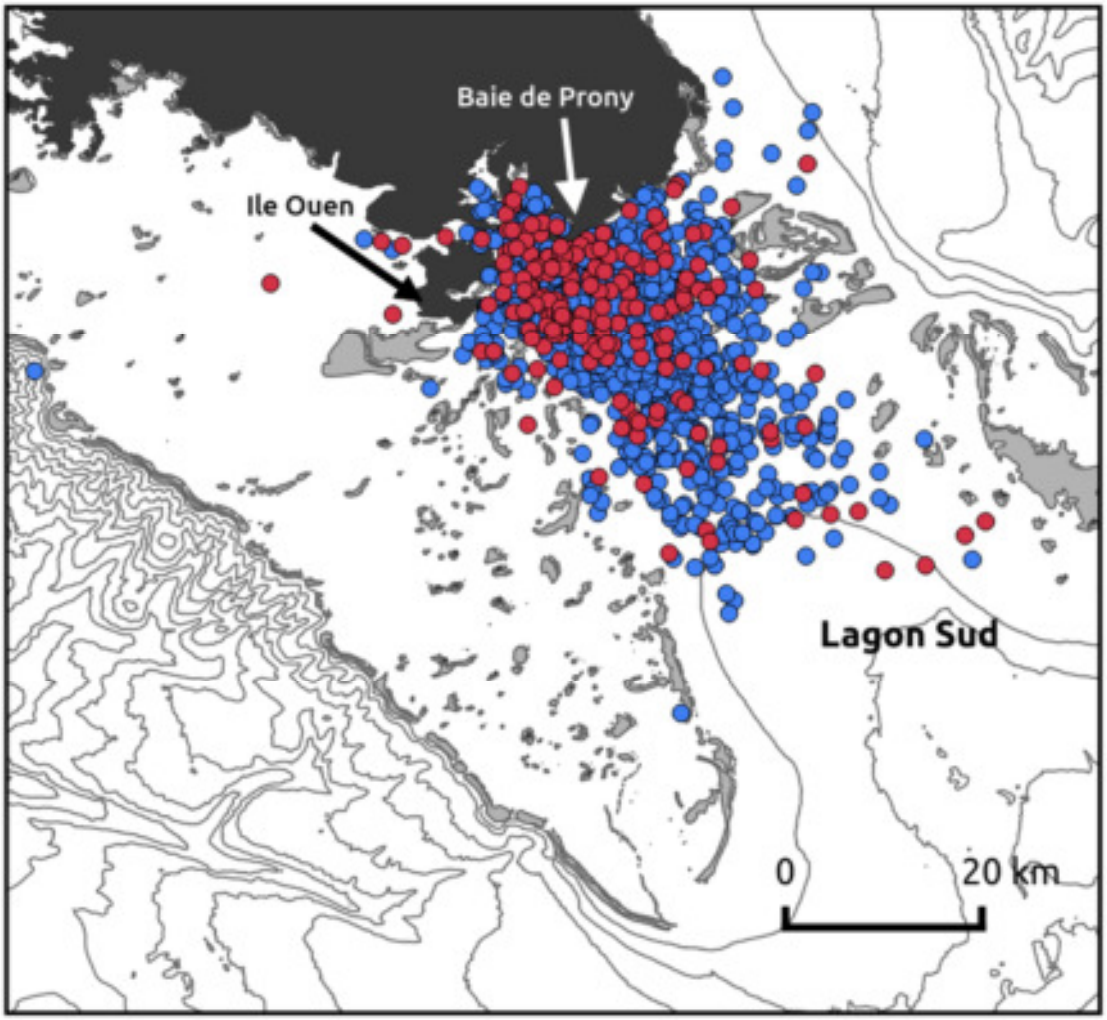


Figure 19. Distribution géographique des groupes de baleines à bosse observés lors des missions en mer conduites entre 1995 et 2015 (n=1312). Les groupes avec maman-petit apparaissent en rouge (n=206) et les groupes sans maman-petit apparaissent en bleu (n=1106).La terre est représentée en gris foncé, les récifs émergés en gris clair et les isobathes tous les 200m en lignes grises.

5.1.1 Étude du comportement d'évitement entre groupes sociaux

Dans un premier temps, le **comportement des animaux les uns vis-à-vis des autres** a été évalué et en particulier pour voir si les **mères-baleineau**(noté MP) s'isolaient spatialement des autres animaux présents dans la zone de reproduction. Plus spécifiquement, la **distance séparant les groupes** incluant une maman et son petit (**G_{avecMP}**) et ceux n'en ayant pas (**G_{sansMP}**) a été calculée, puis ces distances ont été moyennées sur l'ensemble des jours d'étude. Afin de prendre en compte la dimension temporelle des observations s'étalant sur une journée, la distance entre groupes divisée par le temps écoulé entre leur observation a également été estimée. Le test non-paramétrique de Kruskal-Wallis a été utilisé afin de tester la significativité des comparaisons de distances ou distance/temps entre groupes sociaux.

5.1.2 Estimation de l'habitat occupé

La probabilité de rencontrer un groupe avec MP en un lieu donné a été modélisée en fonction de quatre paramètres environnementaux: **la distance à la terre, la distance au récif, la profondeur et la pente des fonds marins**. Dans un premier temps, les variables environnementales extraites aux positions où ont été observés les groupes avec ou sans maman-petit ont simplement été comparées à l'aide de **diagrammes en boîtes** et de **tests de Kruskal-Wallis.** Dans un second temps, une approche de type "**Modèle Généralisé Additif**" (GAM) a été favorisée car elle permet de modéliser des relations complexes, à partir de données de type varié (Hastie & Tibshirani, 1990). Cette approche permet en particulier de modéliser une variable de type binomiale, tantôt égale à 0 (pour un groupe sans MP) ou égale à 1 (pour un groupe avec MP). Cette partie de l'analyse se limite aux groupes de baleines observés durant la seconde partie de chaque saison de reproduction (après le 15 août), afin de se concentrer sur une période où le rapport entre nombre de groupes avec ou sans MP est le plus proche de 1.

5.1.3 Estimation du modèle de ségrégation spatiale

Des préférences d'habitat différentes d'un groupe social à l'autre peuvent avoir des répercussions en termes de distribution géographique. La méthode de "***Permissive Home Range Estimation***" **(PHRE)** ou Domaine Vital Permissif (Tarjan & Tinker, 2016) a été utilisée afin de visualiser les **zones préférentiellement utilisées par les groupes avec ou sans MP** au sein du Grand Lagon Sud. Cette approche se base sur les conditions environnementales favorisées par un groupe d'individus (ici par exemple la préférence pour une certaine profondeur observée chez un type de groupe social donné) pour estimer sa répartition géographique. Ici, le PHRE a été appliqué aux mêmes variables environnementales que celles utilisées dans le GAM. Nous avons ainsi cartographié les zones préférentiellement occupées par les deux types de groupes de baleines avec ou sans baleineau, G_{avecMP} et G_{sansMP}, puis estimé les endroits où ces zones se recouvraient. Cette partie de l'analyse se limite également aux groupes de baleines observés durant la seconde partie de chaque saison de reproduction (après le 15 août).

5.2 Résultats

Un total de 1312 groupes de baleines a été observé en mer au cours de la période d'étude, comprenant 716 jours étalés sur 20 ans (Table 3). Le nombre de groupes observés avec MP était généralement plus important que le nombre de groupes sans MP (55 vs 10 groupes par an en moyenne). Les groupes avec MP étaient en majorité des groupes comprenant simplement une mère et son petit (14% ± 7,Table 4). Les groupes constitués d'une maman-petit et accompagnée d'une escorte adulte (3% ± 1) ou d'une maman-petit accompagnée d'un groupe compétiteur(2% ± 1) étaient moins fréquents (Table 4).

Table 3. Effort d'échantillonnage et nombre de groupes de baleines observés dans le Grand Lagon Sud par an (#G_{avecMP} = nombre de groupes incluant une maman-petit, #G_{sansMP} = nombre de groupes n'incluant pas de maman-petit). Nb: pas de recherche en mer en 2008.

Saison	Effort en mer (jours)	#G_{sansMP}	#G_{avecMP}
1995	27	20	4
1996	55	46	10
1997	44	46	5
1998	50	41	3
1999	46	18	8
2000	45	34	8
2001	40	47	3
2002	27	12	6
2003	39	59	14
2004	5	21	0
2005	33	53	10
2006	41	92	9
2007	47	96	25
2009	32	65	5
2010	34	85	7
2011	38	110	22
2012	29	77	20
2013	25	78	15
2014	28	31	9
2015	31	75	23
Total	716	1106	206
Moyenne ± Ecart type	35,8 ± 11,2	55,3 ± 28,6	10,3 ± 7,2

Table 4. Types de groupes sociaux observés dans le Grand Lagon Sud au cours de toutes les saisons de recherche conduites entre 1995 et 2015. Les pourcentages moyens sont donc calculés sur n=20 ans.

	% moyen	écart type
G_{avecMP}	16,79	7,79
Maman + petit	14	7,2
Maman + petit + escorte	2,76	1,18
Maman + petit + groupe compétiteur	1,99	1,24
G_{sansMP}	84,05	8,47

5.2.1 Interactions entre groupes

Au cours des différents jours d'étude, la distance entre les groupes avec MP était en moyenne significativement plus faible que celle entre les groupes avec MP et groupes sans MP (test de Kruskal-Wallis: Chi2 = 12,45, valeur-p = 0,01**). Les groupes contenant des mamans-petits avaient donc tendance à éviter spatialement les autres groupes (paires, groupes reproducteurs et individus solitaires, Figure 20). Si l'on prend en compte le temps écoulé entre chaque observation, il apparait que la distance divisée par le temps calculé entre chaque groupe ne diffère pas en fonction du type social (test de Kruskal-Wallis: Chi2=3,55, valeur-p = 0,47;Figure 20). Cela signifie que les groupes contenant des mamans-petits se retrouvent rarement au même endroit au même moment de la journée.

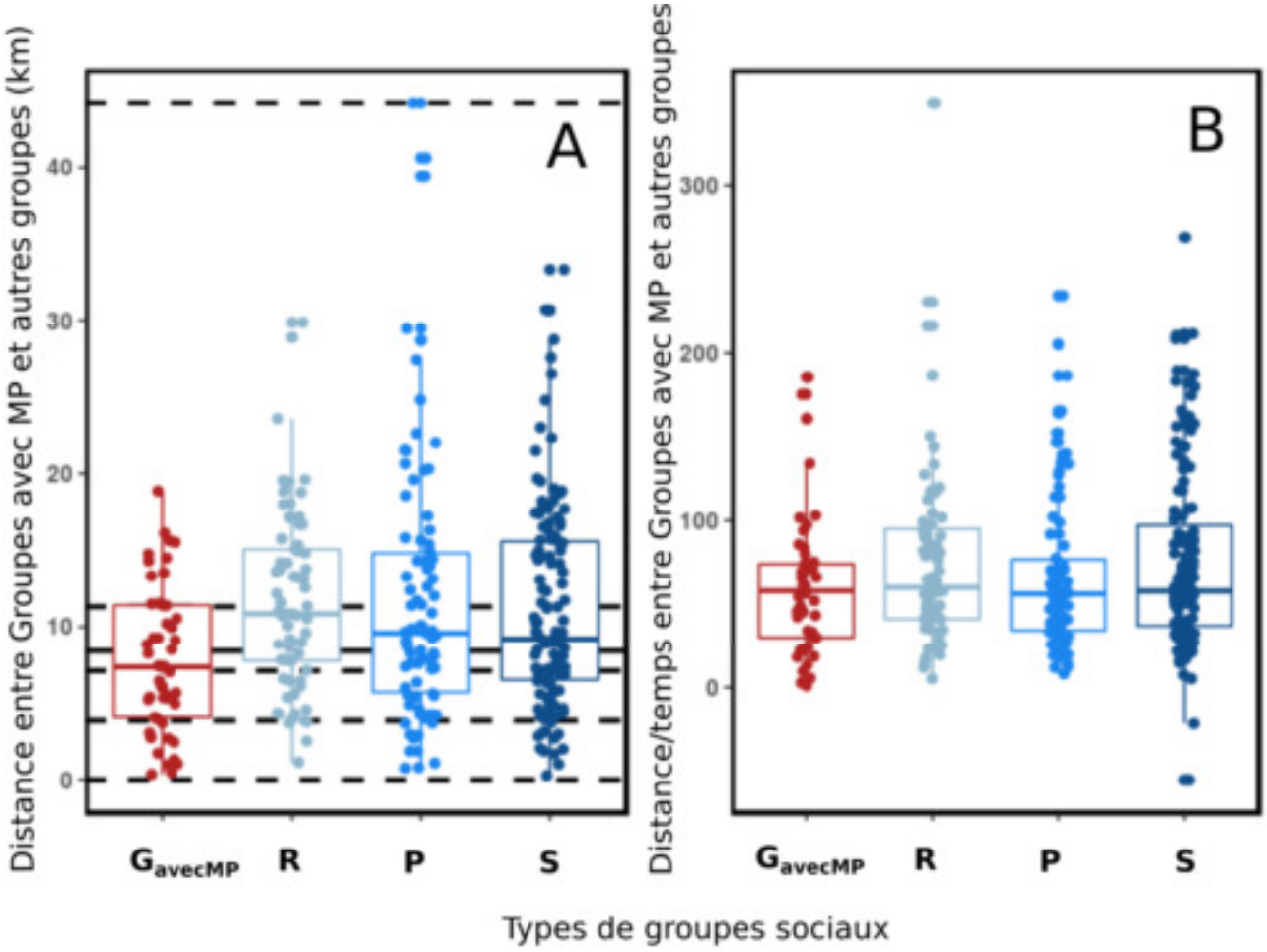


Figure 20. Diagramme en boîte représentant la distance moyenne observée entre groupes avec MP et tout autre type de groupe (G_{avecMP}, R = groupes compétiteurs, P = paires, S = solitaires, panneau A). Le trait plein noir à l'arrière-plan du panneau A, représente la valeur moyenne, alors que les traits en pointillés représentent les quartiles[9] sur l'ensemble des groupes. Les valeurs exactes pour chaque catégorie sont reportées par des points au premier plan. Le panneau B représente la distance moyenne divisée par le temps écoulé entre les observations de groupes avec MP et tout autre type de groupe.

[9] Quartile : un quartile est chacune des trois valeurs qui divisent les données triées en quatre parts égales, de sorte que chaque partie représente 1/4 de l'échantillon de population

5.2.2 Habitats utilisés

Les groupes avec MP étaient en moyenne plus proches de la côte (test de Kruskal-Wallis: Chi2 = 13,21; valeur-p = 0,0003 ***) et se trouvaient dans des eaux moins profondes (test de Kruskal-Wallis: Chi2 = 16,52; valeur-p = 4,82e-05 ***) que les groupes sans MP (échantillon total de n = 646 groupes, Figure 21).

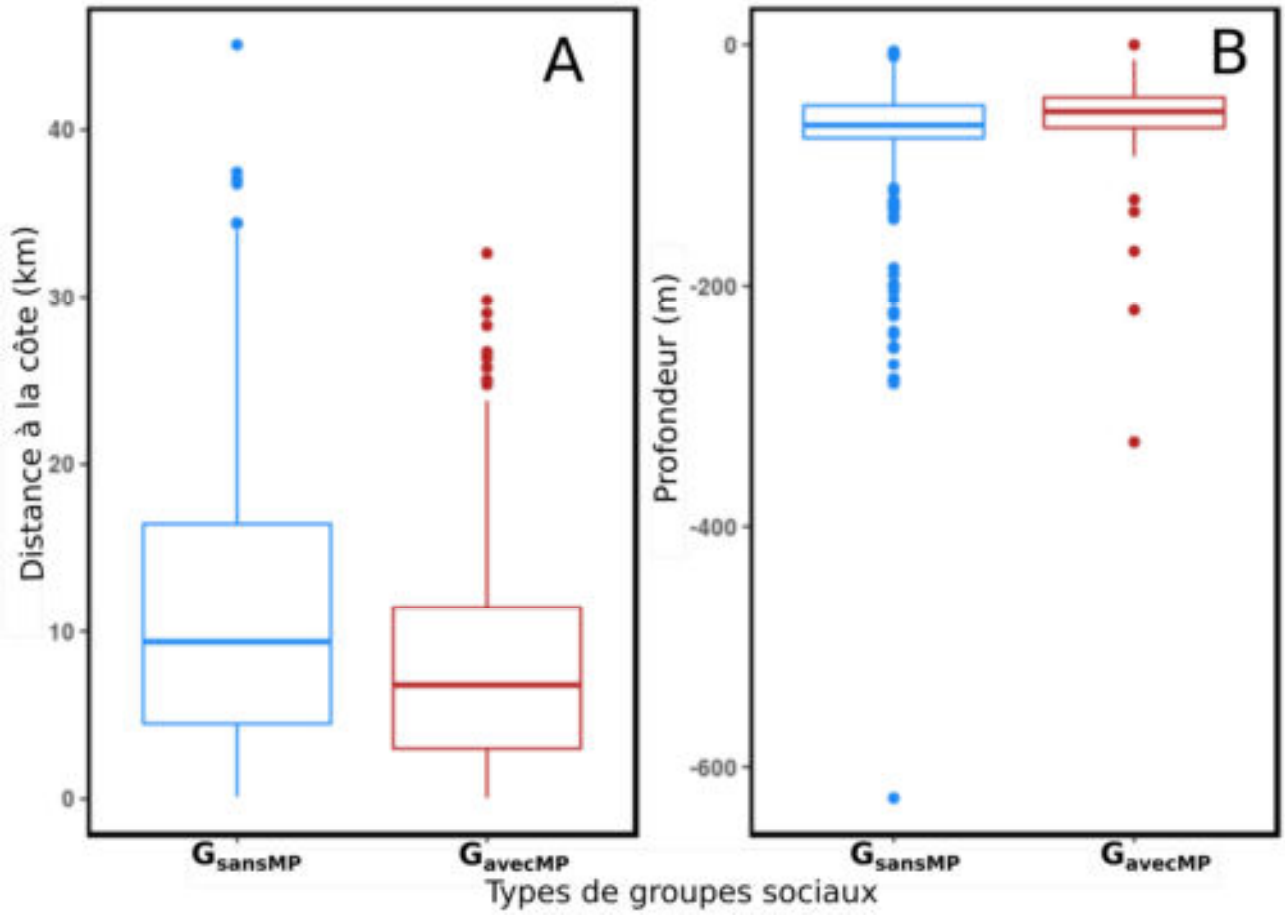


Figure 21. Diagramme en boîte de distance à la côte et de profondeur moyenne au niveau des positions où ont été observés des groupes avec (G_{avecMP}) ou sans MP (G_{sansMP}). Les points en bout de distribution représentent les valeurs extrêmes.

Ces préférences ont été confirmées par le modèle GAM reliant la probabilité de présence d'un baleineau à la distance à la côte, la distance au récif, la profondeur et la pente des fonds marins. En effet, le test de Delong montre que ce modèle explique significativement mieux les données qu'un modèle dit "nul" (c'est-à-dire sans prédicteurs; Z = -4,49; valeur-p = 6,98e-06***). Une évaluation plus poussée des modèles alternatifs n'incluant qu'une partie de ces quatre prédicteurs environnementaux semble montrer que la distance à la côte constitue le facteur le plus important permettant de distinguer l'utilisation des habitats par les groupes avec ou sans MP dans le Grand Lagon Sud.

5.2.3 Ségrégation spatiale

La préférence affichée par les groupes avec maman-petit pour les eaux côtières peu profondes se reflètent dans l'estimation des zones d'utilisation préférentielles. Même si il existe une zone de recoupement entre les deux types de groupes sociaux (59% de recouvrement), les groupes avec MP sont plus fréquents dans la zone située sous le Cap N'Doua, Port-boisé, les récifs proches de l'Ile Ouen et dans la baie de Prony (Figure 22).

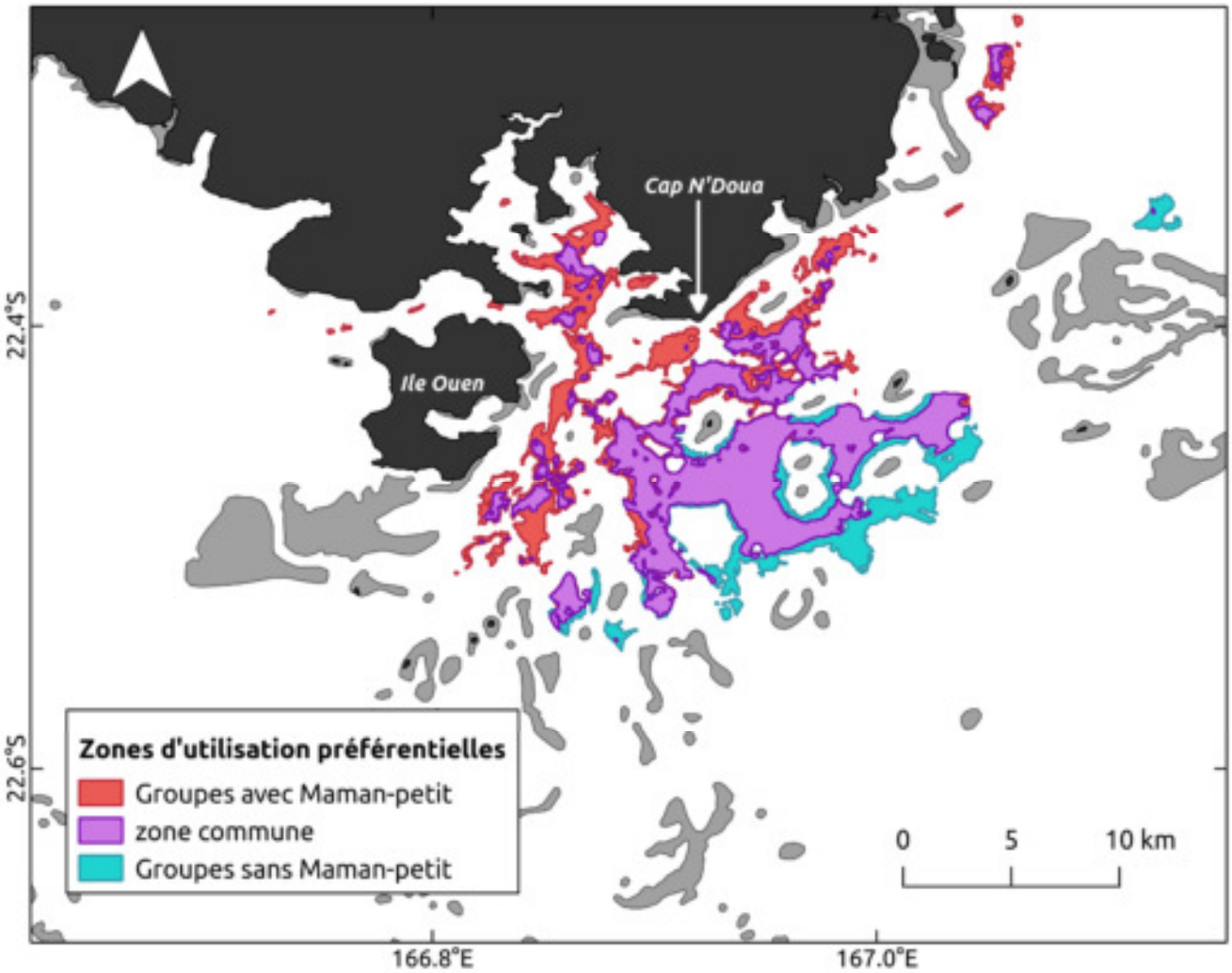


Figure 22. Projection géographique des zones d'utilisation préférentielles des groupes avec MP (en rouge) et sans MP (en bleu). La zone violette correspond à la zone utilisée par tous les types de groupes. Cette estimation ne représente que le "cœur" de la répartition et doit donc être considérée comme une sous-estimation de la zone effectivement occupée par ces animaux. La terre est représentée en noir et les récifs émergés en gris clair.

5.3 Conclusions et perspectives

L'utilisation de l'espace observée chez les groupes avec ou sans maman-petit dans le Grand Lagon Sud concorde avec les observations de nombreux autres sites de reproduction mondiaux (Martins et al., 2001; Frankel & Clark, 2002; Ersts & Rosenbaum, 2003; Oviedo & Solís, 2008; Félix & Botero-Acosta, 2011; Cartwright et al., 2012; Lindsay et al., 2016). **Les femelles accompagnées d'un baleineau favorisent les eaux peu profondes et côtières**. Sachant que les eaux côtières sont souvent des zones de fort trafic maritime, ce résultat a de fortes implications en termes de conservation car **les baleineaux sont plus susceptibles de rentrer en collision avec une embarcation** que ne le sont les individus adultes (Lammers et al. 2007).

6 LES RISQUES ANTHROPIQUES

Rappel des questions : Le trafic maritime peut-il avoir un impact sur les baleines à bosse dans le Grand Lagon Sud ?

6.1 Traitement des données

6.1.1 Evolution temporelle du trafic maritime

Dans le but d'apprécier **la fréquentation maritime de la zone** utilisée par les baleines, des **relevés journaliers de tous les bateaux présents dans la zone d'étude ont été effectués depuis le Cap N'Doua à 9h**. En cas de mauvaises conditions météorologiques et/ou de visibilité réduite sur la zone, ou si un groupe de baleines faisait l'objet d'un suivi à l'heure du relevé, ce dernier n'était pas effectué. Les positions des bateaux ont été enregistrées grâce à la grille de la zone d'étude ou à l'aide du théodolite (Figure 2). Ces relevés s'étendent de 1997 à 2013.

Le nombre total de bateaux recensés au cours du relevé de 9h pour chaque saison, a été divisé par le nombre total de relevés effectués à cet horaire.

6.1.2 Distribution géographique du trafic maritime

À partir des données **"*Automatic Identification System*" (AIS)** des vaisseaux circulant dans la zone d'étude, les principales **routes maritimes** ont été mises en évidence. Ces données sont issues des cartes interactives visualisables sur le sitewww.marinetraffic.com. Ce système de détection et de suivi satellitaire est embarqué en particulier sur les navires commerciaux tels que les bateaux de transport de passagers ou les navires industriels (minéraliers, cargos, bateaux de pêche).

Des polygones ont été tracés autour des zones de trafic majeures où la densité de trajets cumulés en 2015 était la plus élevée (Figure 23). Ces **zones de trafic majeures** ont ensuite été globalement entourées de façon à délimiter la **principale route de navigation commerciale** traversant la zone d'étude depuis le Canal Woodin jusqu'à la passe de la Havanah (Figure 23). On remarque une route secondaire allant vers l'île des Pins.

6.1.3 Interactions entre trafic maritime et baleines à bosse

Afin de caractériser le risque de collision et de dérangement lié au trafic maritime sur différents groupes sociaux de baleines à bosse**, les zones d'utilisation préférentielles estimées en section 5.2.3ont été superposées avec la route de navigation commerciale du Lagon Sud**. Le pourcentage de recouvrement entre cette route et les zones d'utilisation préférentielles des groupes avec ou sans MP a été calculé.

Par ailleurs, afin d'estimer un potentiel déplacement des groupes avec MP au cours du temps en réponse à l'augmentation du trafic maritime, la **proportion de groupes avec**

MP observés par l'équipe en mer dans la zone de route commerciale (Figure 23) a été calculée pour chaque saison.

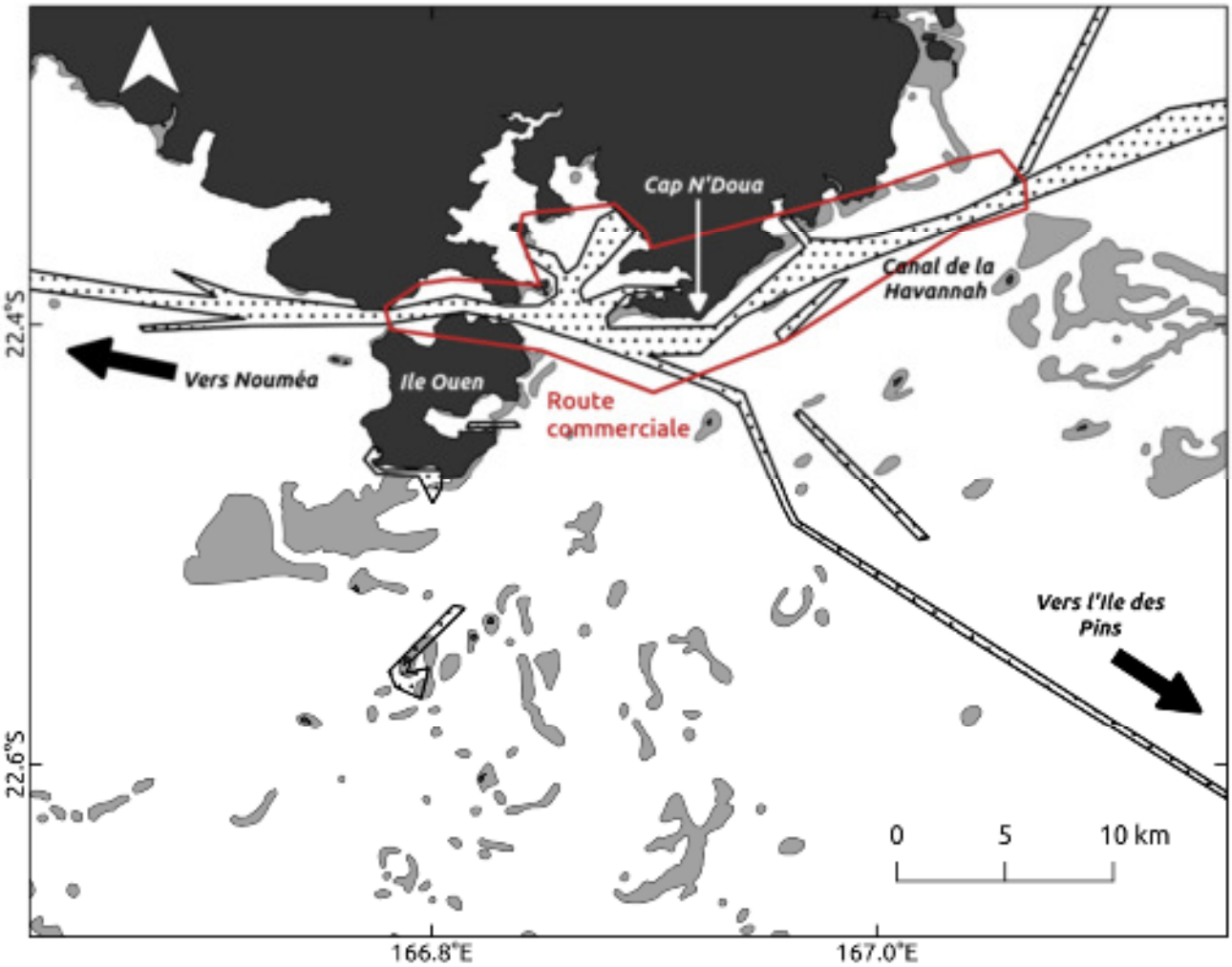


Figure 23. Zones de plus fort trafic maritime (pointillés) et principale route de navigation commerciale (trait rouge) dans le Grand Lagon Sud. La terre est représentée en noir et les récifs émergés en gris clair.

6.2 Résultats

Les relevés du nombre de bateaux réalisés de façon journalière par l'équipe à terre montrent une augmentation du nombre de bateaux fréquentant la zone depuis le début de l'étude (Figure 24). À cette époque, en 1997,le nombre moyen de bateaux observés par jour lors du relevé de 9h était inférieur à 5, alors que depuis 2009 il reste supérieur à 20 bateaux par relevés. L'accroissement de la fréquentation maritime semble s'être atténué depuis 2009.

Cet accroissement du trafic maritime dans la zone côtière du Grand Lagon Sud ne semble pas avoir provoqué un déplacement des groupes de baleines accompagnés de baleineaux.

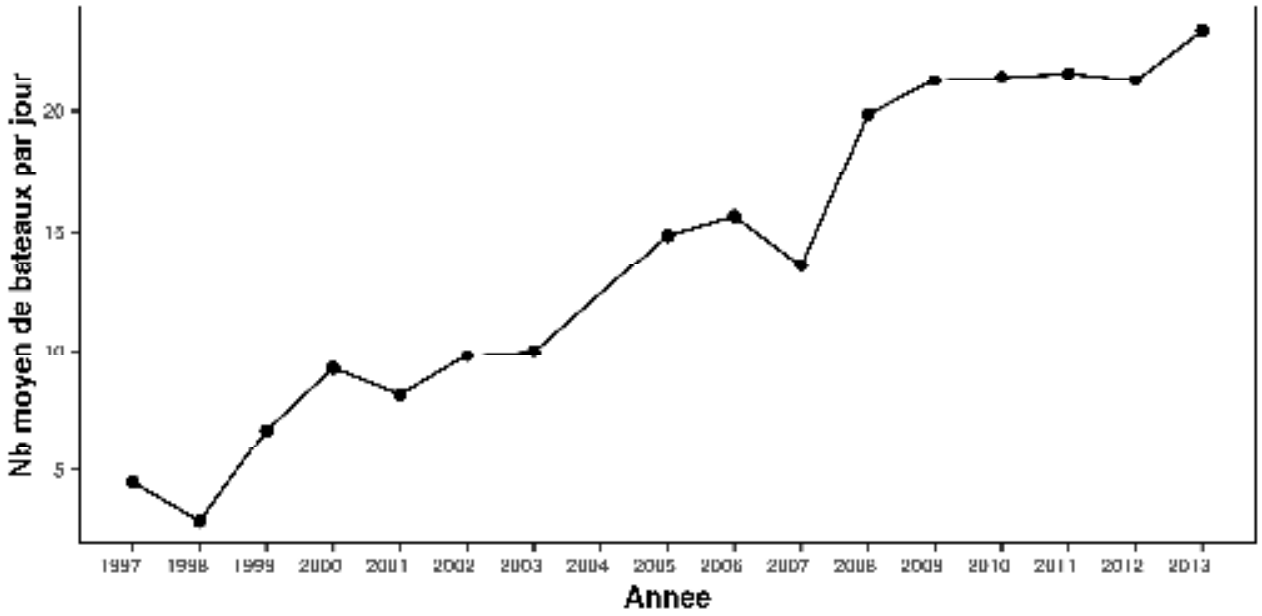


Figure 24. Nombre moyen de bateaux relevés par l'équipe à terre en début de matinée (1997-2013).

En effet, le pourcentage de groupes avec MP observés sur la route de navigation commerciale n'a pas diminué au fil des années (Figure 25). Bien que fortement variable, cette proportion présente même un léger accroissement reflétant l'augmentation globale du nombre d'observations de groupes avec MP dans l'ensemble du Grand Lagon Sud depuis 1997 (Figure 26, malgré de fortes variations liées à l'effort d'échantillonnage).

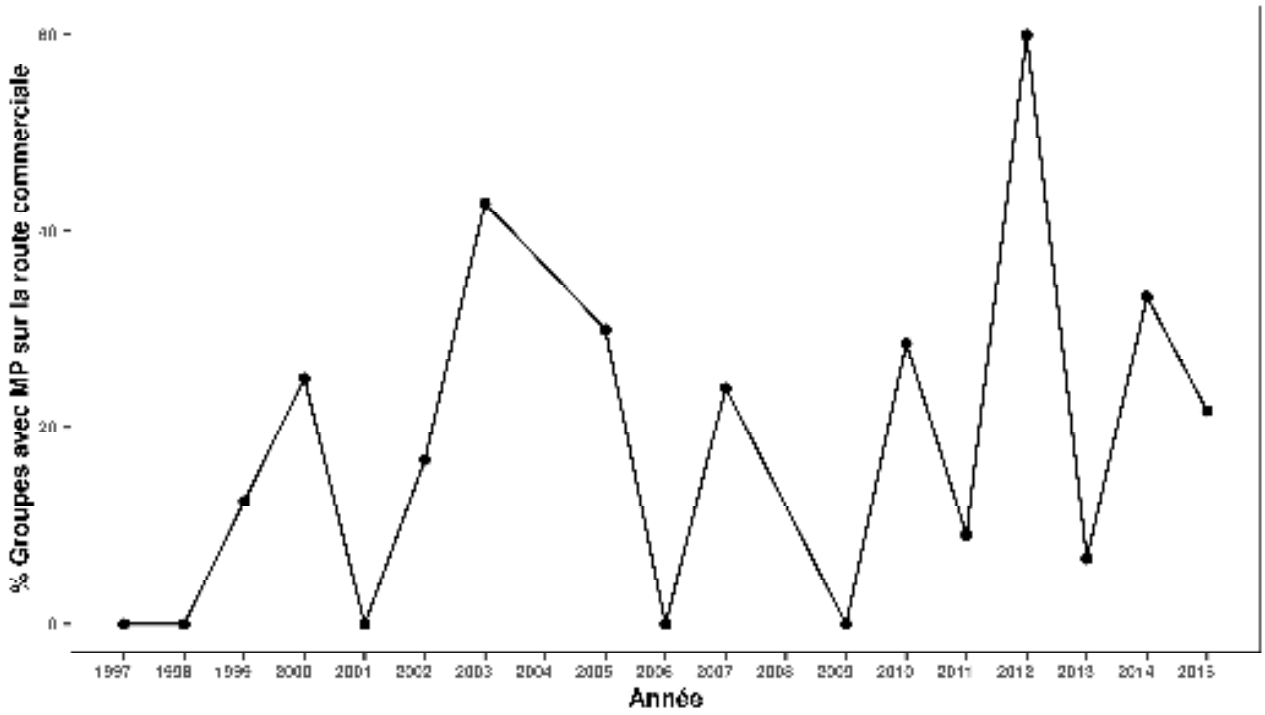


Figure 25. Evolution de la proportion de groupes avec MP observés sur la route de navigation commerciale. Ces observations sont celles effectuées par l'équipe en mer.

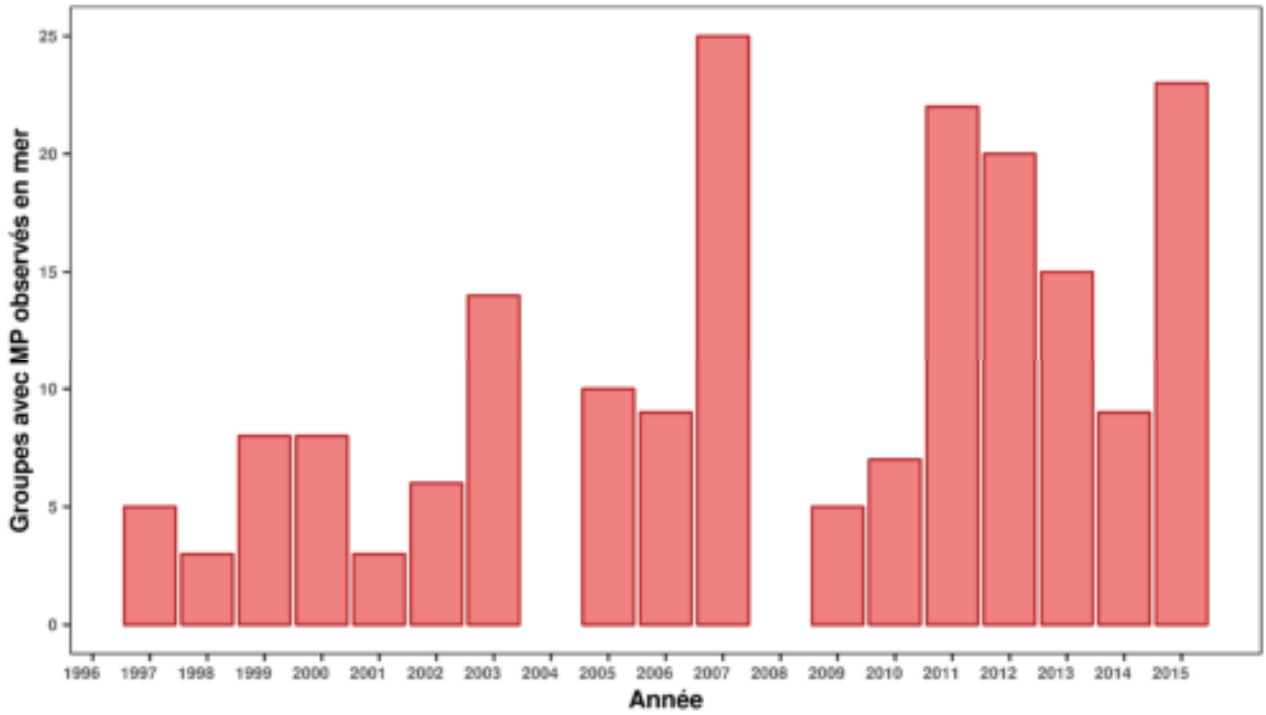


Figure 26. Evolution du nombre total de groupes avec MP observés dans l'ensemble du Lagon Sud. Ces observations sont celles effectuées par l'équipe en mer.

Cependant si l'on se penche sur la distribution géographique des groupes de baleines, on constate que les groupes avec MP présentent un risque plus élevé de collision ou de dérangement par le trafic maritime commercial que les groupes sans MP. En effet, la principale route de navigation commerciale recouvre20,0% des zones d'utilisation préférentielles des groupes avec MP, contre seulement 5,9% des groupes sans MP (Figure 27).

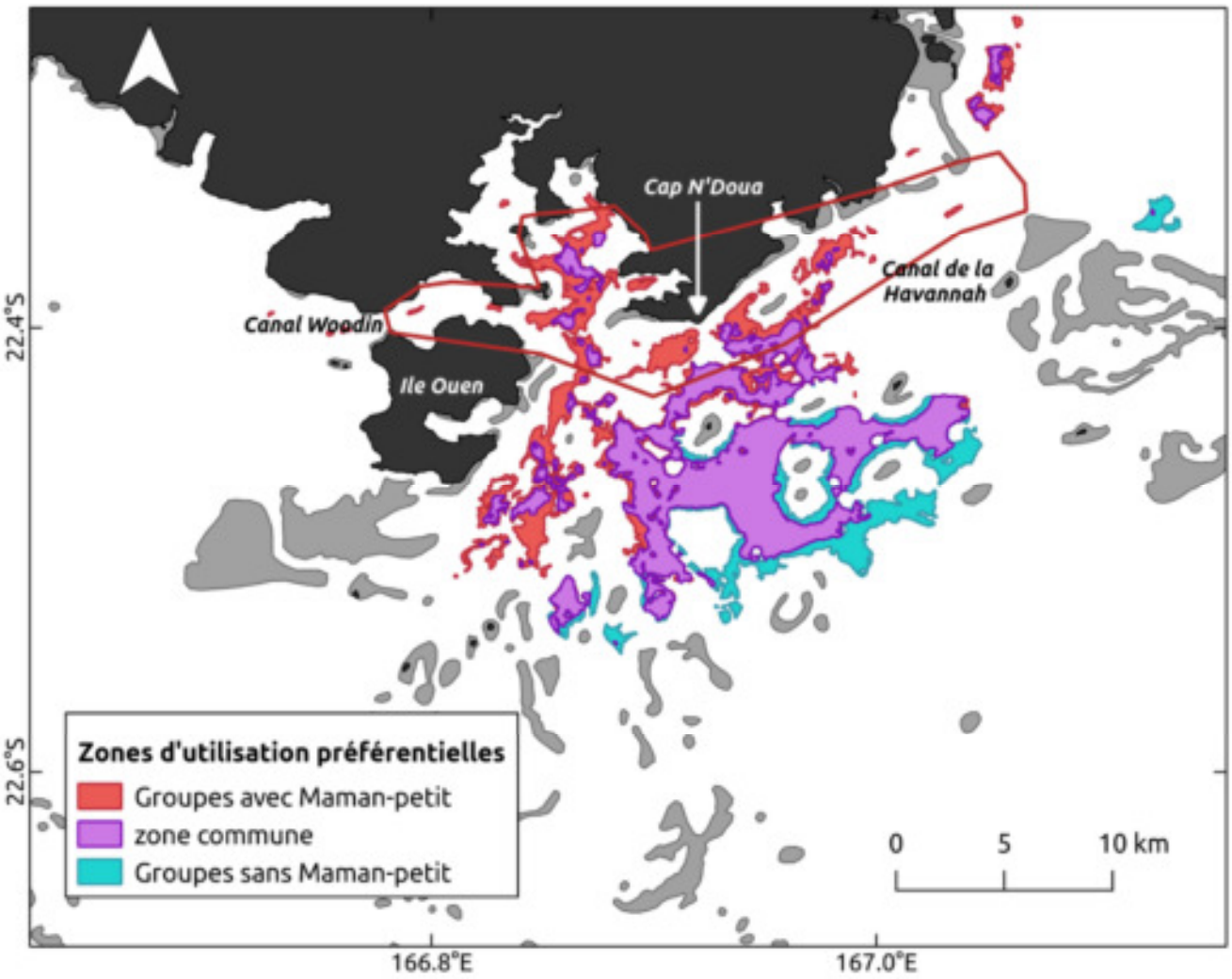


Figure 27. Zones de chevauchement entre la route de navigation commerciale et les zones d'utilisation préférentielles des groupes de baleines à bosse avec ou sans maman-petit. La route commerciale est délimitée par une ligne rouge. La terre est représentée en gris foncé et les récifs émergés en gris clair.

6.3 Conclusions et perspectives

Depuis le milieu des années 90, le Grand Lagon Sud a subi une augmentation du trafic maritime pendant la saison hivernale, principalement due à une intensification des activités touristiques et de plaisance. Le nombre de bateaux observés dans la zone semble avoir atteint un plateau depuis 2009 mais **cette tendance à la stabilisation** doit cependant être confirmée par de nouvelles observations car le suivi de la fréquentation maritime ne s'est pas poursuivi après 2013. Une incertitude existe également quant à l'évolution du trafic commercial ces dernières années, les données AIS n'ayant pas pu être acquises à un pas de temps journalier sur la période d'étude.

La modélisation des zones d'utilisation préférentielles par les baleines à bosse a montré que **les groupes de baleines avec maman-petit étaient plus susceptibles de se trouver sur la route de navigation commerciale dans la zone du Canal Woodin, de la baie de Prony et sous le Cap N'Doua**. Les mère-petit, en plus d'être plus vulnérables

aux collisions de par leur mobilité restreinte, sont **également les plus exposées de par leur distribution géographique**.

De plus, malgré l'augmentation du trafic maritime**, les femelles accompagnées d'un baleineau ne semblent pas avoir modifié leur distribution au fil des saisons et occupent toujours autant la zone côtière**. Il est néanmoins possible que les impacts du trafic ne se fassent sentir qu'à plus large échelle spatiale. La découverte de nouveaux sites de concentration de baleines à bosse dans le Sud de la zone économique exclusive calédonienne (Garrigue et al., 2015, 2017) suggère que les baleines à bosse pourraient se déplacer au cours de la saison de reproduction, et ce potentiellement en réponse à des changements dans leur environnement, qu'il soit d'origine anthropique ou non. L'étude de la connectivité entre le Lagon Sud et l'ensemble des eaux de Nouvelle-Calédonie permettra donc de mieux appréhender les mécanismes sous-jacents à ces déplacements et l'impact potentiel des activités anthropiques sur ceux-ci.

7 SYNTHESE

1. **<u>La distribution spatio-temporelle</u>**

La répartition des baleines à bosse dans le Grand Lagon Sud a-t-elle évoluée au cours des 20 dernières années ?

➡ **La distribution spatiale des baleines à bosse est restée stable au cours des 20 dernières années.**

Quel est la date moyenne du pic de fréquentation du Lagon Sud ? Ce pic se décale t-il d'une année à l'autre ?

➡ **Globalement le pic de fréquentation des baleines à bosse au cours de la saison de reproduction est situé dans la deuxième quinzaine d'août mais on ne distingue pas de pic net à l'échelle annuelle.**

---

2. **<u>La sélection de l'habitat</u>**

Quelles variables environnementales expliquent la présence de baleines à bosse au sein du Grand Lagon Sud ?

➡ **Les baleines à bosse sont sensibles à la profondeur et la distance à la terre. Elles favorisent les eaux de 80m de profondeur, proches de la côte mais ouvertes à la circulation océanique.**

---

3. **<u>L'effet des variations climatiques saisonnières et journalières</u>**

Les variations interannuelles de distribution des baleines à bosse dans le Grand Lagon Sud peuvent-elles être corrélées à des phénomènes climatiques annuels tels que ENSO (El NiñoSouthern Oscillation)?

➡ **La distribution spatiale annuelle des baleines à bosse ne semble pas affectée par les changements de température liés au phénomène ENSO.**

Les fluctuations environnementales (vent et température) à l'échelle journalière peuvent-elles avoir un effet sur la fréquentation du Grand Lagon Sud par les baleines à bosse ?

➡ **Le régime de vent affecte la fréquentation : le taux de rencontre est plus élevé par alizés que par vent d'ouest. La température de surface locale joue également un rôle limité : les eaux de 22,5 - 23°C semblent favorisées dans une moindre mesure.**

---

4. **<u>La ségrégation sociale</u>**

La distribution et l'utilisation des habitats des baleines à bosse dans le Grand Lagon Sud répondent-elles à des facteurs sociaux ? Les femelles accompagnées d'un baleineau utilisent-ils l'espace différemment du reste de la population ?

➡ **Les mères avec baleineau évitent les autres baleines et utilisent préférentiellement les eaux côtières peu profondes.**

---

5. **<u>Les risques anthropiques</u>**

Le trafic maritime peut-il avoir un impact sur les baleines à bosse dans le Grand Lagon Sud ?

➡ **Le trafic maritime en augmentation depuis une vingtaine d'années n'a pas provoqué de déplacement des baleines à bosse qui semble toujours utiliser les zones d'usage préférentielles. Cependant cette augmentation accroît le risque de collision avec les mères-baleineau qui occupent préférentiellement les routes de navigation côtières.**

8 REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Andréfouët, S., Chagnaud, N., Chauvin, C., & Kranenburg, C.J. (2008) Atlas of French Overseas Coral Reefs.

Cartwright, R., Gillespie, B., Labonte, K., Mangold, T., Venema, A., Eden, K., & Sullivan, M. (2012) Between a Rock and a Hard Place : Habitat Selection in Female-Calf Humpback Whale (*Megaptera novaeangliae*) Pairs on the Hawaiian Breeding Grounds. *PloS one*, 7, e38004.

Clapham, P.J. (2016) Managing leviathan: Conservation challenges for the great whales in a post-whaling world. *Oceanography*, 29.

Constantine, R., Jackson, J. a., Steel, D., Baker, C.S., Brooks, L., Burns, D., Clapham, P.J., Hauser, N., Madon, B., Mattila, D., Oremus, M., Poole, M., Robbins, J., Thompson, K. and Garrigue, C. (2012). Abundance of humpback whales in Oceania using photo-identification and microsatellite genotyping. *Marine Ecology Progress Series*, 453, 249–261.

Douillet P., Ouillon S., Cordier E. (2001). A numerical model for fine suspended sediment transport in the southwest lagoon of New Caledonia. Coral Reefs, 20(4), 361-372.

Ersts, P.J. & Rosenbaum, H.C. (2003) Habitat preference reflects social organization of humpback whales (*Megaptera novaeangliae*) on a wintering ground. *Journal of Zoology*, 260, 337–345.

Félix, F. & Botero-Acosta, N. (2011) Distribution and behaviour of humpback whale mother-calf pairs during the breeding season off Ecuador. *Marine Ecology Progress Series*, 426, 277–287.

Frankel, A.S. & Clark, C.W. (2002) Atoc and Other Factors Affecting the Distribution and Abundance of Humpback Whales (Megaptera Novaeangliae) Off the North Shore of Kauai. *Marine Mammal Science*, 18, 644–662.

Garrigue, C., Bonneville, C., Derville, S., Dodemont, R., Oremus, M., Pérard, V., (2017). Rapport des campagnes MARACAS 1 & 2. 67p.

Garrigue, C., Clapham, P.J., Geyer, Y., Kennedy, A.S., & Zerbini, A.N. (2015) Satellite tracking reveals novel migratory patterns and the importance of seamounts for endangered South Pacific Humpback Whales. *Royal Society Open Science*, 2 (11), 150489.

Garrigue, C., Greaves, J., & Chambellant, M. (2001) Characteristics of the New Caledonian Humpback whale population. *Memoirs of the Queensland Museum*, 47, ISSN 0079-8835.

Hastie, T.J. & Tibshirani, R.J. (1990) Generalized Additive Models. *Monographs on statistics and Applied Probability* pp. 352. Chapman and Hall/CRC, London.

Hénin C., Cresswell G.R. (2005). Upwelling along the western barrier reef of New Caledonia. Marine and Freshwater Research, 56(7), 1005-1010.

Jackson, J.A., Ross-Gillespie, A., Butterworth, D., Findlay, K., Holloway, S., Robbins, J., Rosenbaum, H., Weinrich, M., Baker, C.S. and Zerbini, A. (2015). Southern Hemisphere Humpback Whale Comprehensive Assessment – A synthesis and summary: 2005-2015. Int. Whal. Comm. Sci. reports, SC/66a/SH/3.

Kniest & Paton (2001) Temporal GIS for Marine Mammal Research (Abstract). In “14 Biennial Conference on the Biology of Marine Mammals”. Vancouver, Canada.

Lammers MO, Pack AA, Davis L (2007) Trends in whale/vessel collisions in Hawaiian waters. International Whaling Commission Scientific Committee SC/59/BC14.

Lindsay, R., Constantine, R., Robbins, J., Mattila, D., Tagarino, A., & Dennis, T. (2016) Characterising essential breeding habitat for whales informs the development of large-scale Marine Protected Areas in the South Pacific. *Marine Ecology Progress Series*, 548, 263–275.

Martins, C.C. a, Morete, M.E., Engel, M.H., Freitas, a. C., Secchi, E.R., & Kinas, P.G. (2001) Aspects of habitat use patterns of humpback whales in the Abrolhos Bank, Brazil, breeding ground. *Memoirs of the Queensland Museum*, 47, 563–570.

Oviedo, L. & Solís, M. (2008) Underwater topography determines critical breeding habitat for humpback whales near Osa Peninsula, Costa Rica : implications for Marine Protected Areas. *Rev. Bio. Trop.*, 56, 591–602.

Pinazo, C., Bujan, S., Douillet, P., Fichez, R., Grenz, C., & Maurin, A. (2004). Impact of wind and freshwater inputs on phytoplankton biomass in the coral reef lagoon of New Caledonia during the summer cyclonic period: a coupled threedimensional biogeochemical modeling approach. Coral Reefs, 23(2), 281-296.

Poloczanska, E., Brown, C.J., Sydeman, W.J., Kiessling, W., Schoeman, D.S., Moore, P.J., Brander, K., Bruno, J.F., Buckley, L.B., Burrows, M.T., Duarte, C.M., Halpern, B.S., Holding, J., Kappel, C. V, O’Connor, M.I., Pandolfi, J.M., Parmesan, C., Schwing, F., Thompson, S.A., & Richardson, A.J. (2013) Global imprint of climate change on marine life. *Nature Climate Change*, 3, 919–925.

QGIS Development Team (2016) QGIS Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation Project.

R Core Team (2016) *R: A language and environment for statistical computing.* R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.

Schaffar, A., Garrigue, C. and Constantine, R. (2010). Exposure of humpback whales to unregulated whalewatching activities in their main reproductive area in New Caledonia. J. Cetacean Res. Manag., 11, 147–152.

Schaffar, A., Madon, B., Garrigue, C., & Constantine, R. (2013) Behavioural effects of whale watching activities on an endangered population of humpback whales wintering in New Caledonia. *Endangered Species Research*, 19, 245–254.

Smith, J., Grantham, H., Gales, N., Double, M., Noad, M., & Paton, D. (2012) Identification of humpback whale breeding and calving habitat in the Great Barrier Reef. *Marine Ecology Progress Series*, 447, 259–272.

Sydeman, W.J., Poloczanska, E.S., Reed, T.E., & Thompson, S.A. (2015) Climate change and marine vertebrates. *Science*, 350, 171–193.

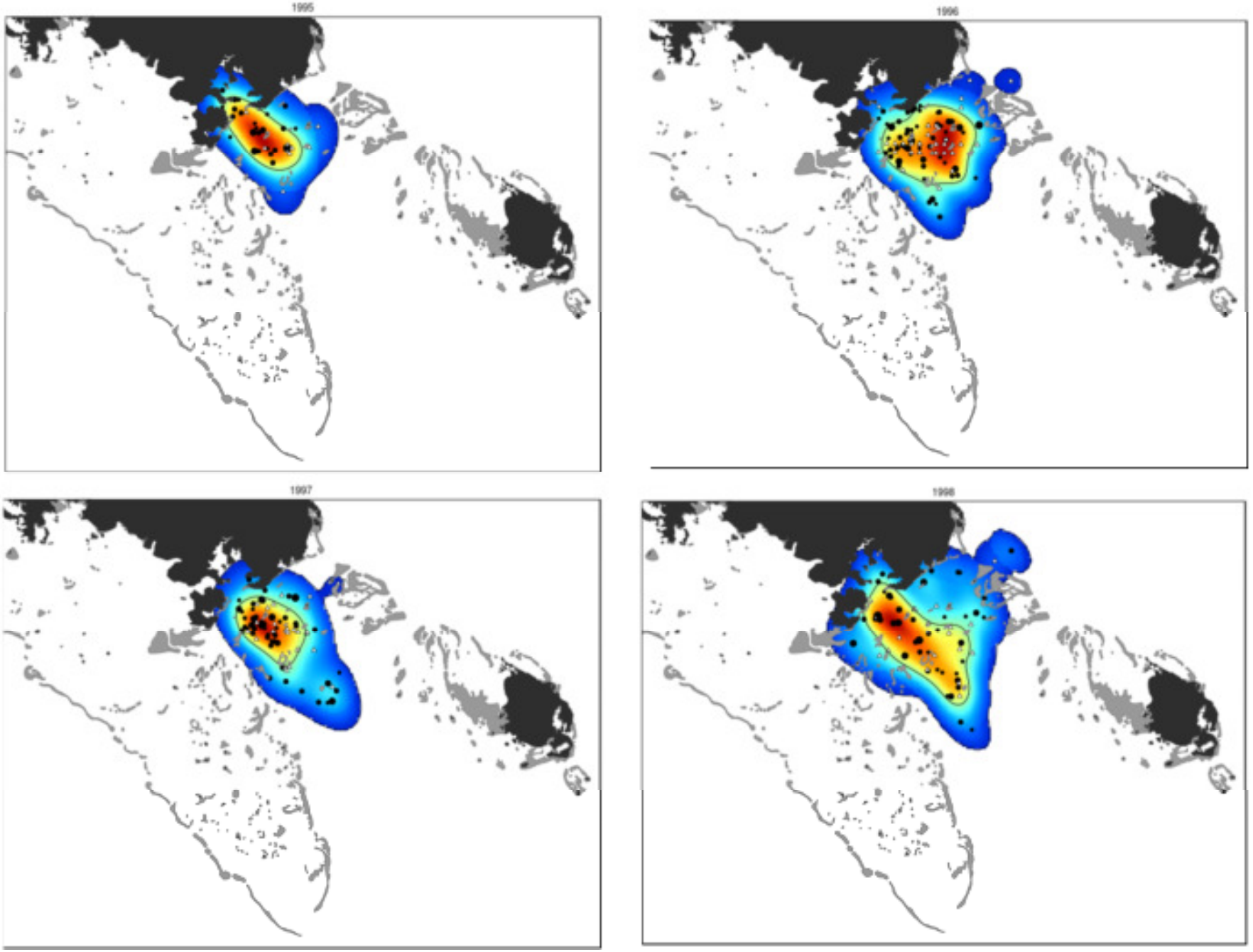
Tarjan, M.L. & Tinker, T.M. (2016) Permissible Home Range Estimation (PHRE) in Restricted Habitats: A New Algorithm and an Evaluation for Sea Otters. *PLoS ONE*, 11, e0150547.

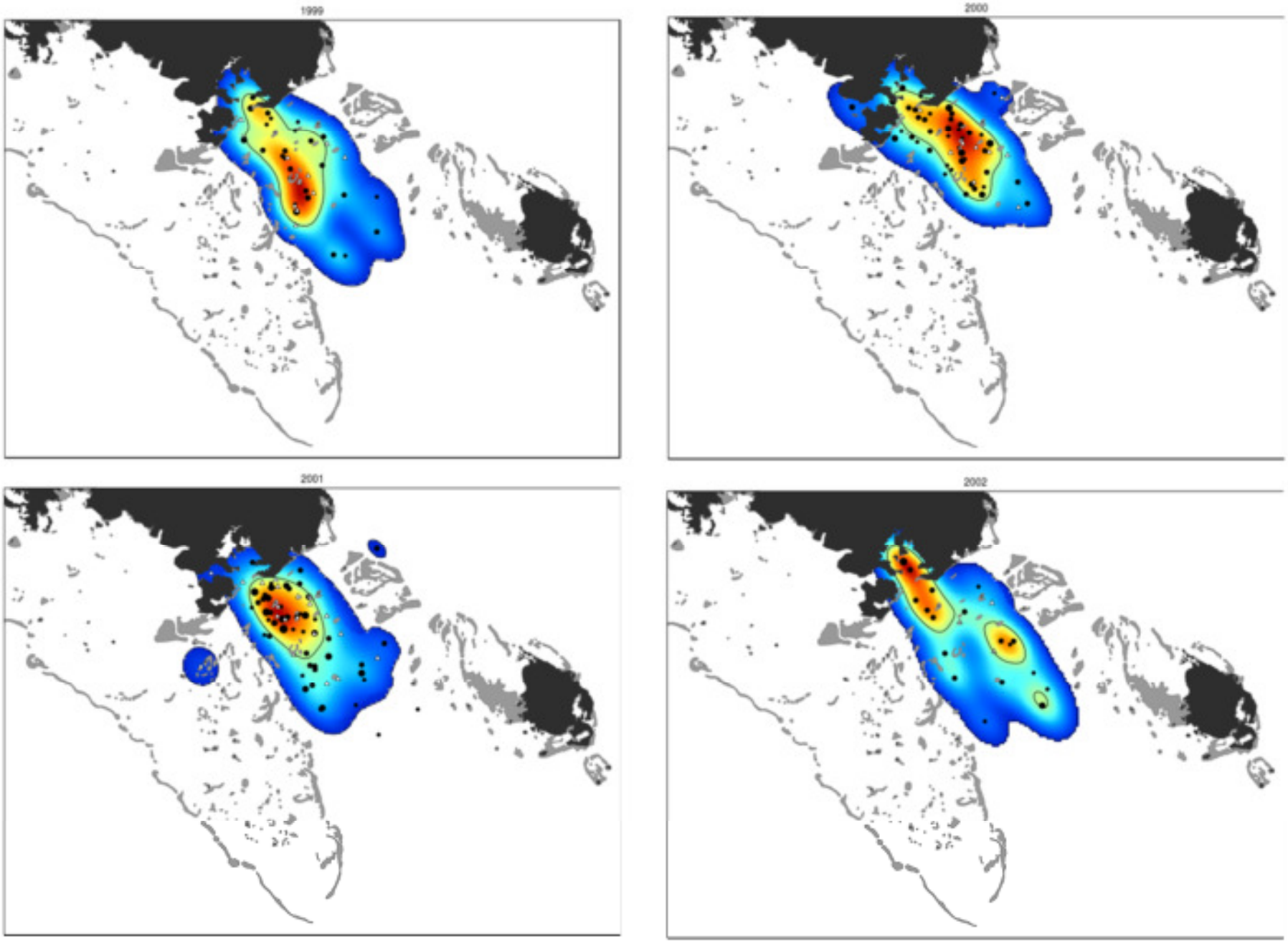
Thomas, P.O., Reeves, R.R., & Brownell, R.L. (2015) Status of the world's baleen whales. *Marine Mammal Science*, 32, 682–73

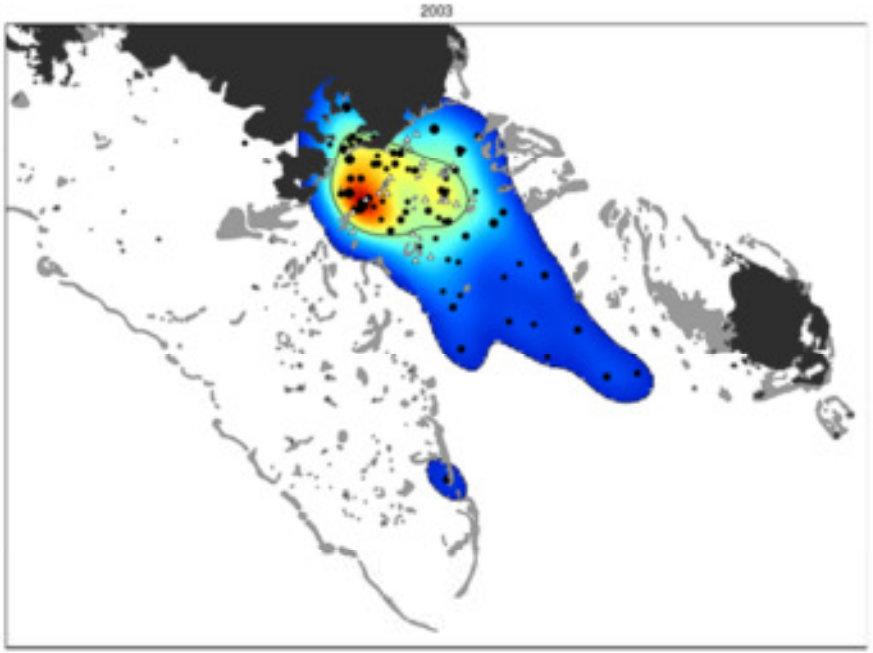
9 ANNEXES

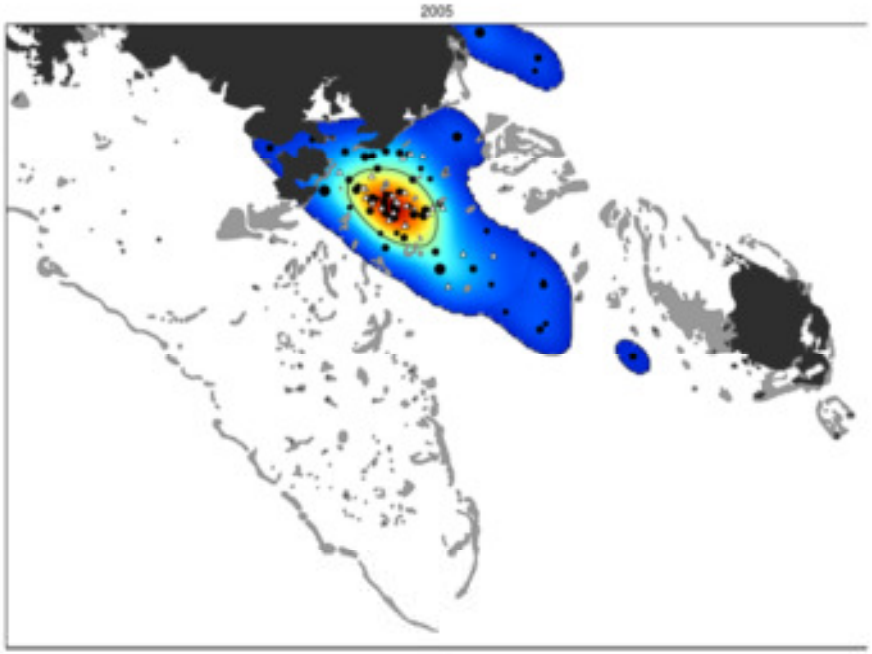
Estimation de la répartition annuelle des baleines à bosse dans le Grand Lagon Sud entre 1995 et 2015 à partir des observations en mer et depuis la terre.

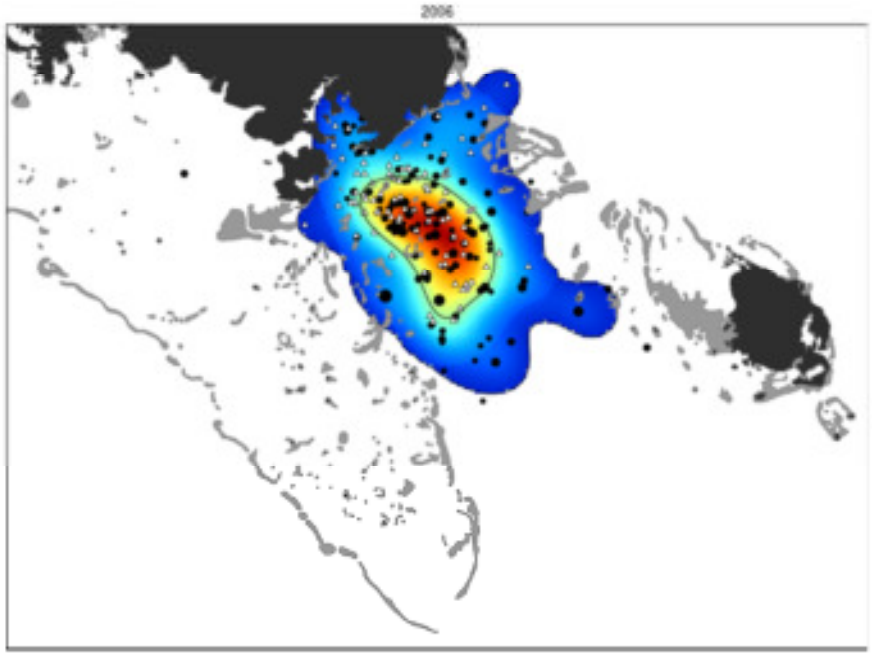
Représentation complète de la Figure 8 : La probabilité de présence est représentée sur une échelle du bleu (faible probabilité) au rouge (forte probabilité). Les zones non colorées sont considérées comme trop peu échantillonnées pour pouvoir y produire une estimation. Les deux contours noirs au sein de la zone d'estimation représentent les contours à 90% et 50% de probabilité de présence sur une échelle de 1 à 100. Les groupes de baleines à bosse observés en mer sont représentés par des cercles noirs de taille proportionnelle au nombre d'individus dans le groupe (de 1 à 10). Les groupes de baleines à bosse observés depuis la terre mais non observés en mer sont représentés par des triangles blancs. La terre est représentée en noir et les récifs émergés en gris clair.

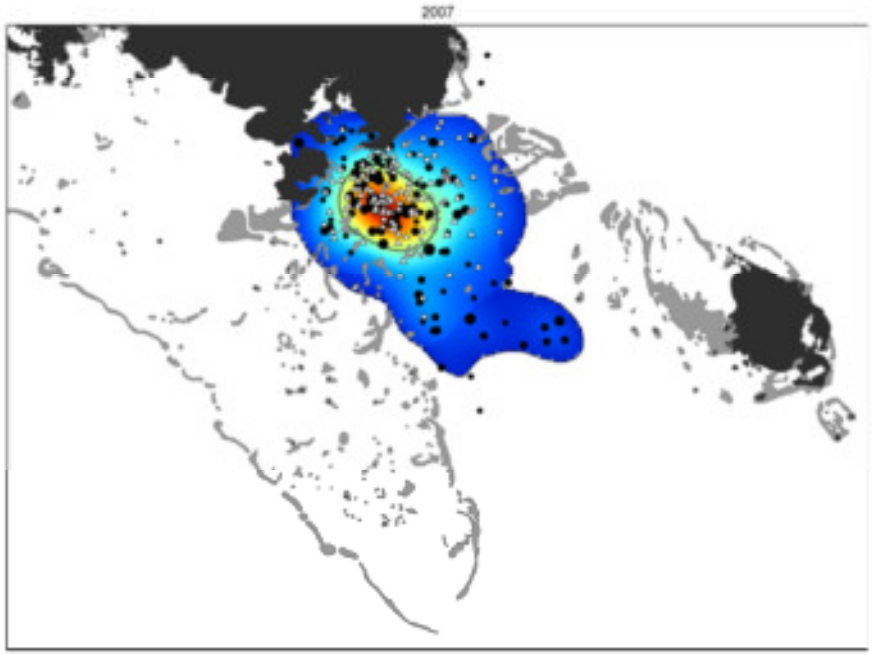

1995
1996
1997
1998

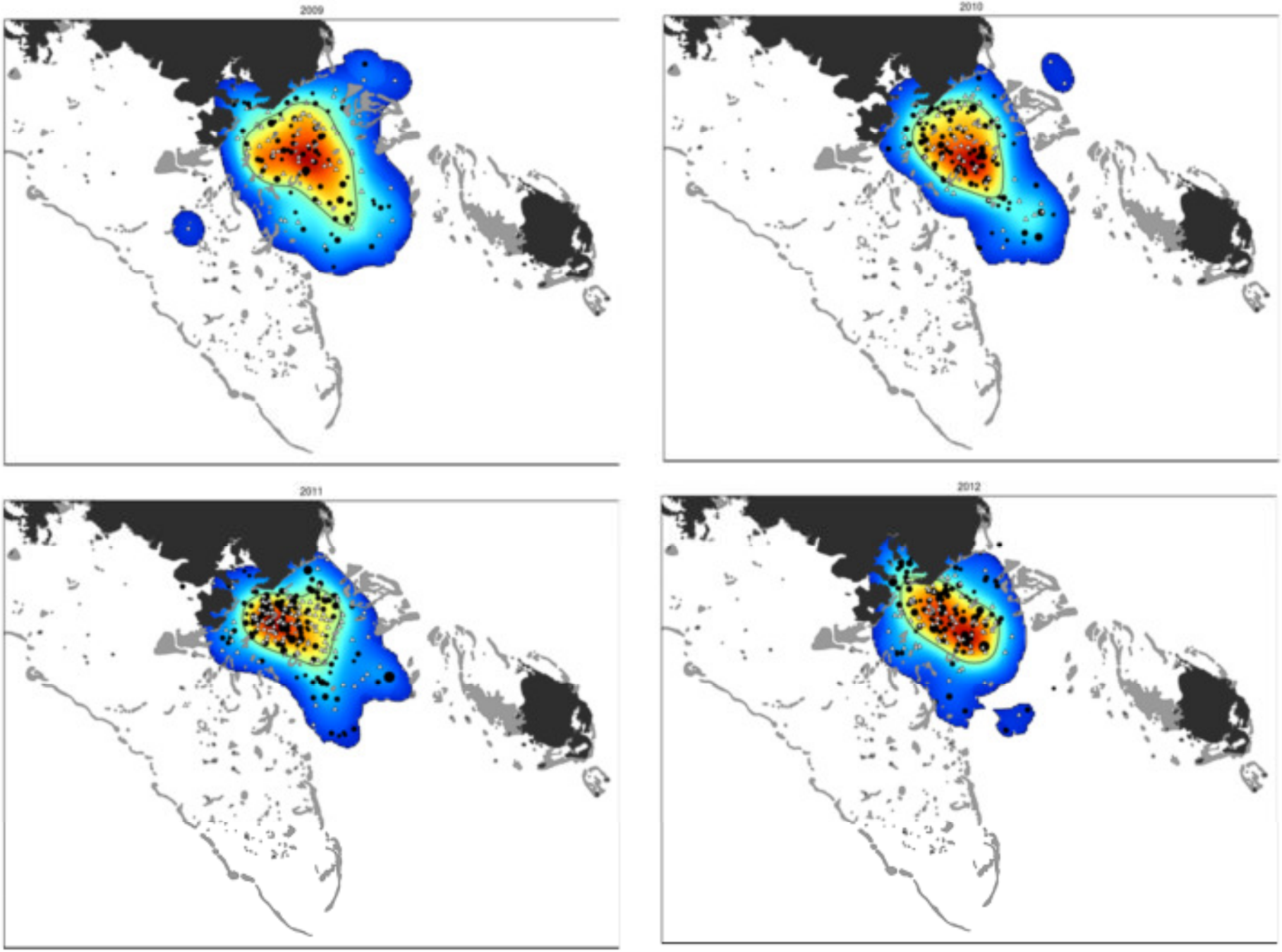

1999
2000
2001
2002

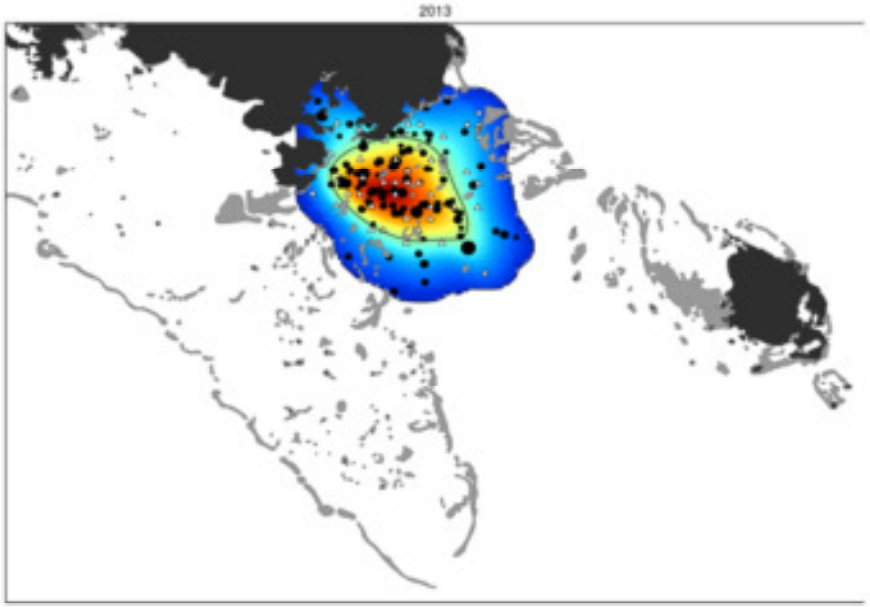

2003

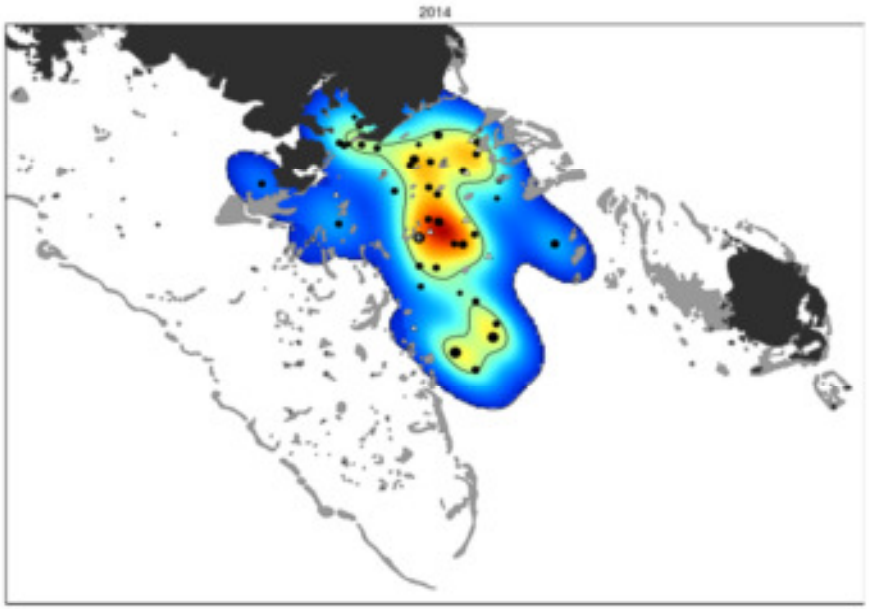

2005

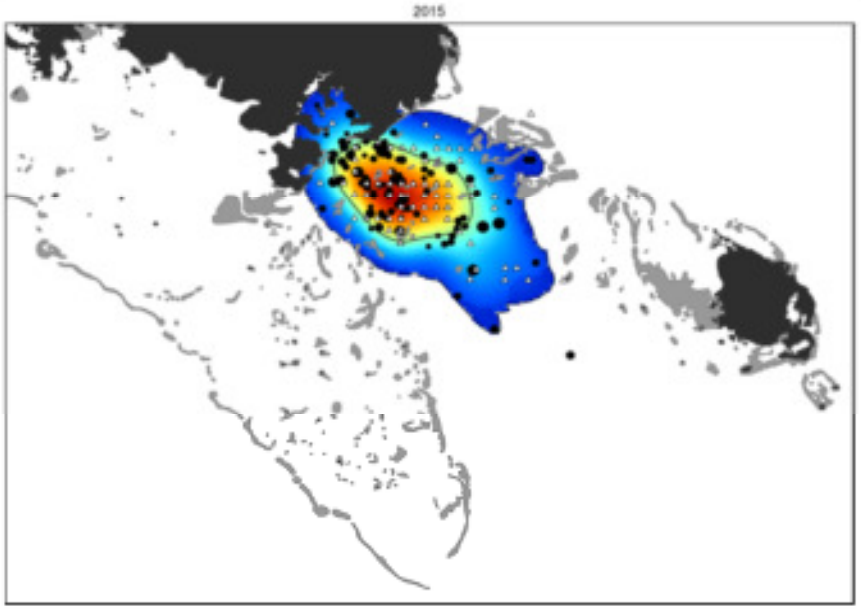

2006


2007


2009
2010
2011
2012


2013


2014


2015

Contacts :

Solène Derville & Claire Garrigue

Opération cétacés BP12827, 98802 Nouméa Nouvelle-Calédonie

op.cetaces@lagoon.nc

UMR ENTROPIE, IRD BPA5 98848 Nouméa Nouvelle-Calédonie

solene.derville@ird.fr

claire.garrigue@ird.fr