

Distribution et abondance de la mégafaune marine dans les Antilles Françaises

Campagne REMMOA* - Antilles

Rapport final – Janvier 2009



Van Canneyt Olivier (CRMM-ULR)
Certain Grégoire (CRMM-ULR)
Dorémus Ghislain (CRMM-ULR)
Ridoux Vincent (CRMM-ULR)
Jeremie Stéphane (SEPANMAR)
Rinaldi Renato (Evasion Tropicale)
Watremez Pierre (AAMP)



* REcensement des Mammifères marins et autre Mégafaune pélagique par Observation Aérienne

Sommaire :

Avant-propos.....	2
Introduction	3
Contexte :	3
Objectifs :	3
Etat des connaissances :	4
Choix de la méthode :	4
I. Récolte et archivage des données	6
Période et zone d'étude :	6
Protocole d'étude et équipement :	6
Echantillonnage et stratification :	7
Collecte des données :	8
Traitement des données :	9
II. Analyses statistiques.....	10
2.1. Modélisation spatiale.....	10
Objectif et limitations:.....	10
Descripteurs environnementaux :	10
Préparation des données :	12
Modèles Additifs Généralisés :	12
Définition de zones prioritaires d'intérêt :	12
Mesure de l'intensité des activités humaines :	13
Calcul d'un indice de conflit potentiel :	13
2.2. Estimations d'abondances	13
2.3. Analyses de sensibilité	14
Démarche générale :	14
Application :	15
III. Résultats et interprétation :	16
3.1. Synthèse des Observations	16
Conditions d'observation :	16
Observations de cétacés :	17
Autres observations :	24
3.2. Modélisation spatiale des Observations.	26
Modélisation de la distribution des animaux :	26
Modélisation des activités anthropiques :	28
Identification des habitats prioritaires :	29
Identification des zones d'activité humaine	30
Identification des zones de conflits potentiels.....	31
3.3. Estimations d'abondance.....	33
3.4. Analyses de sensibilité	33
Recommandation de mise en œuvre des campagnes aériennes d'observation	37
Recommandation concernant les habitats prioritaires dans l'arc antillais	38
Conclusion	39
Références :	40
Liste des figures et tableaux :	41
Annexe :	43

Avant-propos

L'Agence des aires marines protégées, créée par la loi du 14 avril 2006, a pour objet d'apporter un appui aux politiques publiques en matière de création et de gestion d'aires marines protégées. Pour mener à bien cette mission, elle cherche à constituer une base de connaissance à partir de données existantes ou, le cas échéant, en organisant leur acquisition.

Dans cette optique, l'Agence a décidé de mettre en œuvre, sur toutes les eaux sous juridiction française, un inventaire des populations de mammifères marins par comptage aérien. La priorité a été donnée aux Antilles françaises, de façon à fournir au plus vite des éléments pour le dossier de sanctuaire des mammifères marins. Une campagne d'observations, sous la maîtrise d'œuvre du Centre de Recherche sur les Mammifères Marins de l'Université de La Rochelle, s'est déroulée en février-mars 2008. Elle a bénéficié sur place de l'appui d'Evasion Tropicale et de la SEPANMAR, impliqués depuis des années dans les réseaux associatifs de suivi.

Ce rapport reprend les données exposées lors du rapport préliminaire, et présente les résultats d'un exercice de modélisation visant à identifier les zones prioritaires de conservation autour de l'arc antillais.

Introduction

Contexte :

La conservation de la biodiversité marine en France est notamment encadrée par plusieurs directives européennes, dont la Directive Habitats Faune Flore, la Directive Oiseaux et bientôt la Directive Cadre sur la protection du Milieu Marins, qui concernent de la manière croissante les habitats marins inclus dans la totalité de la Zone Economique Exclusive (ZEE) ou de la Zone de Protection Ecologique (ZPE) autour des côtes de métropole. Cependant les engagements de la France relatifs à la conservation du milieu marin concernent des espaces beaucoup plus étendus dans les collectivités françaises d'outre-mer qu'en métropole et représentent des enjeux mondiaux pour de nombreux habitats ou espèces remarquables caractéristiques des milieux tropicaux qui ne sont pas incorporés dans les textes communautaires. L'Agence des Aires Marines Protégées souhaite donc étendre rapidement à l'outre-mer les efforts d'inventaire, de suivi et de conservation zonale du patrimoine marin dans les eaux sous juridiction française situées hors du territoire métropolitain.

Plusieurs initiatives diplomatiques fournissent des cadres régionaux pour le développement d'une politique de conservation des milieux marins tropicaux par l'établissement d'aires marines protégées. Dans le secteur des Caraïbes et de la Guyane française, l'accord de Carthagène a été établi dans le cadre de la Convention pour les Espèces Migratrices (*Convention for Migratory Species*, CMS). Enfin, la France a proposé devant la Commission Baleinière Internationale (CBI) de réaliser dans sa ZEE des Antilles un sanctuaire pour les mammifères marins ; ce projet initialement national aurait pour vocation de s'étendre aux autres Etats de la région, plusieurs d'entre eux ayant déjà manifesté leur intérêt pour cette démarche (Royaume-Uni, Pays-Bas, Etats-Unis). Par ailleurs, au plan strictement biologique, il est aussi évident que le morcellement des ZEEs dans la région et la mobilité des espèces concernées plaident très fortement pour une approche coopérative entre les Etats voisins. En effet, il est extrêmement important de considérer le paramètre de connectivité existant entre différentes aires marines protégées lorsqu'un tel réseau est mis en place (Halpern *et al.* 2006).

Le présent projet de recensement des cétacés dans la ZEE des Antilles françaises a pour objectif général d'identifier les habitats associés aux plus fortes densités ou aux plus fortes diversités de prédateurs supérieurs marins (mammifères et oiseaux) et de modéliser ces zones d'intérêt écologique pour l'ensemble de l'arc des Antilles.

Objectifs :

- Contribuer à la définition des zones importantes pour la conservation des cétacés dans la ZEE des Antilles françaises.
- Décrire la distribution des espèces observées, leurs habitats préférentiels ainsi que leurs abondances relatives au mois de février.
- Documenter la distribution des oiseaux et tortues de mer au large, ainsi que des activités humaines.
- Etablir un état de référence des populations d'oiseaux et de mammifères marins au sein de l'arc antillais.

Etat des connaissances :

La diversité des espèces de cétacés présentes dans les eaux des petites Antilles est assez bien documentée, principalement à proximité des îles et essentiellement aux abords des côtes sous le vent (Mer Caraïbe). Par contre, les densités relatives et la distribution en fonction des différents habitats, dont ceux de l'Atlantique, le sont beaucoup moins. En Guadeloupe, les connaissances actuelles les plus avancées concernent principalement les cachalots, grâce à un suivi par photo-identification réalisé depuis une dizaine d'années, ainsi que la fréquentation durant toute l'année de la côte sous le vent par les autres espèces (Rinaldi, 2007). En Martinique, les abondances relatives et la distribution des cétacés dans les eaux territoriales de la Martinique sont suivies depuis cinq ans par des campagnes ponctuelles au printemps et à l'automne, campagnes combinant observations visuelles et détections acoustiques (Jeremie, 2006). En plus des travaux de suivi réalisés de manière régulière par les organismes implantés localement (Association Evasion Tropicale et SEPANMAR, plus récemment Association Breach), trois campagnes d'observation des cétacés réalisées en Caraïbes ont traversées les eaux des Antilles françaises, deux conduites par l'IFAW lors des hivers 1996 et 2000 et la troisième par la NOAA en février-mars 2000. Les deux premières ciblaient principalement les cachalots fréquentant les côtes sous le vent de Guadeloupe, Dominique, Martinique, Grenade et Tobago. Ces campagnes ont permis d'y documenter aussi la présence des petits cétacés (Boisseau *et al.* 2000). La troisième campagne, conduite par la NOAA, s'intéressait plus spécifiquement aux baleines à bosse *Megaptera novaeangliae*, afin d'en déterminer l'abondance dans la partie sud-est de la Caraïbe, zone allant de la République Dominicaine à la côte Nord du Venezuela (Swartz *et al.* 2000). Cette campagne combinant détection visuelle et acoustique a permis aussi de produire des données de présence pour les autres espèces de cétacés, mais toujours dans les eaux à proximité des côtes sous le vent.

En ce qui concerne les oiseaux marins, de multiples actions de dénombrement aux colonies, synthétisées sur le site birdlife (<http://www.birdlife.org/regional/caribbean/index.html>), ont permis d'établir la liste des espèces susceptibles d'être rencontrées en mer au large de la Guadeloupe et de la Martinique (Annexe 1). Parmi celles-ci, la plus abondante serait la sterne Fuligineuse (*Sterna fuscata*), dont les effectifs nicheurs sur les deux îles atteindraient 22500 individus.

Choix de la méthode :

Au vu des objectifs de cette étude et de la surface à couvrir, il a été décidé d'appliquer la méthode d'observation par avion. Toutes les études des cétacés menées jusqu'à aujourd'hui aux Antilles ont permis de collecter des informations concernant essentiellement les côtes sous le vent et rarement au-delà de 20 milles nautiques au large des îles. Les côtes au vent (Atlantique), dont l'accès est plus difficile en raison des conditions de mer, et les zones océaniques notamment, n'ont fait que rarement l'objet d'échantillonnage (uniquement dans les eaux territoriales de la Martinique lors des campagnes SEPANMAR de 2003 à 2007). Au large de la Martinique et de Guadeloupe, La ZEE s'étend jusqu'à 80 milles nautiques environ en Mer Caraïbe (62°50' W) et jusqu'à 200 milles nautiques en Atlantique (57°30' W). Cette zone étant très vaste, un échantillonnage par bateau suivant le plan d'échantillonnage proposé pour cette campagne nécessiterait environ 400 heures d'observation, soit approximativement 50 jours de mer. L'objectif est ici de produire une photographie instantanée et globale des habitats préférentiels inclus dans la ZEE des Antilles françaises totalisant une surface d'environ 123 000 km².

Le principal avantage de l'observation par avion est d'acquérir une image quasi-instantanée de la distribution et des densités à une échelle géographique pertinente pour toutes les espèces de cétacés (couvrir de vastes zones en peu de temps, coût comparativement faible). L'autre avantage est la détection d'espèces peu visibles par bateau, notamment par leur comportement discret en surface (ex : petit rorqual). Enfin cette méthodologie permet aussi de

combiner d'autres couches d'informations, notamment des données concernant d'autres espèces de la faune marine, comme les oiseaux de mer et les tortues marines. Enfin les activités humaines peuvent être aussi relevées : navires de pêche, plaisance, commerce, etc. Par ailleurs, la flexibilité de mise en œuvre est aussi un avantage important de l'observation par avion car elle permet d'utiliser les meilleures fenêtres météorologiques pour optimiser les conditions d'observation et de détection des cétacés.

I. Récolte et archivage des données

Période et zone d'étude :

La campagne s'est déroulée du 4 février au 5 mars 2008. La zone d'étude correspond à la ZEE des Antilles Françaises qui s'étend jusqu'à 200 milles nautiques à l'est (Océan Atlantique) et environ 80 milles nautique à l'ouest (Mer Caraïbe) des Iles de la Guadeloupe et de la Martinique, ainsi que le pourtour des Iles du nord (St Barthélemy et St Martin). Ces zones englobent plusieurs habitats maritimes : plateau insulaire, talus et plaine abyssale (figure 3a).

Protocole d'étude et équipement :

Le cadre général de la méthodologie s'appuie sur la technique éprouvée du transect linéaire aérien (Certain & Bretagnolle 2008). Cette méthode possède un double avantage, produire des données de distribution et de densité pour les cétacés. Ces données peuvent aboutir à des estimations d'abondances relatives pour les espèces présentant un nombre suffisant d'observations.

La méthode repose donc sur l'observation aérienne le long de transects linéaires préalablement établis. L'aéronef utilisé est un Partenavia P68C équipé de fenêtres bulle (*bubble windows*, figure 1). Il s'agit d'un appareil bimoteur de six places à ailes hautes et possédant une autonomie de sept heures de vol. Deux observateurs sont positionnés face aux *bubble windows* installées au milieu de l'appareil de chaque côté et offrant une vision verticale. Les observations sont réalisées à l'œil nu dans une bande de 500 m de large environ de part et d'autre du transect. Les distances au transect des groupes de cétacés observés sont relevées à l'aide d'un inclinomètre (figure 2a). Toutes les données, observations et conditions d'observation, sont saisies instantanément par une troisième personne (figure 2b et 2c). La méthode nécessite des conditions de vent inférieures ou égales à 4 beaufort (vent ≤ 15 nœuds) afin d'avoir une mer du vent affectant le moins possible la détectabilité ; la houle sans déferlement ne gêne pas l'observation aérienne.

Figure 1 : aéronef P 68C de la compagnie Air KeyWest équipé de *bubble windows*



Figure 2 : les observateurs (a : utilisation de l'inclinomètre pour les relevés de distance, b et c : observation et saisie des données en vol)



Echantillonnage et stratification :

L'ensemble de la zone d'étude est divisée en trois régions distinctes et non contiguës : les eaux de la Martinique, celles de la Guadeloupe et celles des Iles du nord. Ces régions totalisent une surface d'environ 123 000 km² (tableau 1).

Les régions Martinique et Guadeloupe ont été divisées en 3 sous-zones ou *strates* correspondants à des grands secteurs océaniques distincts : Caraïbe, Atlantique côtier (plateau insulaire et talus) et Atlantique océanique (plaine abyssale) (figure 3b).

Figure 3 : carte de la zone d'étude avec la bathymétrie : limites de la ZEE des Antilles françaises (a) et sous zones d'échantillonnage A à G (b)

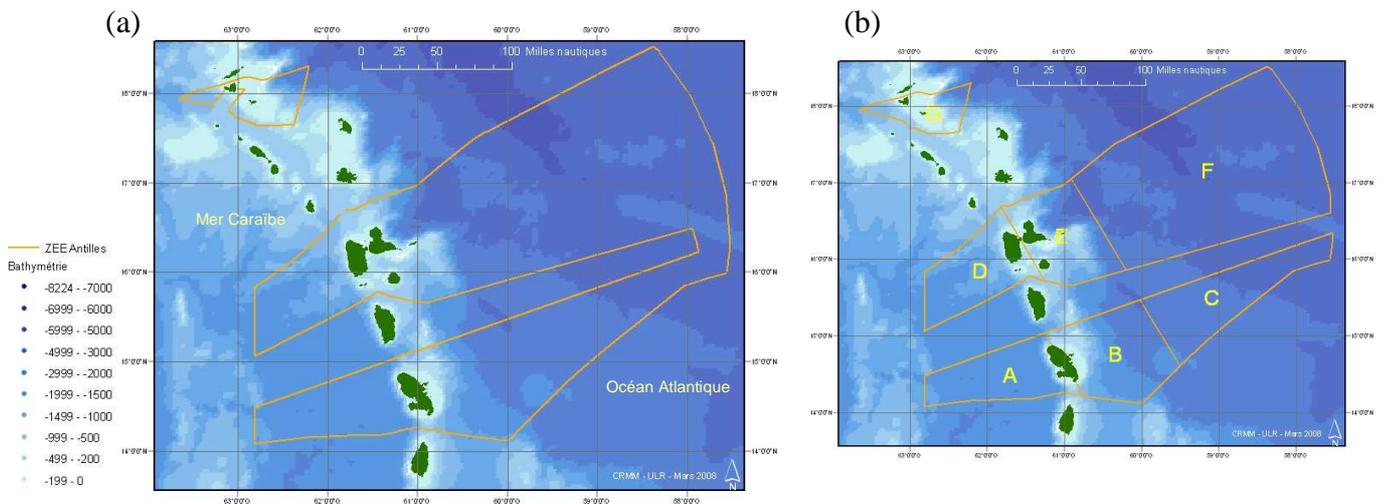
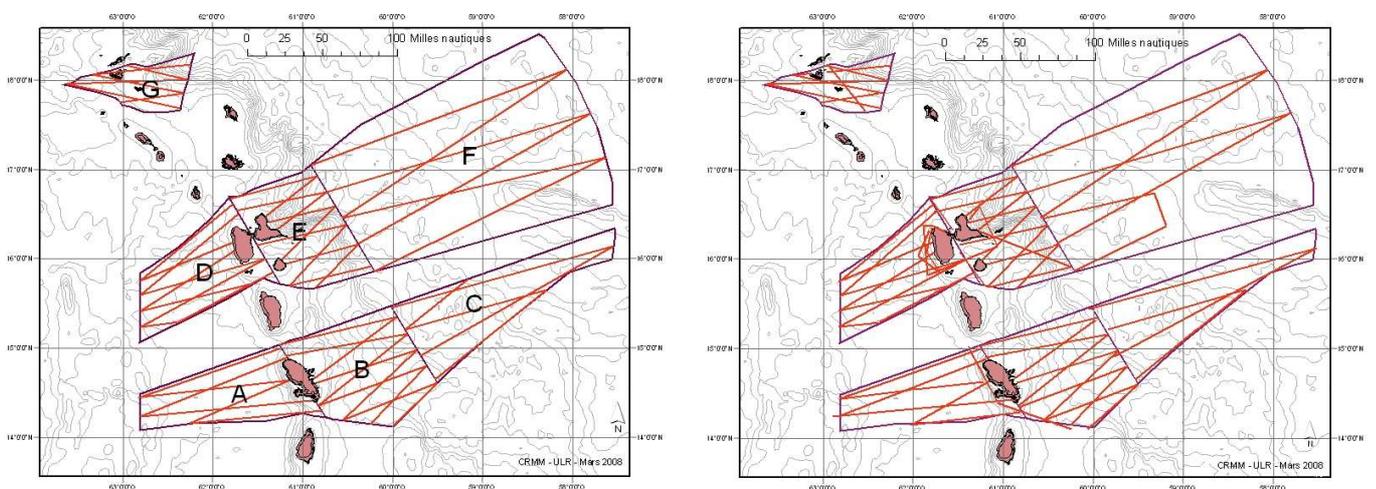


Figure 4 : cartes du plan d'échantillonnage prévu dans chacun des blocks (a) et de l'échantillonnage réalisé (b)

(a) Echantillonnage total prévu

(b) Echantillonnage total réalisé



La conception des transects dans chacune de ces strates suit un profil en zig-zag, largement utilisé dans les campagnes d'échantillonnage de cétacés car il permet une couverture homogène et systématique de chaque strate tout en garantissant une variance plus robuste dans les estimations d'abondance (Buckland *et al.* 2001). Ces plans d'échantillonnage ont été générés en répartissant de manière la plus homogène possible l'effort global dans chacune des strates (figure 4a), et en considérant aussi des contraintes techniques, comme le temps de vol, sur les transects (autonomie, durée en effort, etc.).

L'effort total prévu théoriquement était de 8100 km : 3300 en Martinique, 4100 en Guadeloupe et 700 pour les îles du nord (tableau 1). Le total réalisé est en fait plus important car quelques vols de transit ont été effectués dans les conditions standardisées d'observation et sont donc comptabilisés en vol avec effort pour les strates A, D et E. Pour la strate F, par contre l'effort réalisé est moins important que prévu. De mauvaises conditions météorologiques ont obligé d'interrompre un vol en cours, et il n'a pu être reporté (figure 4b). Au final, ce sont 70,7 heures de vol qui ont été nécessaires à la réalisation de cette campagne (72 % du temps de vol en effort et 28 % en transit, soit un total de 50,9 heures en effort de prospection).

Tableau 1 : stratification et répartition de l'effort d'observation

Région	Block	Surface (km ²)	Effort prévu (km)	Effort réalisé (km)	Echantillonnage intensité (%)
Martinique Caraïbe	A	11400	1047	1128	9,9
Martinique Atlantique	B	14680	1248	1211	8,2
Martinique Atlantique	C	14120	991	1039	7,4
Guadeloupe Caraïbe	D	11840	1198	1481	12,5
Guadeloupe Atlantique	E	12560	1017	1316	10,5
Guadeloupe Atlantique	F	53170	1924	1601	3,0
Iles du nord	G	5088	658	710	14,0
Total		122858	8085	8486	6,9

Collecte des données :

Les données sont collectées par les 2 observateurs et sont communiquées oralement au navigateur. Elles sont saisies instantanément grâce au logiciel *AudioVOR 8.6* développé pour les campagnes aériennes SCANS 1 et 2 (Hiby et Lovell, 1998). Le navigateur positionné à l'arrière suit l'itinéraire de vol sur le PC grâce au logiciel et une connexion avec un GPS, et il saisit les conditions et paramètres d'observation indiqués par les observateurs. A chaque observation, un enregistrement vocal peut être stocké par le logiciel, ce qui permet de vérifier ultérieurement que toutes les observations ont été correctement enregistrées, une option particulièrement utile dans les zones de forte densité d'observations.

Les données d'observation concernent les cétacés, mais aussi les oiseaux de mer, les tortues, les macros déchets, les bateaux (pêche/plaisance/commerce/...), les dispositifs de concentration de poissons (DCP) et tout engin de pêche matérialisé par des bouées. Les données concernent aussi les conditions environnementales (*état de la mer, la turbidité, la couverture nuageuse et l'éblouissement*) ainsi qu'un indice de détectabilité des cétacés (référence petits delphinidés) jugé par l'observateur (conditions *bonnes, moyennes, pauvres*). Pour les observations de cétacés la distance au transect est relevée grâce à un inclinomètre.

L'observation des animaux depuis l'avion qu'il s'agisse d'oiseaux ou de mammifères marins ne permet pas dans tous les cas d'identifier clairement l'espèce. Dans certains cas la similitude visuelle entre deux espèces qu'elle soit physique et/ou comportementale ne peut permettre d'être affirmatif sur leur nature. Les espèces se ressemblant sont alors regroupées en taxons (classes taxonomiques) afin d'éviter toute erreur d'identification sur le terrain (Tableau 2).

Tableau 2 : Classement des espèces par taxons en fonction de leurs caractéristiques visuelles depuis l'espace aérien

Classe	Espèce	Taxon
Mammifères marins	Rorqual de Bryde (<i>Balaenoptera edeni</i>) / rorqual boréal (<i>Balaenoptera borealis</i>)	Rorqual moyen
Mammifères marins	Petit rorqual (<i>Balaenoptera acutorostrata</i>)	
Mammifères marins	Baleine à bosse (<i>Megaptera novaeangliae</i>)	
Mammifères marins	Dauphin tacheté pantropical (<i>Stenella attenuata</i> / <i>D. tacheté</i> de l'Atlantique (<i>S. frontalis</i>) / <i>D. bleu & blanc</i> (<i>S. coeruleoalba</i>) / <i>D. à long bec</i> (<i>S. longirostris</i>), <i>D. clymène</i> (<i>S. clymene</i>)	Stenella spp.
Mammifères marins	Dauphin de Fraser (<i>Lagenodelphis hosei</i>)	
Mammifères marins	Grand dauphin (<i>Tursiops truncatus</i>)	
Mammifères marins	Globicéphale tropical (<i>Globicephala macrorhynchus</i>)	
Mammifères marins	Pseudorque (<i>Pseudorca crassidens</i>)	
Mammifères marins	Orque épaulard (<i>Orcinus orca</i>)	
Mammifères marins	Cachalot (<i>Physeter macrocephalus</i>)	
Mammifères marins	Cachalot nain (<i>Kogia sima</i>) / cachalot pygmée (<i>Kogia breviceps</i>)	
Mammifères marins	Baleine à bec de Cuvier (<i>Ziphius cavirostris</i>) / Baleine à bec indéterminée (Ziphiidé ind.)	Baleines à bec
Oiseaux marins	Fou brun (<i>Sula leucogaster</i>) / Fou à pieds rouges (<i>Sula sula</i>)	Fous « bruns »
Oiseaux marins	Frégate superbe (<i>Fregata magnificens</i>)	
Oiseaux marins	Grand labbe (<i>Catharacta spp</i>)	
Oiseaux marins	Océanite spp.	Océanites
Oiseaux marins	Paille-en-queue à bec rouge (<i>Phaethon aethereus</i>) / Paille-en-queue à bec jaune (<i>Phaethon lepturus</i>)	Pailles-en-queue
Oiseaux marins	Puffin des anglais (<i>Puffinus puffinus</i>) / Puffin d'Audubon (<i>Puffinus lherminieri</i>)	« Petits » puffins
Oiseaux marins	Puffin ind.	
Oiseaux marins	Noddi brun (<i>Anous stolidus</i>)	
Oiseaux marins	Sterne fuligineuse (<i>Sterna fuscata</i>) / Sterne bridée (<i>Sterna anaethetus</i>)	Sternes « brunes »
Oiseaux marins	Sterne de Dougall (<i>Sterna dougallii</i>) / Sterne Pierregarin (<i>Sterna hirundo</i>) / Sterne des Antilles (<i>Sterna Antillarum</i>)	Sternes « grises »
Oiseaux marins	Sterne royale (<i>Thalasseus maximus</i>)	
Tortues Marines	Tortue Luth (<i>Dermochelys coriacea</i>)	
Tortues Marines	Tortue de Caouanne (<i>Caretta caretta</i>) / T. verte (<i>Chelonia mydas</i>) / T. imbriquée (<i>Eretmochelys imbricata</i>) / T. olivâtre (<i>Lepidochelys olivacea</i>) / T. de Kemp (<i>Lepidochelys kempii</i>)	Tortues à écailles

Traitement des données :

Les données d'observation, ainsi que l'effort et les conditions d'observation sont transférées dans une base de données sous MS Access 2000 après validation par les observateurs. Les cartes et les pré-analyses de distribution ont été réalisées avec le logiciel ArcGis 9.2 et son extension Spatial Analyst. Les données sont ensuite analysées sous le logiciel libre R pour la construction des modèles spatiaux.

II. Analyses statistiques.

2.1. Modélisation spatiale

Objectif et limitations:

Le but de cet exercice est de proposer des cartographies étendues à l'ensemble de l'arc antillais, en s'appuyant sur les informations récoltées pendant les survols de la ZEE française. Ce type de cartographie peut-être obtenu sur la base de modèles spatiaux qui sont établis en deux étapes :

- (1) la mise en évidence de la relation statistique existant entre les densités d'animaux observées à une localité et un certain nombre de descripteurs environnementaux,
- (2) la prédiction de ces mêmes densités sur l'ensemble d'un secteur pour lequel l'on dispose d'une information numérique ou du moins qualitative pour ces descripteurs.

A l'issue de ce processus, le gestionnaire aura accès à une cartographie des habitats potentiels de la faune marine, réalisée sur la base des relations espèces-environnements qui auront été mises en évidence.

Un certain nombre d'hypothèses sont nécessaires à l'établissement de ces cartographies, dont une qui stipule que les relations espèces-environnement sur lesquelles le modèle se base doivent être invariables à l'intérieur de la fenêtre spatio-temporelle pour laquelle des prédictions sont faites. En d'autre terme, il est possible d'obtenir une prédiction en janvier à partir d'un modèle construit sur des données récoltées en juin, sous l'hypothèse que les animaux réagissent de la même manière aux variations environnementales en janvier et en juin. Il en est de même pour des différences spatiales : un modèle statistique peut prédire les densités d'animaux au sein d'une zone non-échantillonnée pour peu que les relations espèces-environnements soient les même dans la zone échantillonnée et la zone prédite. Cette hypothèse est de fait très contraignante, car les changements d'activité des animaux d'un secteur à un autre ou d'une saison à l'autre ne permettent bien souvent pas de soutenir cette hypothèse. Nous soulignons donc le fait que les prédictions présentées ci-après ne peuvent être considérées comme fiables qu'à l'intérieur de la zone d'étude et durant la période d'échantillonnage. Nous avons néanmoins étendu ces prédictions à l'ensemble de la zone de l'arc antillais de manière à fournir au gestionnaire une information aussi complète que possible, bien que moins fiable à mesure qu'elle concerne des régions plus éloignées de la ZEE françaises.

Descripteurs environnementaux :

Dans le cas présent, nos descripteurs environnementaux seront des données satellitaires téléchargées depuis http://las.pfeg.noaa.gov/oceanWatch/oceanwatch_safari.php (site web NOAA). Ces données, listées en tableau 3 et présentées en figure 5, regroupent des descripteurs environnementaux statiques (bathymétrie) et dynamiques (température de surface ; Chlorophylle a de surface ; anomalie de hauteur d'eau). Les valeurs de gradients associés à ces descripteurs ont également été calculées. Deux descripteurs géographiques additionnels, distance à la côte et distance au front océanique le plus proche, ont aussi été déduits des positions d'observations été calculés. La localisation des fronts a été permise via un descripteur environnemental fourni par NOAA et qui combine un certain nombre d'informations océanographiques pour dériver la probabilité qu'un front océanique (front thermique, front halin, etc...) se forme à un endroit donné.

Figure 5 : Distribution spatiale des descripteurs environnementaux utilisés pour caractériser les habitats prioritaires des prédateurs supérieurs marins de l'arc antillais. La lettre « g » fait référence aux gradients. L'échelle de couleur se répartit depuis le bleu (valeurs faibles) au rouge (valeurs fortes)

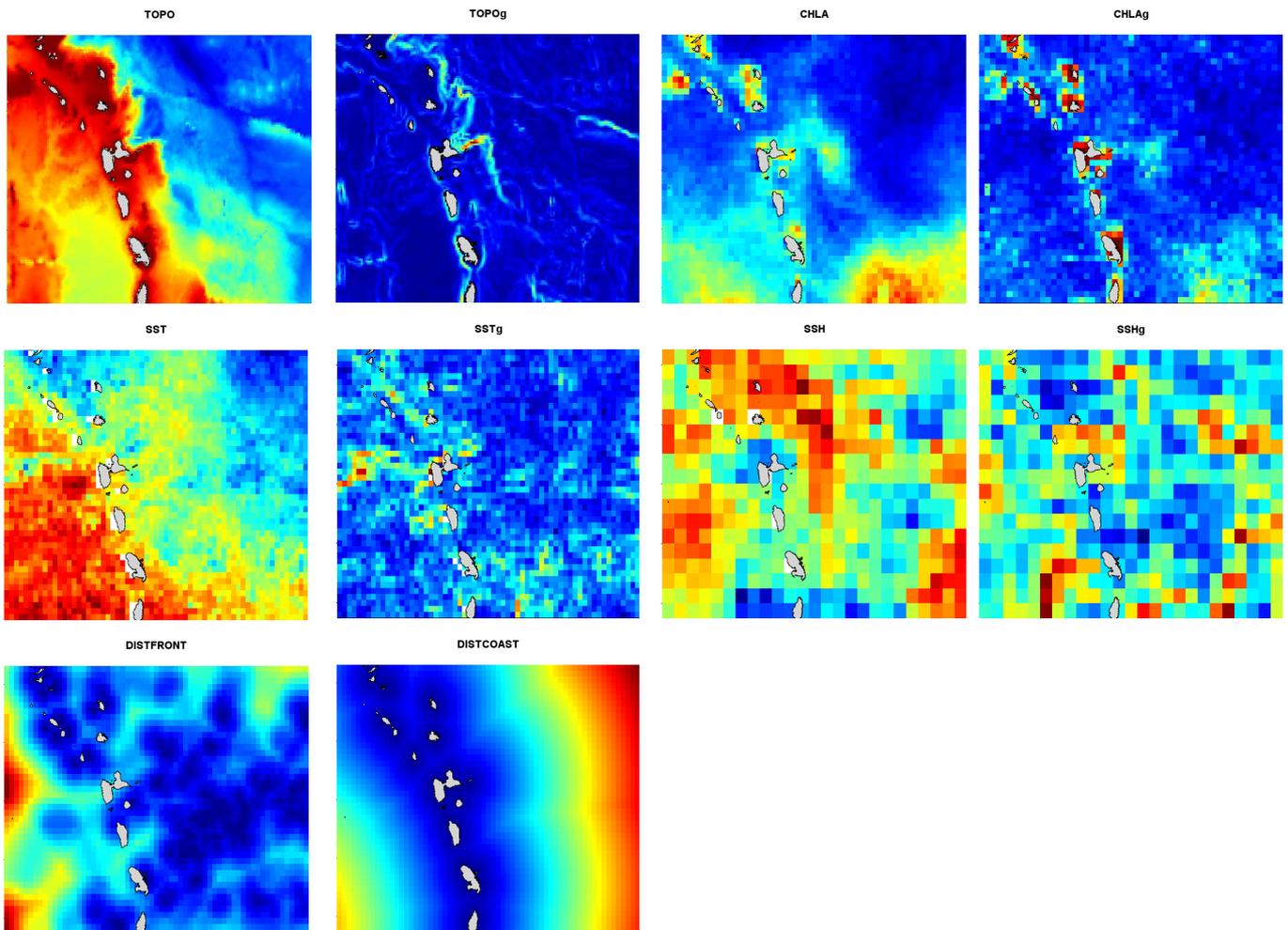


Tableau 3 : Liste des descripteurs environnementaux utilisés et abréviations correspondantes

Descripteur environnemental	abréviation	gradient
Température de surface	SST	SSTg
Chlorophylle a de surface	CHLA	CHLAg
Anomalies de hauteur d'eau	SSH	SSHg
Bathymétrie	TOPO	TOPOg
Distance à la côte la plus proche	DISTCOAST	
Distance au front océanique le plus proche	DISTFRONT	

Préparation des données :

De manière à disposer de données standardisées (Certain *et al.* 2008), chaque transect parcouru par l'avion a été subdivisé en une succession de segments de même longueur (0.25 degrés décimaux). Chacun de ces segments peut être localisé géographiquement, et contient pour chaque espèce le nombre d'animaux observés, ainsi que les informations environnementales correspondantes. Chaque segment correspond à un même effort d'échantillonnage, de manière à ce que tous les segments soient comparables entre eux.

Modèles Additifs Généralisés :

Nous avons utilisés les Modèles Additifs Généralisés (GAMs, Wood & Augustin 2002) pour modéliser les relations entre densités d'individus et environnement. Ces modèles ont pour avantage de pouvoir tenir compte des relations non-linéaire existant entre les densités d'animaux et les descripteurs environnementaux (ce qui permet de tenir compte d'éventuels effets de seuil ou d'optimums, etc...). Les modèles ont été réalisés pour chacune des espèces ou taxons d'oiseaux les plus abondantes (pailles-en-queue, sternes brunes, fous bruns) ; pour l'ensemble des populations de cétacés (toutes espèces confondues) et pour visualiser les zones les plus impactées par des activités humaines (bouées de pêche et déchets flottants). Le trop faible nombre d'observations obtenus pour les taxons restants (cf. tableau 4 & tableau 6) ne permettait pas d'obtenir de modèle robuste de leur distribution spatiale.

Les modèles statistiques de distribution spatiale des animaux sont basés sur 4 covariables. Le choix des covariables environnementales incluses dans chaque modèle est déterminé par une procédure de sélection de modèle « en avant » (*i.e.* « *forward model selection* »), dans laquelle chaque covariable est d'abord testée seule et la plus performante est retenue. La performance de chaque modèle est évaluée à l'aide du score généralisé de *cross validation* (GCV), qui doit être le plus petit possible. Un deuxième tour est alors organisé avec les covariables restantes, et ainsi de suite jusqu'à ce que 4 covariables soient sélectionnées (cf. Wood & Augustin 2002). Nous avons choisi de limiter notre exercice de modélisation aux 4 covariables les plus pertinentes de manière à identifier clairement les facteurs environnementaux les plus importants pour la distribution des prédateurs supérieurs en mer.

Définition de zones prioritaires d'intérêt :

Un indice d'intérêt prioritaire en terme de biodiversité, reflétant les zones les plus fréquentées par les différentes espèces de prédateurs supérieurs, a été mis au point par notre équipe. Il se calcule comme suit sur la base des prédictions spatiales issues de nos modèles :

$$I_s = \sum_1^i \frac{N_{i,s}}{M_i} \times c_i ,$$

Où I_s correspond à la valeur de l'indice d'importance au point d'observation s ; $N_{i,s}$ correspond à l'abondance prédite du $i^{\text{ème}}$ taxon au point s ; M_i correspond à l'abondance maximale prédite pour le taxon i ; et c_i est un coefficient de pondération reflétant l'importance du $i^{\text{ème}}$ taxon. Pour cette exercice, nous avons $i=4$ taxons (fous bruns, sternes brunes, pailles-en-queue et cétacés) pour lesquels nous avons un modèle spatial. N'ayant que peu d'informations sur la valeur patrimoniale ou écosystémique de ces taxons, nous avons appliqué uniformément une valeur de 1 pour le coefficient de pondération pour les oiseaux ; et 3 pour les cétacés, de manière à ce que chaque groupe (cétacé/oiseau) ait le même poids. Ainsi, l'indice résultant fait l'hypothèse que les oiseaux et les cétacés sont aussi importants dans le processus de désignation d'aire marine protégée. Un effort de recherche supplémentaire, notamment bibliographique mais aussi d'interview auprès des acteurs locaux de la biodiversité et des populations, est nécessaire si l'on souhaite établir des valeurs espèces-spécifiques pour ces coefficients.

Mesure de l'intensité des activités humaines :

Le mode de calcul de l'indice d'habitat prioritaire peut également être transposé au calcul d'un indice spatialisé de l'intensité de l'activité humaine :

$$A_s = \sum_1^a N_{a,s} \times c_a$$

Où A_s correspond à l'intensité globale de l'activité anthropique au point s ; $N_{a,s}$ correspond à l'abondance prédite du $a^{\text{ème}}$ type d'activité, et c_a est un coefficient de pondération pour le $a^{\text{ème}}$ type d'activité reflétant son impact sur le milieu marin. Pour ce calcul, nous distinguons 3 types d'activités : les bateaux de pêche ; les bouées de pêche et les activités récréatives (plaisance). Nous considérons que les activités de pêche ont plus d'impact sur le milieu marin, et sont en outre plus susceptibles d'être à l'origine de conflits d'intérêts entre gestionnaires de l'environnement et activités économiques locales. En conséquence, les valeurs du coefficient de pondération seront de 2 pour les activités de pêche, contre 1 pour les activités récréatives. Ces valeurs pourraient être affinées via une série d'interview des acteurs locaux.

Calcul d'un indice de conflit potentiel :

Nous proposons d'identifier les zones où des conflits d'usages pourraient potentiellement apparaître dans le cadre de projets de sanctuarisation des espaces marins. Le calcul d'un indice de conflit potentiel C_s découle naturellement de la combinaison des deux indices précédents :

$$C_s = I_s \times A_s.$$

Les plus fortes valeurs pour C_s sont ainsi attendues dans les zones d'habitats prioritaires qui sont également le siège d'une activité anthropique intense.

2.2. Estimations d'abondances

Les estimations d'abondance ont été calculées pour 4 taxons d'oiseaux (sternes brunes, fous bruns, pailles-en-queue et frégate), selon la méthode du *strip-transect* (Certain & Bretagnolle 2008), avec une largeur de bande de 500m. Les intervalles de confiance à 95% associés à ces estimations d'abondances ont été calculés par *bootstrap*, en construisant 999 pseudos-échantillons par tirage aléatoire avec remise dans les données découpées qui ont servi pour les analyses spatiales. Pour chacun de ces taxons d'oiseaux, nous estimons la densité d'observation ainsi que la densité d'individus.

En ce qui concerne les mammifères marins, le peu d'observation par espèce et même en regroupement par taxon ne nous permet pas d'utiliser les méthodes d'analyse « *distance sampling* » qui requièrent au minimum une trentaine d'observations (Buckland *et al.* 2001). Nous proposons néanmoins une estimation d'abondance par *strip-transect* pour les cachalots et les baleines à bosse qui, bien que conceptuellement moins fine, permet d'obtenir un ordre de grandeur.

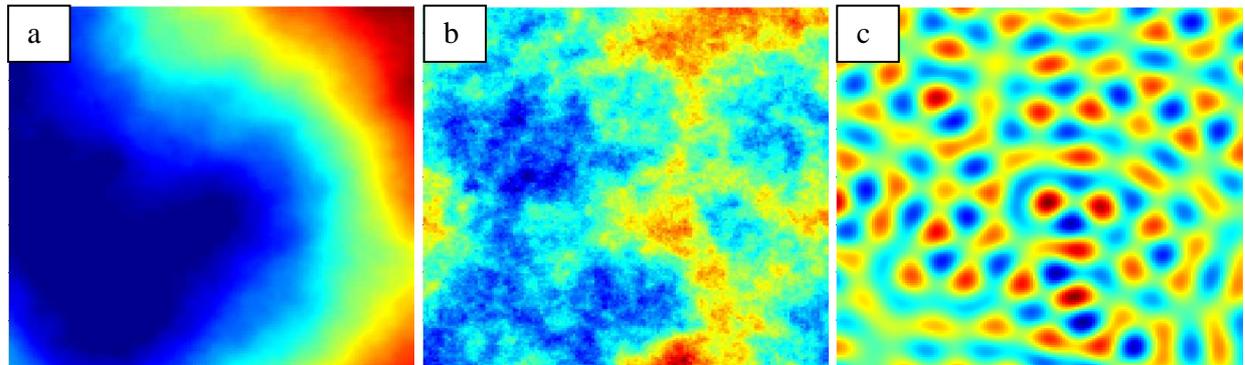
Nous avons également calculé ces estimations d'abondances pour les principaux indices d'activité anthropique, à savoir d'une part les bateaux de pêche et les bouées de pêche, qui sont une information permettant d'évaluer le niveau d'utilisation des services fournis par les écosystèmes pélagiques au sein de l'arc antillais, ainsi que les macro-déchets flottants qui sont un indice de l'impact de cette forme de pollution sur les écosystèmes.

2.3. Analyses de sensibilité

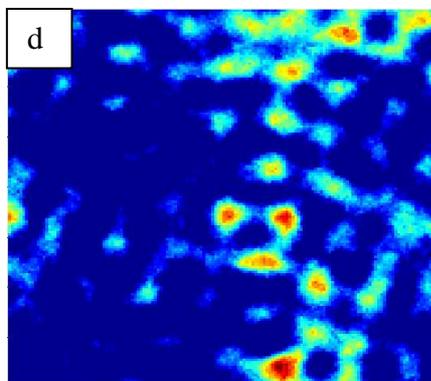
Démarche générale :

Nous avons enfin évalué la performance de notre échantillonnage pour le calcul des estimations d'abondance, afin d'évaluer les possibilités d'optimiser l'effort dans le cadre de campagnes futures. Plus spécifiquement, nous avons mesuré l'impact de trois facteurs sur la précision des estimations d'abondance dans le cas de prédateurs supérieurs. Le premier facteur est l'effort d'échantillonnage, que l'on peut exprimer en % de la zone couverte. C'est en effet le seul facteur choisi par le gestionnaire, et qui peut donc être modulé en fonction des besoins. Les seconds et troisièmes facteurs dépendent directement des animaux, ce sont la densité des groupes, et la variabilité des tailles de groupes. En effet, les estimations d'abondances seront d'autant plus précises que les groupes d'animaux sont nombreux, et que le nombre d'individus par groupe varie peu. Pour connaître, par espèce, la variabilité des tailles de groupe, nous ajustons une loi binomiale négative à la distribution des tailles de groupes observées par maximum de vraisemblance. Enfin, des distributions spatiales possibles pour les animaux sont simulées au travers d'un processus complexe permettant de mimer les propriétés statistiques des données de comptage (fig. 6). 999 simulations sont créées, et pour chacune d'elle, un échantillonnage fictif par transect est réalisé, qui fait l'hypothèse d'une probabilité de détection égale à 1 sur l'ensemble de la bande échantillonnée. Les estimations d'abondances et les coefficients de variation associés issus de ces simulations permettent alors de prédire un coefficient de variation pour un effort d'échantillonnage, une densité de groupe et une variabilité de taille de groupe donnée.

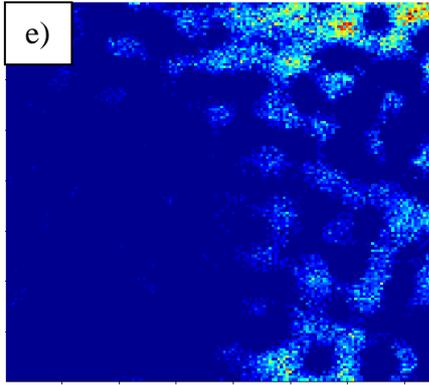
Figure 6 : Exemple de simulation de données de comptage (a, b, c, d, e, f). C'est sur cet échantillonnage que des estimations d'abondance seront calculées.



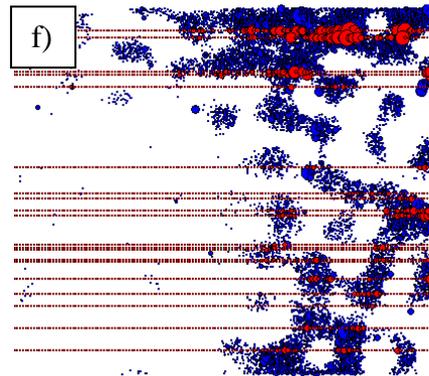
(a,b,c) Trois champs gaussiens, structurés spatialement à trois échelles différentes, sont simulés.



(d) Ces trois champs sont additionnés, et le champ résultant est seuillé à 0 pour obtenir un champ latent, structuré à multi-échelle et représentant les densités théoriques des groupes.



(e) pour chaque pixel, le nombre de groupe est choisi en tirant dans une loi de poisson d'intensité égale à la valeur de densité théorique des groupe dans le pixel.



(f) les groupes sont positionnés dans l'espace et échantillonnés par des transects perpendiculaires placés aléatoirement (en rouge).

Application :

Ainsi, une analyse de sensibilité sera effectuée pour tous les taxons d'oiseaux pour lesquelles une estimation d'abondance a été calculée, de manière à situer l'échantillonnage tel qu'il a été fait dans un « espace des possibles » reflétant les évolutions potentielles de la précision de cet échantillonnage en fonction de la densité des animaux et de l'effort, pour une variabilité des tailles de groupe donnée. En ce qui concerne les mammifères marins, nous avons effectué le même type d'analyse dans le but de déterminer si une augmentation de l'effort d'échantillonnage permettrait d'améliorer la représentativité des estimations d'abondances pour les espèces les plus observées (cachalots et baleines à bosse).

III. Résultats et interprétation :

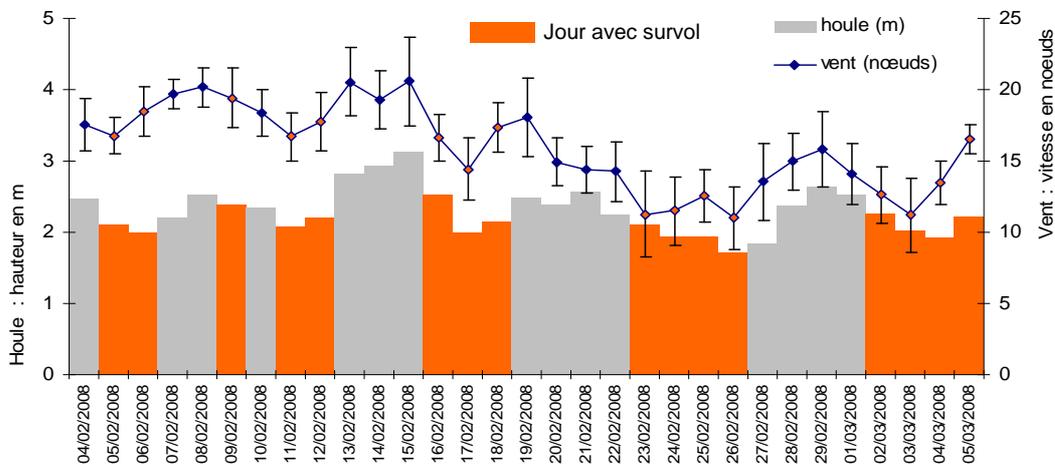
3.1. Synthèse des Observations

Conditions d'observation :

Les conditions météorologiques rencontrées lors de cette campagne se sont révélées souvent limitantes pour l'observation. Les vents d'est (alizés), avec un régime moyen supérieur à 15 nœuds, étaient au dessus des normales saisonnières et sont restés soutenus avec peu d'accalmies significatives tout au long du mois de février. Lors de la deuxième partie de la campagne, les averses (régulières et denses en mer) sont devenues un autre facteur limitant.

Ces conditions ont conduit à intensifier la recherche quotidienne de prévisions météorologiques fines. La collaboration avec les services de Météo-France Guadeloupe a permis de trouver de courtes fenêtres météo relativement favorables (figure 7). Néanmoins les conditions n'ont été que très rarement inférieures à 3 Beaufort et les conditions d'observation sont restées généralement moyennes. Ceci a eu pour effet de limiter la largeur de la bande de détection des cétacés à 500 m environ de chaque côté de l'avion.

Figure 7 : Moyennes quotidiennes du vent et de la houle relevées à la bouée atlantique de la Désirade lors de la campagne du 04 février au 05 mars 2008. Les jours de vols sont matérialisés en orange sur les barres d'histogramme de la houle



Observations de cétacés :

En effort d'observation, les observateurs ont enregistré 55 observations de cétacés en effort et 15 en transit dont 8 hors zone d'étude ; ils ont identifié 12 taxons différents dont 9 espèces (tableau 4).

Tableau 4 : total des observations de cétacés réalisées sur transect ou en transit (espèce et taille des groupes)

Espèce	Nombre observations			Taille des groupes	
	Transect	Transit	Total	Min_Max	Moyenne
<i>Balaenoptera edeni / borealis</i>	1	-	1	-	-
<i>Balaenoptera acutorostrata</i>	4	-	4	-	1,0
<i>Megaptera novaeangliae</i>	9	3	12	1_2	1,4
<i>Stenella spp.</i>	7	3	10	1_35	14,0
<i>Lagenodelphis hosei</i>	4	-	4	6_50	29,0
<i>Tursiops truncatus</i>	3	1	4	1_30	16,3
<i>Globicephala macrorhynchus</i>	5	-	5	2_20	10,8
<i>Pseudorca crassidens</i>	2	-	2	1_10	5,5
<i>Orcinus orca</i>	2	-	2	-	2,0
<i>Physeter macrocephalus</i>	8	8	16	1_5	1,4
<i>Kogia sima / breviceps</i>	2	-	2	-	2,0
<i>Ziphius cavirostris</i>	2	-	2	1_2	1,5
Ziphiidé ind.	4	-	4	1_3	2,0
Cétacé ind.	2	-	2	-	1,0
Total	55	15*	70	-	-

* dont 8 hors zone d'étude (au large de la Dominique et d'Antigua)

Les espèces les plus souvent rencontrées ont été la baleine à bosse (n=9) et le cachalot (n=8), les petits delphinidés du genre *Stenella spp* ont fait l'objet de 7 observations, 6 pour les baleines à bec et 5 pour les globicéphales tropicaux (tableaux 4 et 5). Il s'agit des espèces les plus fréquemment rencontrées, toutes les autres espèces ont fait l'objet de moins de 5 observations. Ce premier bilan dresse le constat que les zones couvertes présentent une grande diversité spécifique mais vraisemblablement de faibles densités à l'échelle de la ZEE et pour le mois de février. En outre, trop peu d'observations ont été collectées pour obtenir une estimation d'abondance fiable par espèce (il faut au minimum entre 25 et 30 observations pour modéliser correctement une fonction de détection, sans laquelle les estimations d'abondance ne peuvent être calculées par la méthode distance sampling, Buckland *et al.* 2001).

Les cachalots et les baleines à bec sont de grands plongeurs et leur disponibilité en surface est donc faible. Le nombre d'observations pour ces espèces est assez élevé, ce qui laisse penser qu'elles présentent probablement des densités réelles plus élevées sur certains secteurs que les delphinidés, dont la disponibilité en surface est beaucoup plus importante et qui ont été observés dans les mêmes proportions que les grands plongeurs.

Tableau 5 : total des observations de cétacés réalisées sur transect ou en transit dans chacun des blocks (à gauche) et dans chacune des régions (à droite)

Espèce	Block							Région			
	A	B	C	D	E	F	G	Caraïbe	Atlantique inshore	Atlantique offshore	Iles du nord
<i>Balaenoptera edeni / borealis</i>						1				1	
<i>Balaenoptera acutorostrata</i>			1	3				3		1	
<i>Megaptera novaeangliae</i>			1	1	5		3	1	5	1	3
<i>Stenella spp.</i>	3			2	3			5	3		
<i>Lagenodelphis hosei</i>		1	3						1	3	
<i>Tursiops truncatus</i>				1	2	1		1	2	1	
<i>Globicephala macrorhynchus</i>	2		1				2	2		3	
<i>Pseudorca crassidens</i>					1	1			1	1	
<i>Orcinus orca</i>							2			2	
<i>Physeter macrocephalus</i>	1	1		6	3		1	7	4		1
<i>Kogia sima / breviceps</i>						1	1			1	1
<i>Ziphius cavirostris</i>	1	1						1	1		
Ziphiidé ind.	1	1				1	1	1	1	1	1
Cétacé ind.	1	1						1	1		
Sous Total	9	5	6	13	14	9	6	22	19	15	6
Total				62						62	

D'une manière générale, sur la surface totale prospectée les nombres d'observations par unité d'effort sont faibles (tableau 6a et 6b). Des observations ont néanmoins été réalisées dans chacune des strates prospectées. Les abondances relatives les plus élevées ont été observées pour la baleine à bosse dans les régions Atlantique « côtières » et Iles du Nord, pour le cachalot dans la région « Caraïbe », pour les petits delphinidés dans les régions « Caraïbe et Atlantique côtier », et enfin pour les grands delphinidés dans les régions « Caraïbe et Atlantique océanique » (tableau 6b et figure 8).

Tableau 6 : Abondance relative par unité d'effort pour les principales espèces de cétacés rencontrées (a) : abondance relative exprimée en nombre d'observations par km

	Région				
	Caraïbe	Atlantique inshore	Atlantique offshore	Iles du nord	Total
<i>Megaptera novaeangliae</i>	0,00038	0,00158	0,00038	0,00423	0,00106
<i>Physeter macrocephalus</i>	0,00153	0,00119	-	0,00141	0,00094
Petits delphinidés (1)	0,00230	0,00198	0,00114	-	0,00165
Grands delphinidés (2)	0,00077	0,00040	0,00227	-	0,00106
Ziphiidés	0,00077	0,00079	0,00038	0,00141	0,00071

(b) : abondance relative exprimée en nombre d'individus par km

	Région				
	Caraïbe	Atlantique inshore	Atlantique offshore	Iles du nord	Total
<i>Megaptera novaeangliae</i>	0,00077	0,00237	0,00038	0,00423	0,00141
<i>Physeter macrocephalus</i>	0,00307	0,00198	-	0,00141	0,00165
Petits delphinidés (1)	0,02990	0,05303	0,02500	-	0,03276
Grands delphinidés (2)	0,01150	0,00396	0,01098	-	0,00813
Ziphiidés	0,00153	0,00158	0,00038	0,00282	0,00130

(1) *Stenella spp.*, *Tursiops truncatus*, *Lagenodelphis hosei*

(2) *Globicephala macrorhynchus*, *Pseudorca crassidens*, *Orcinus orca*

Les premières cartes de distribution montrent que les cétacés sembleraient plus fréquents sur les zones de plateau insulaire et le talus aussi bien côté Caraïbe que côté Atlantique (figure 8 et 9). Cependant le nombre d'observation est faible pour pouvoir commenter ces résultats, ceci reste donc à confirmer par l'analyse spatiale (cf. 3.2. modélisation spatiale des observations).

Figure 8 : cartes des observations de cétacés (a : les espèces observées ; b : taille des groupes observés)

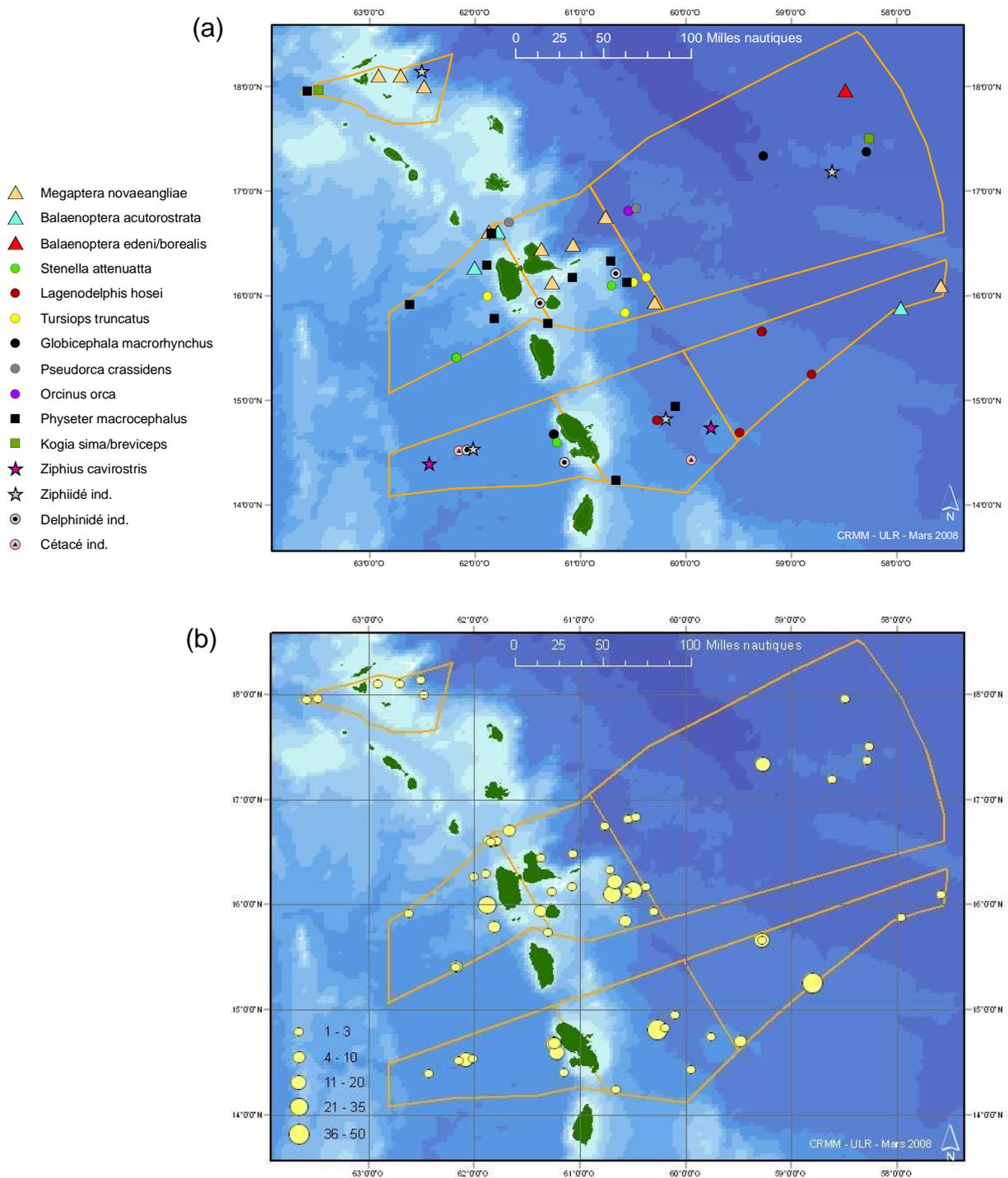
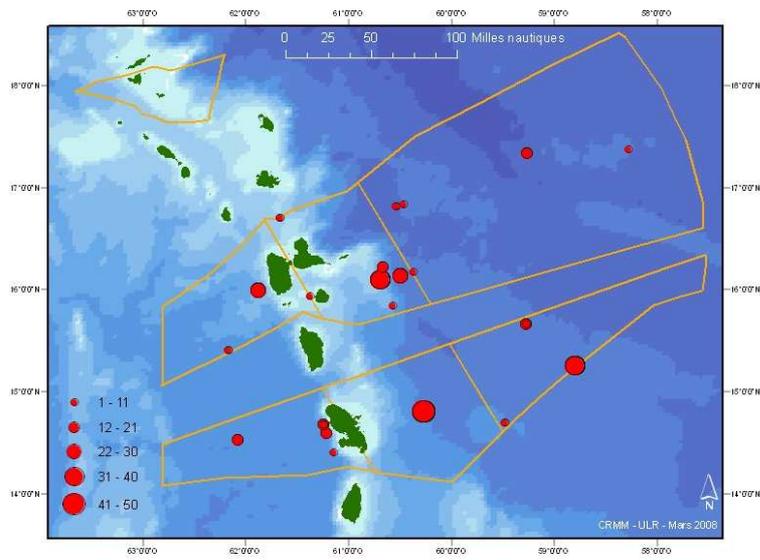
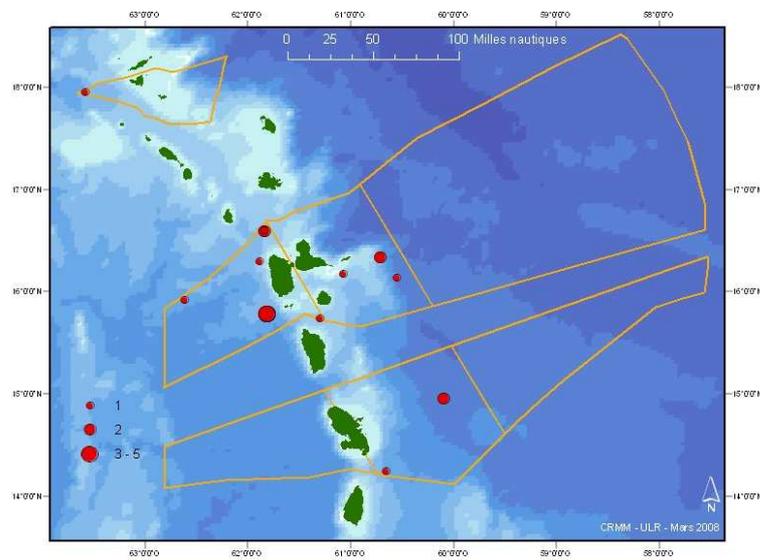


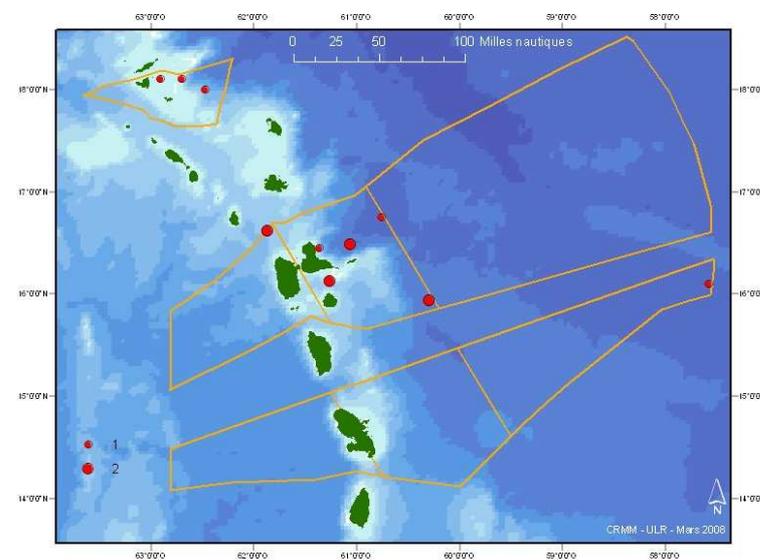
Figure 9 : cartes de la distribution des observations de cétacés les plus rencontrés (a, b, c),



(a) distribution des observations de delphinidés



(c) distribution des observations de cachalots



(b) distribution des observations de baleine à bosse

Observations d'oiseaux de mer :

Le nombre d'observations d'oiseaux réalisé sur les transects s'élève à 407 et concerne 15 taxons (tableau 7 et 8, figure 10). Les taxons ou espèces les plus fréquentes sont les frégate superbe, fous bruns, pailles-en-queue, sternes brunes, sternes grises, sterne royale, noddii brun, petits puffins. Pour les autres espèces observées les effectifs recensés restent faibles.

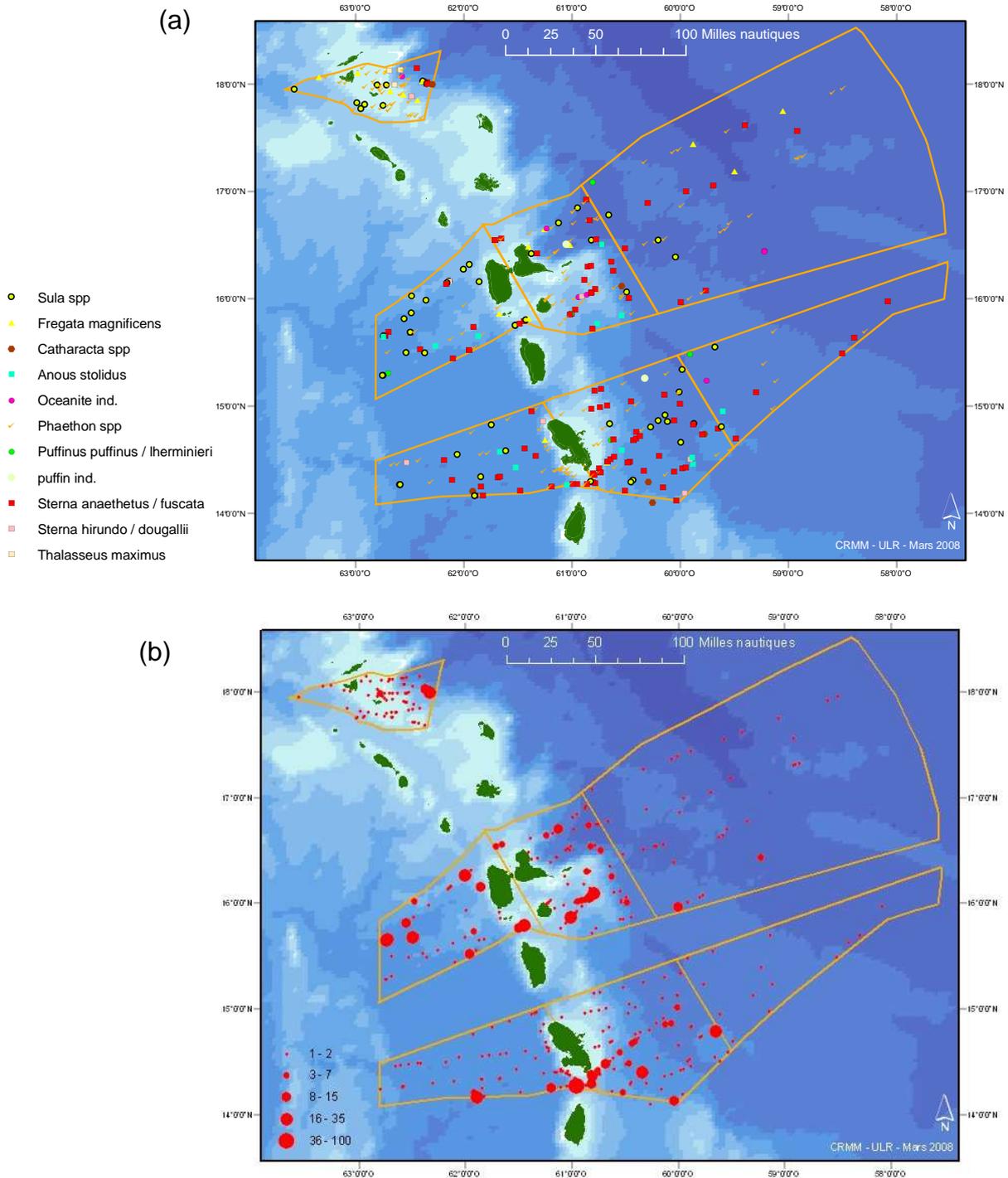
Tableau 7 : total des observations d'oiseaux (espèce et taille des groupes observés)

Espèce	Nombre d'observations	Taille des groupes	
		Min_Max	Moyenne
<i>Sula spp.</i>	57	1_20	2,4
<i>Fregata magnificens</i>	19	1_2	1,3
<i>Catharacta spp.</i>	6	-	1,0
Océanite ind.	8	1_5	3,4
<i>Phaethon spp.</i>	171	1_2	1,1
<i>Puffinus puffinus / lherminieri</i>	4	1_10	3,3
Puffin ind.	4	-	1,0
<i>Anous stolidus</i>	13	1_5	1,3
<i>Sterna fuscata / anaethetus</i>	110	1_100	6,0
<i>Sterna dougallii / hirundo</i>	6	1_6	2,2
<i>Thalasseus maximus</i>	4	1_2	1,3
Autres espèces	5	-	1,0
Total	407	-	2,7

Tableau 8 : total des observations d'oiseaux réalisées dans chacun des blocks (à gauche) et dans chacune des régions (à droite)

Espèce	Block							Région			
	A	B	C	D	E	F	G	Caraïbe	Atlantique inshore	Atlantique offshore	Iles du nord
<i>Sula spp.</i>	9	12	1	18	5	3	9	27	17	4	9
<i>Fregata magnificens</i>	1	1		3	3	3	8	4	4	3	8
<i>Catharacta spp.</i>	2	2			1		1	2	3		1
Océanite ind.	1		1		3	2	1	1	3	3	1
<i>Phaethon spp.</i>	32	19	5	9	42	19	45	41	61	24	45
<i>Puffinus puffinus / lherminieri</i>		1	1	1	2	1		1	3	2	
Puffin ind.		1			1				2		
<i>Anous stolidus</i>	3	3	1	3	3			6	6	1	
<i>Sterna fuscata / anaethetus</i>	18	38	5	14	22	8	5	32	60	13	5
<i>Sterna dougallii / hirundo</i>	2	2			1		1	2	3		1
<i>Thalasseus maximus</i>				1			3	1			3
Autres espèces	2		1	1			1	3		1	1
sous total	70	79	15	50	83	36	74	120	162	51	74
Total				407						407	

Figure 10 : cartes des observations d'oiseaux de mer (a : les espèces observées ; b : taille des groupes observés)



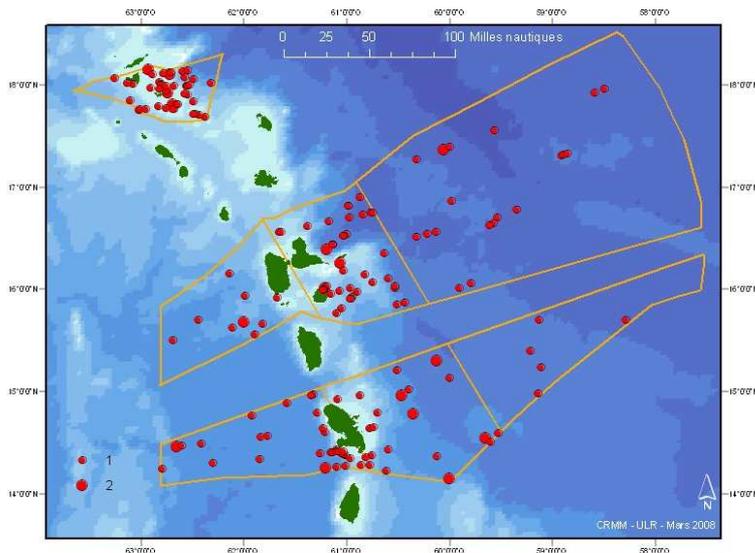


Figure 11 : distribution des observations pailles-en-queue

Le paille-en-queue est apparue une espèce commune aux Antilles avec près de 200 individus observés. On l'a retrouvé partout dans la ZEE avec de fortes densités en zone côtière, mais il fut également observé au large, allant même parfois jusqu'à 200 milles nautiques du côté atlantique (figure 11). La plupart des individus furent observés seuls ou par paires et n'étaient pas accompagnés d'autres espèces. Il est très difficile d'être très précis en matière d'espèce et d'habitat type puisque deux espèces de paille-en-queue difficilement différenciables depuis l'avion sont présentes dans la zone. Selon les écrits, (Levesque *et al.* 2007) le paille-en-queue à bec rouge est très courant et nicheur sur la côte guadeloupéenne alors que le paille-en-queue à bec jaune est éventuellement reproducteur mais nettement moins fréquent.

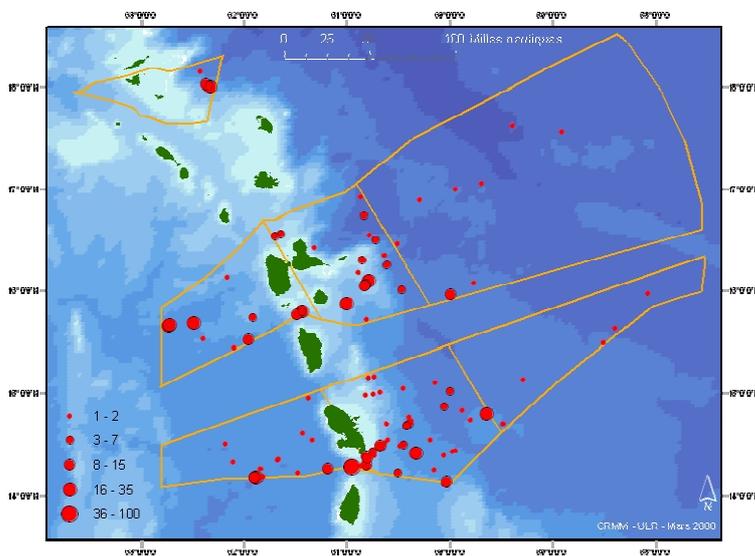


Figure 12 : distribution des observations de sternes « brunes » (bridées ou fuligineuses)

Les sternes « brunes » furent de loin les oiseaux les plus nombreux dans les eaux antillaises en cette saison avec 658 individus observés. Cependant le nombre d'observation n'est que de 110, ce qui s'explique par une grande variation de la taille des groupes, avec des concentrations allant jusqu'à 100 individus. Les groupes les plus conséquents sont surtout localisés au sud de la Martinique (figure 12), c'est à dire proche de leurs lieux de nidification (cf. annexe 1).

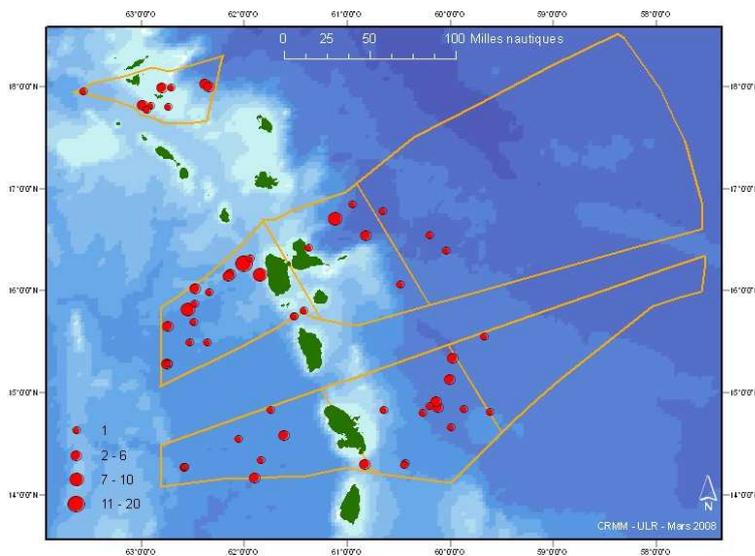


Figure 13 : distribution des observations de fous « bruns »

Les fous « bruns » seraient a priori beaucoup plus présents sur la zone. On comptabilise 57 observations pour un total de 134 individus. La taille moyenne des groupes est de 2,4 avec certaines observations concernant une vingtaine d'individus regroupés. La distribution des fous bruns est surtout axée sur le plateau et sur le pourtour des îles dans un rayon de 80 milles nautiques (figure 13).

Autres observations :

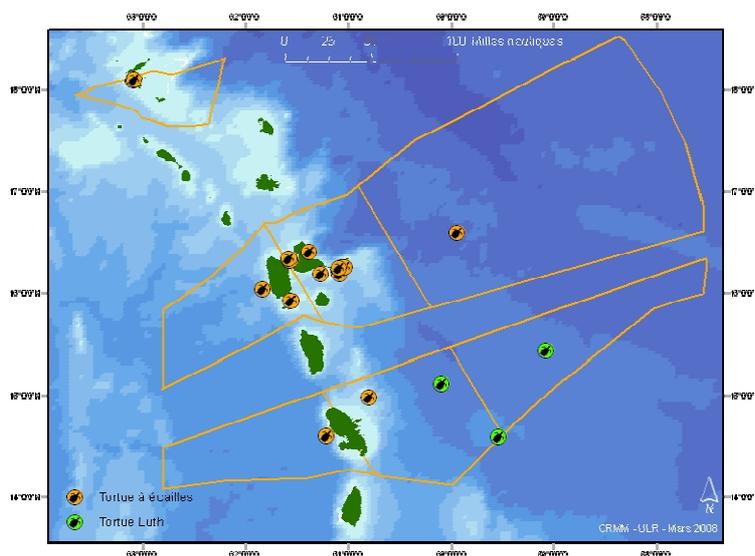
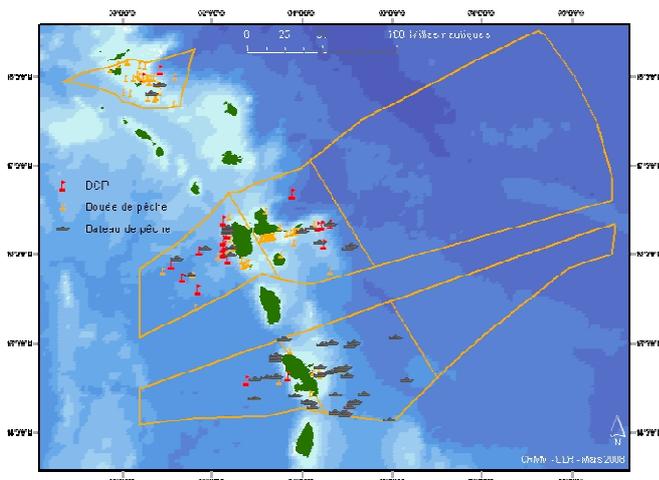


Figure 14 : distribution des observations de tortues marines

Les observations de tortues marines (n=21) montrent une distribution centrée sur les plateaux insulaires et souvent non loin des côtes pour les tortues à écailles alors que pour la tortue Luth la distribution semble plus océanique (figure 14).

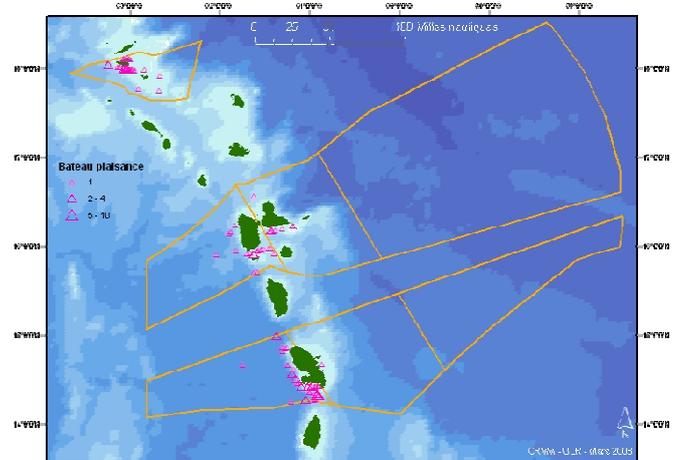
Concernant les activités humaines, 175 positions de navires ont été relevées dont 60 de bateaux de pêche artisanale (saintoises, yoles). Cette activité de pêche est présente autour de chacune des îles, en mer Caraïbe comme en Atlantique, et l'étendue spatiale de cette activité semble comprise dans un rayon de 50 à 60 milles nautiques autour des îles. L'activité de plaisance semble s'exercer principalement à proximité des îles dans un rayon de 10 milles nautiques environ avec des zones plus denses comme St Martin, le sud de la Guadeloupe et le sud et l'ouest de la Martinique.

Figure 15 : cartes de la distribution des activités humaines (a, b et c)

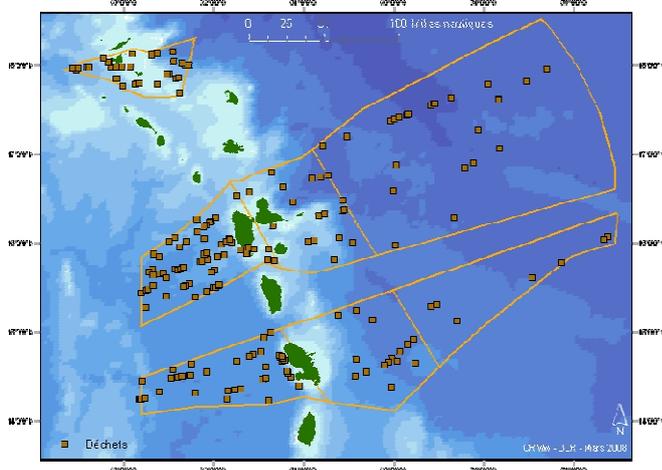


(a) Bateaux et engins de pêche

(b) bateaux de plaisance



(c) macros déchets



3.2. Modélisation spatiale des Observations.

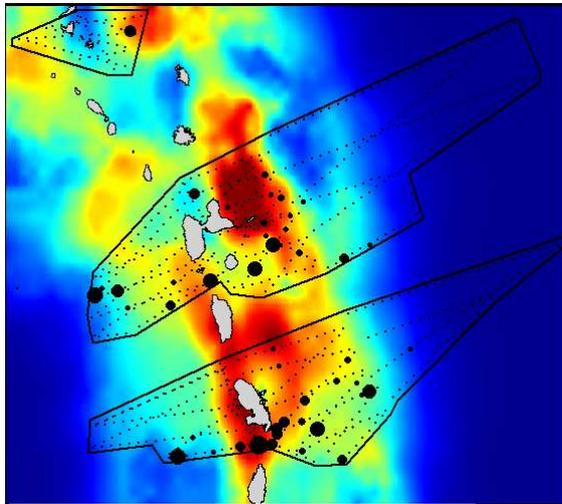
Modélisation de la distribution des animaux :

Les modèles terminaux sont résumés dans le tableau 9, et les prédictions associées en figure 16 pour les 4 taxons. On notera l'importance de la concentration de la chlorophylle de surface et de la topographie dans la définition des habitats prioritaires pour chacun des taxons. Les modèles de densité d'oiseaux et de mammifères marins montrent des performances relativement équivalentes, de 16.4% (Pailles-en-queue) de déviance expliquée jusqu'à 29.2% (Sternes brunes). Les prédictions associées à ces modèles soulignent chacune des habitats différents : les habitats des sternes brunes se distribuent de part et d'autres de l'arc antillais, légèrement au large des îles, avec semble-t-il un préférendum marqué à l'Est de la Guadeloupe. A l'inverse, les habitats des fous bruns sont plutôt situés à l'ouest de l'arc antillais, notamment de la Guadeloupe. Néanmoins, quelques habitats pour les fous bruns sont définis à l'est, comme par exemple au large de la Martinique. Les pailles-en-queue semblent plus inféodés aux zones insulaires, même si deux zones plus au large, de part et d'autre de la Guadeloupe, apparaissent également privilégiées, peut-être en tant que zone de nourrissage en mer. En outre, les pailles-en-queue sont en période de nidification durant la saison d'échantillonnage (Collier *et al.* 2002), ce qui peut expliquer le préférendum côtier observé. Leur distribution hors période d'échantillonnage est probablement différente, avec des zones d'alimentation en mer plus marquées. Enfin, les habitats importants pour les cétacés sont notamment situés le long du talus continental atlantique, avec des zones importantes situées plus au large à l'Est de la Martinique.

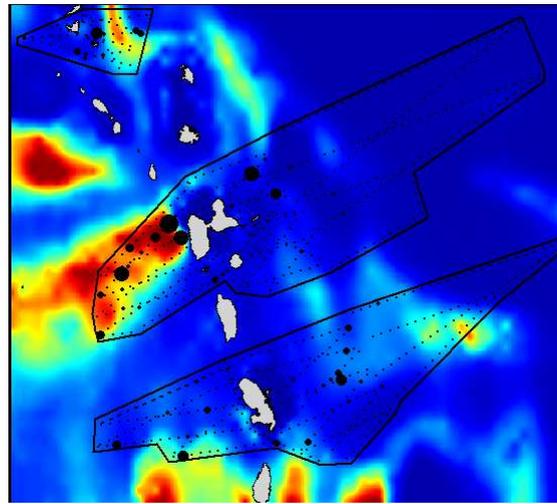
Tableau 9 : Descriptions des modèles spatiaux utilisés pour prédire les densités d'animaux ou d'activité anthropique sur l'arc antillais. Le pourcentage de déviance expliqué donne une indication sur le pouvoir explicatif des modèles.

Taxon	Covariable n°1	Covariable n°2	Covariable n°3	Covariable n°4	% dev. expliquée
sternes brunes	DISTCOAST	CHLA	TOPO	SSH	17.5%
fous bruns	CHLA	SST	SSH	TOPO	24.4%
pailles-en-queue	DISTCOAST	SSH	SSTg	TOPOg	16.4%
cétacés	TOPOg	CHLAg	TOPO	DISTFRONT	24%
déchets	LAT	LON	TOPO		12.3%
bouées	TOPO	SSHg	SSH		64.8%
Bateaux de pêche	DISTCOAST	TOPO	DISTFRON		23.7%
Bateaux de plaisance	DISTCOAST	LON			53.5%

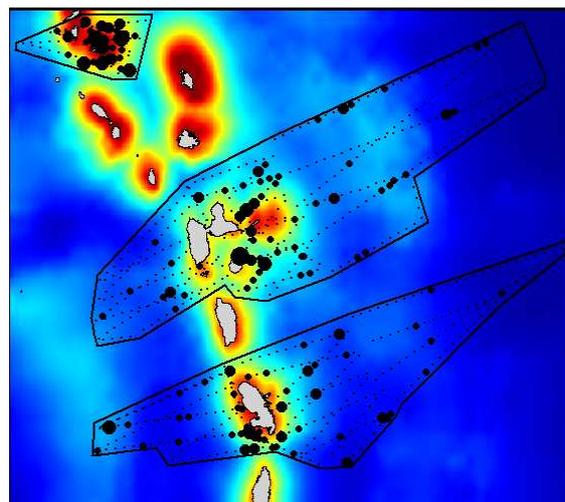
Figure 16 : Prédiction issues des modèles spatiaux pour les densités de prédateurs supérieurs au sein de l'arc antillais. L'échelle de couleur se répartit depuis le bleu (densités faibles) au rouge (densités très fortes). (a, b, c) oiseaux marins ; (d) cétacés



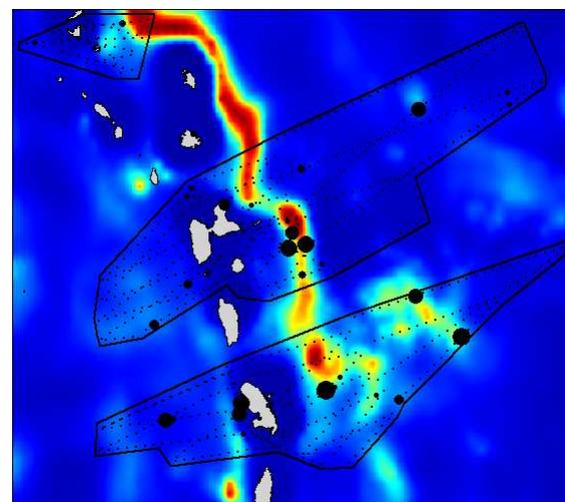
a) Sternes brunes



b) Fous bruns



c) Pailles-en-queue

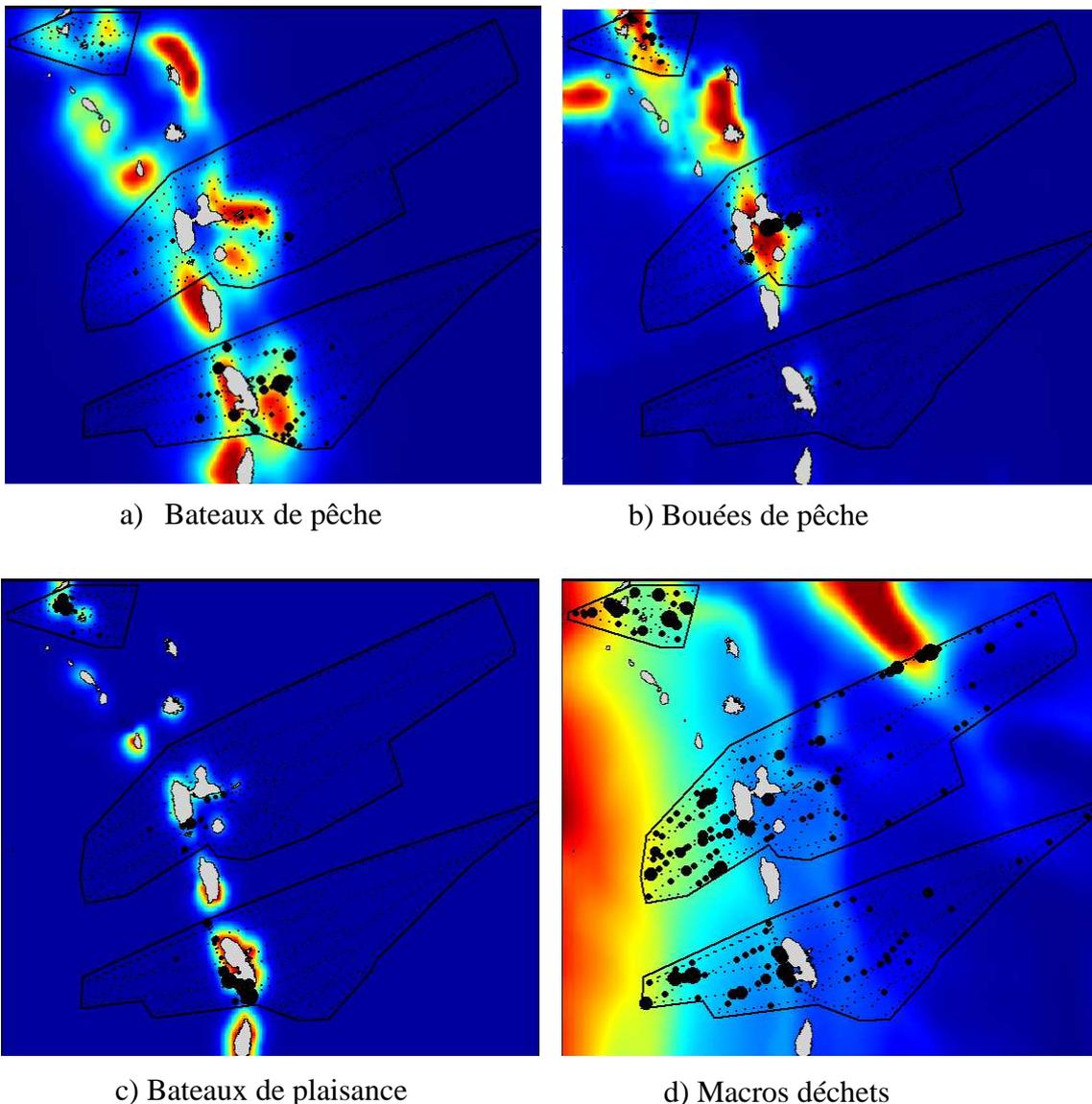


d) cétacés

Modélisation des activités anthropiques :

Les prédictions pour les distributions des bouées de pêche, des bateaux de pêche, des déchets flottants et des voiliers sont montrées en figure 17. Les prédictions résultantes montrent que l'ensemble des activités humaines (pêche et plaisance) se concentre autour des îles, tandis que les déchets sont plus abondants à l'ouest de l'arc antillais, et peut être également en zone profonde, comme le montre la zone située au nord-est de la carte. Les prédictions des positions de bouées de pêche révèlent l'utilisation extensive des eaux côtières notamment de la Guadeloupe et des îles Saint Martin et Saint Barthelemy. La répartition de ces dernières coïncide que partiellement avec les engins de fonds tels les DCP (dispositifs de concentrations de poissons), casiers et filets maillants qui peuvent être situés jusqu'au au-delà du plateau insulaire (Guillou & Lagin. 1997).

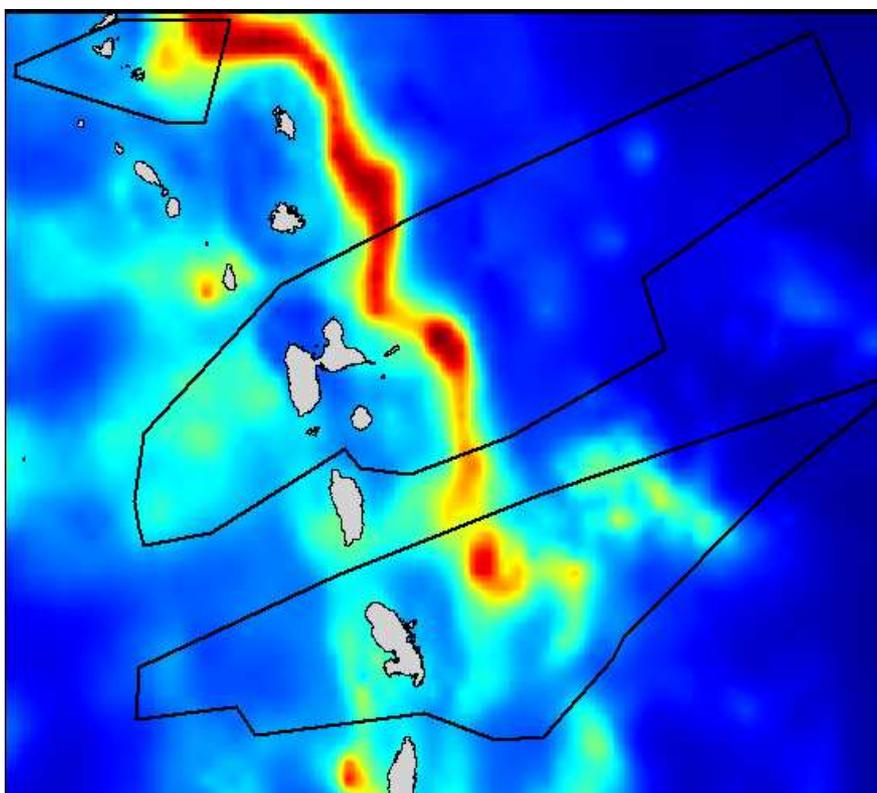
Figure 17 : Prédiction issues des modèles spatiaux pour les activités anthropiques au sein de l'arc antillais. L'échelle de couleur se répartit depuis le bleu (peu d'activités/impacts) au rouge (activité/impact intense).



Identification des habitats prioritaires :

La répartition d'un indice d'habitat prioritaire (fig. 18), calculé selon la formule donnée en section méthode, synthétise les informations présentées dans les cartes propres à chaque taxon ou espèce (fig. 16). Cette figure illustre plusieurs habitats importants : l'ensemble du talus continental à l'est de l'arc antillais ; également des zones importantes plus au large à l'est de la Martinique ; à l'Ouest de la Guadeloupe et à l'Est de Saint Martin et Saint Barthelemy. Nous rappelons que cet indice a été calculé avec un certain nombre d'hypothèses, qui peuvent-être redéfinies et/ou affinées en fonction des priorités des gestionnaires ou des efforts d'investigations futurs qui pourront être menés.

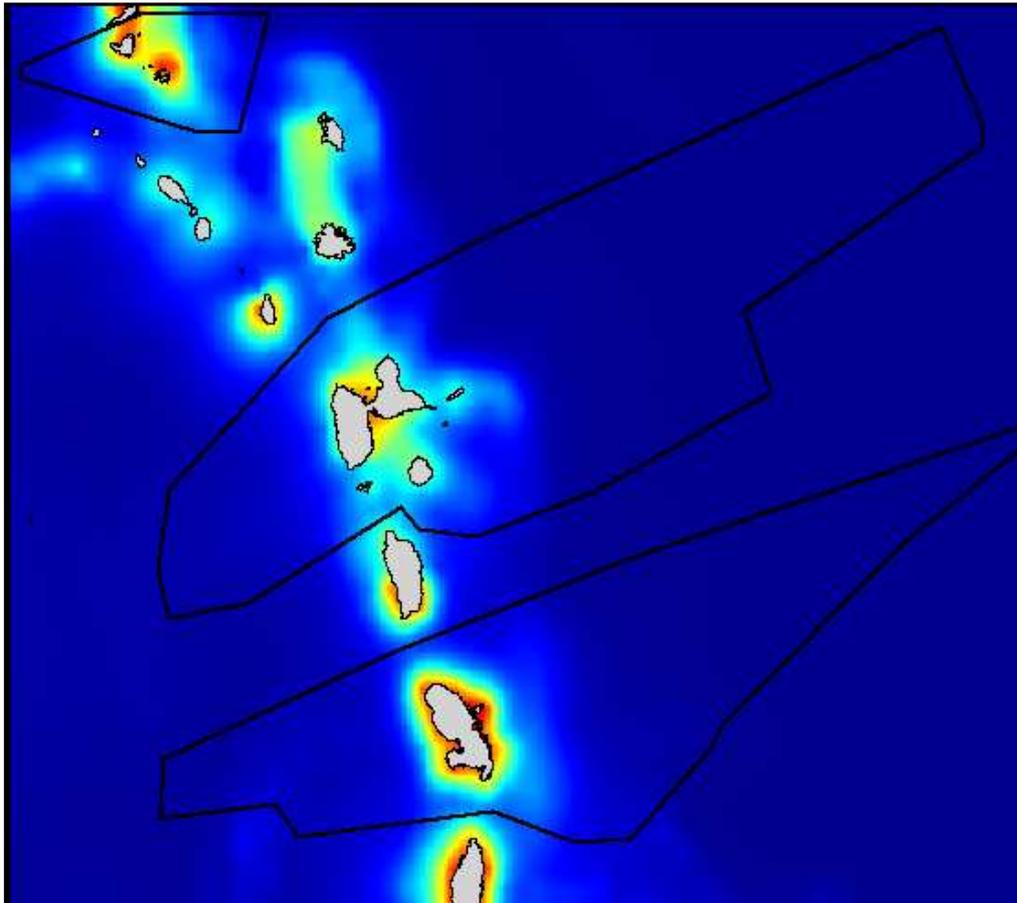
Figure 18 : Indice d'habitat prioritaire. L'échelle de couleur se répartit depuis le bleu foncé (zones à faible intérêt) au rouge (intérêt fort)



Identification des zones d'activité humaine

L'indice de l'intensité de l'activité humaine (fig. 19), qui intègre les prédictions obtenues pour les bateaux de pêche, les bouées de pêche et la plaisance, montre bien que les zones côtières sont largement utilisées par ces deux catégories d'activités, avec une petite extension au large de la Guadeloupe à l'Ouest, jusqu'au talus continental.

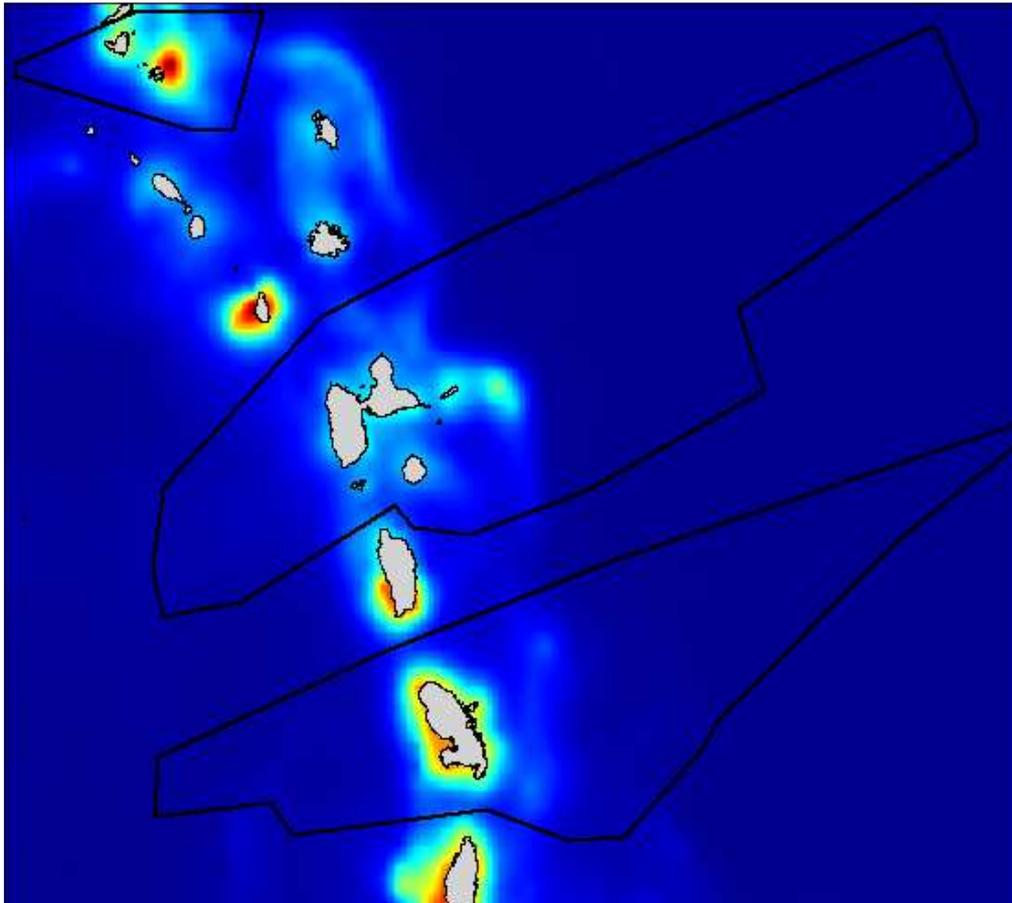
Figure 19 : Indice d'activité Anthropique. L'échelle de couleur se répartit depuis le bleu foncé (zones à faible intérêt) au rouge (intérêt fort)



Identification des zones de conflits potentiels

La combinaison des cartes d'indice d'habitat et d'indice d'activité humaine permet d'identifier les secteurs pour lesquels la mise en place de mesure de gestion pourrait engendrer des interactions avec les activités locales (fig. 20). Ces interactions pourraient être importantes entre les îles de Saint Martin et de Saint Barthelemy ; sur la zone de talus située à l'ouest de la Guadeloupe et autour de la Martinique.

Figure 20 : Indice de conflit potentiel. L'échelle de couleur se répartit depuis le bleu foncé (zones à faible intérêt) au rouge (intérêt fort)



Limites et interprétation des modèles :

Les représentations cartographiques issues des modèles additifs généralisés présentées dans ce rapport dépendent du choix des co-variables explicatives. Ainsi, le changement d'une co-variable peut aboutir à des cartographies différentes. Ici, nous avons utilisé une procédure théorique et objective pour choisir les co-variables explicatives de la distribution de chaque espèce («procédure dite de « *forward selection* » basée sur la minimisation du GCV, cf. section « méthode »). Cette procédure ne retient que les « meilleures » co-variables parmi celles dont nous disposons, c'est-à-dire celles reliées le plus fortement et le plus directement aux valeurs de densité d'animaux.

Cependant, il est possible que sur le terrain, les oiseaux ou les mammifères marins répondent à d'autres facteurs environnementaux pour lesquels nous ne disposons pas d'information numérique. L'inclusion de ces facteurs permettrait sans doute d'améliorer la performance de nos modèles. L'information issue de nos cartographies doit donc être utilisée avec précaution. Les structures spatiales révélées à large échelle (par exemple la mise en évidence du talus continental dans la carte de l'indice d'habitat prioritaire) peuvent être considérées comme plus robustes que les structures à fine échelle, qui ont beaucoup plus de chance d'être des structures « artéfactuelles », c'est-à-dire issue d'une configuration particulière des co-variables plutôt que d'une réalité de terrain. Egalement, les prédictions issues des modèles sont moins robustes en dehors de la zone d'étude et encore moins en bordure de carte. Par exemple les zones d'abondance de déchets flottants à l'Est (fig. 17d) sont très probablement surévaluées. Enfin, les écarts entre zones d'abondances moyenne (en bleu clair/jaune) et zones d'abondances fortes (rouge) sont à relativiser. Ces écarts de valeurs numériques peuvent en effet n'être que le fruit d'artéfacts d'analyse, et peuvent être modulés par l'introduction d'une nouvelle co-variable dans le modèle. Nous sommes en revanche plus confiants dans la robustesse de la prédiction des zones d'absence (bleu foncé). Ainsi, pour la définition de zones prioritaires (fig. 18), nous accorderions une importance égale à la zone du talus continental (à l'Ouest) ainsi qu'aux structures révélées à l'Est et au Nord-Est de la Guadeloupe.

3.3. Estimations d'abondance

Les estimations d'abondances des oiseaux et mammifères marins dans la ZEE française des Antilles sont présentées en tableau 10, ainsi que les moments statistiques (« mu » et « size ») résultant de l'ajustement d'une loi binomiale négative aux distributions des tailles de groupe par maximum de vraisemblance. Nos estimations d'abondances minimales font état de 15 400 oiseaux et 5300 mammifères marins. Ces chiffres doivent être compris comme une sous-estimation de la réalité, étant donné qu'ils ont été calculés sous l'hypothèse d'une probabilité de détection égale à 1. Un classement des niveaux de sous-estimation est proposé taxon par taxon dans le tableau 10 selon l'idée que les estimations portant sur les espèces plongeant longtemps sont probablement les plus sous-estimées. Cependant, ces chiffres sont réalistes en regard des estimations obtenues aux colonies (15 000 à 30 000 Sternes brunes entre les colonies de la tête à l'Anglais et de Sainte Anne, cf. annexe 1)

Tableau 10 : Estimations d'abondances par *strip-transect* pour les oiseaux marins, mammifères marins et activités anthropiques dans les eaux sous juridiction Française de l'arc antillais. La colonne « sous-estimation » correspond à un classement subjectif du taux de sous-estimation de l'estimation d'abondance.

Taxon	Abondance	Icinf	Icsup	Densité d'observation	mu	Size	sous estimation
Sternes brunes	9200	5500	14000	0.0129	5.0273	0.2799	*
Fous bruns	1950	1200	2900	0.0067	1.3505	0.2263	*
Pailles-en-queue	2700	2200	3250	0.0201	0.09	5	*
Frégate	350	200	550	0.0022	0.2636	5	*
oiseaux totaux	15400	11300	20200	0.04	1.7025	0.1222	*
Cachalots	170	50	400	<0.001	0.4375	0.3404	***
Baleines à bosse	160	50	300	0.0011	0.4172	5	***
petits delphinidés	3600	1400	6300	<0.001	5	0.3202	**
grands delphinidés	1000	130	2000	<0.001	X	X	
mammifères totaux	5300	2600	8200	0.043	4.7568	0.2106	**
bateaux de pêche	950	600	1250	0.0076	0.1804	0.1631	*
bouées de pêche	2700	1600	4100	0.022	0.8086	0.3116	*
macro-déchets	3400	2800	3950	0.028	0.013	5	*

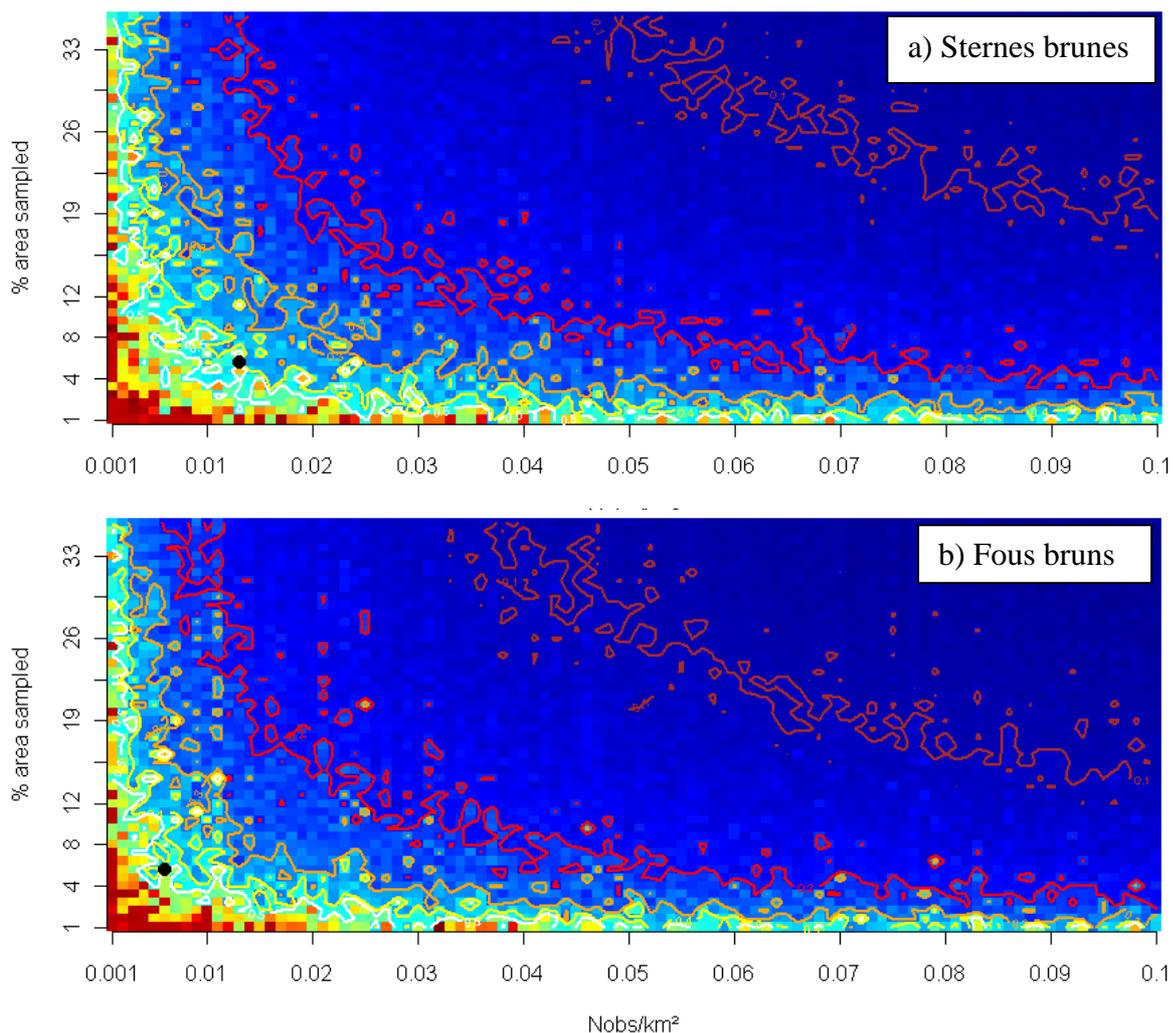
3.4. Analyses de sensibilité

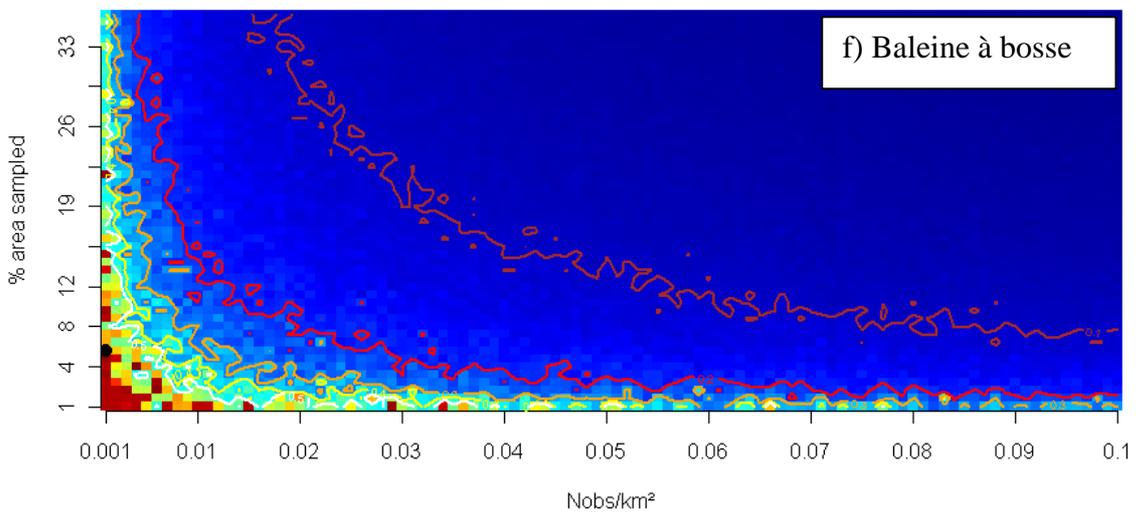
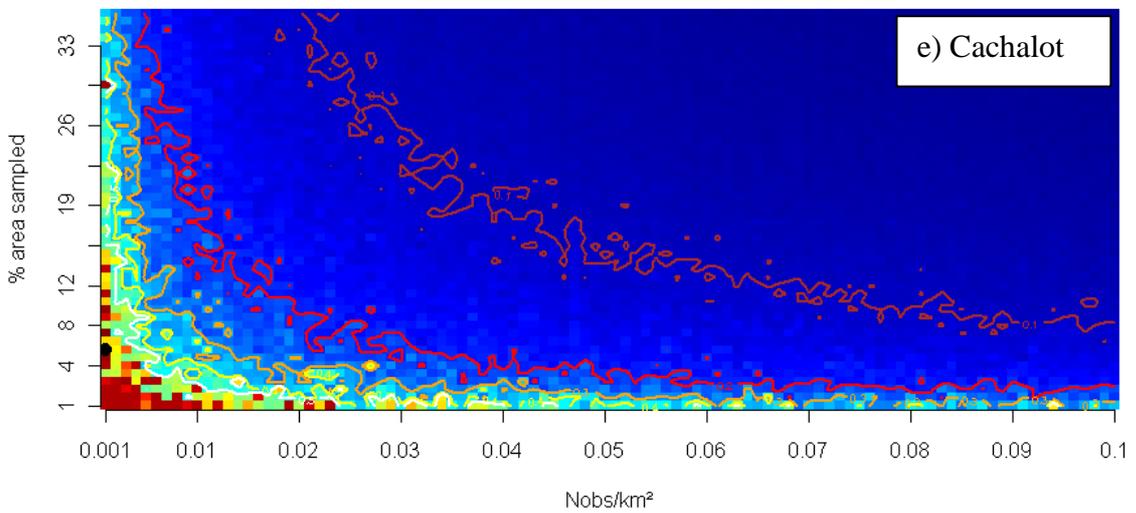
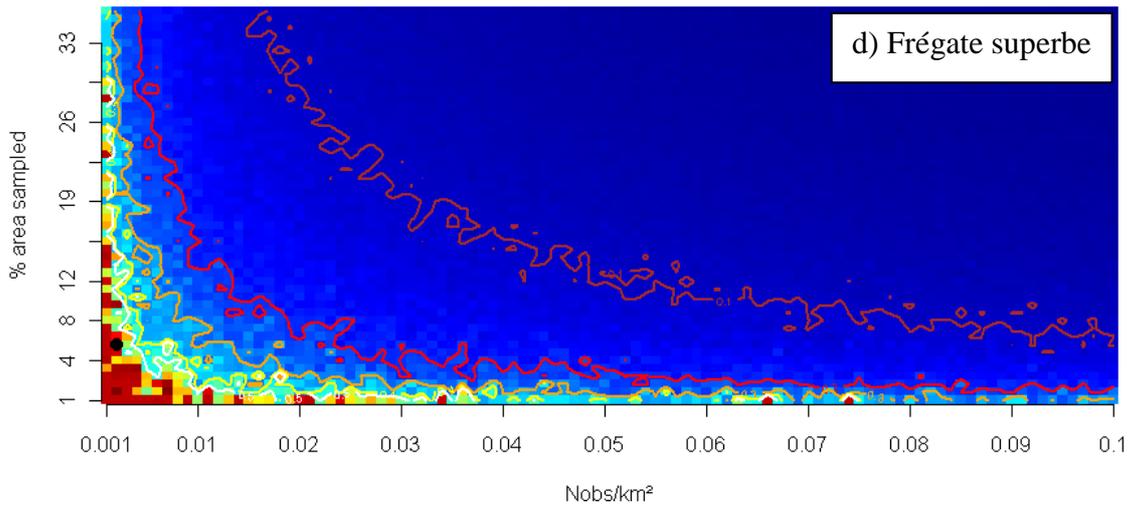
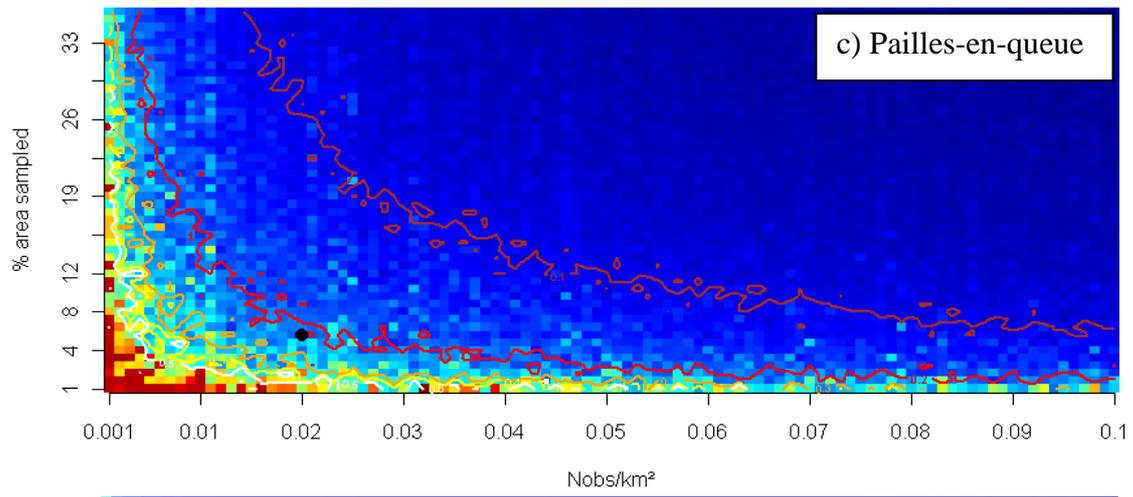
Les résultats concernant nos analyses de sensibilité pour les estimations d'abondances sont présentées en fig. 21. On peut y situer la performance de l'échantillonnage en terme de coefficient de variation de l'estimateur d'abondance au sein d'un espace des possibles défini par trois critères : l'intensité de l'effort, la densité des observations et la distribution statistique des tailles de groupe des objets observés. Ces analyses permettent de constituer trois groupes d'objets : ceux pour lesquels les estimations d'abondances sont performantes (CV < 0.3; Pailles-en-queue, bouées de pêche et déchets), ceux pour lesquels la précision des estimations d'abondance est moyenne mais pourrait être améliorée par une augmentation raisonnable de l'effort d'échantillonnage (CV aux alentours de 0.4 ; sternes brunes, fous bruns et bateaux de pêche), et ceux pour lesquels l'augmentation de l'effort requis pour une amélioration significative de la précision de l'estimation d'abondance semble au-delà du raisonnable (CV > 0.5 ; frégates, cachalots, baleines à bosse, petits delphinidés).

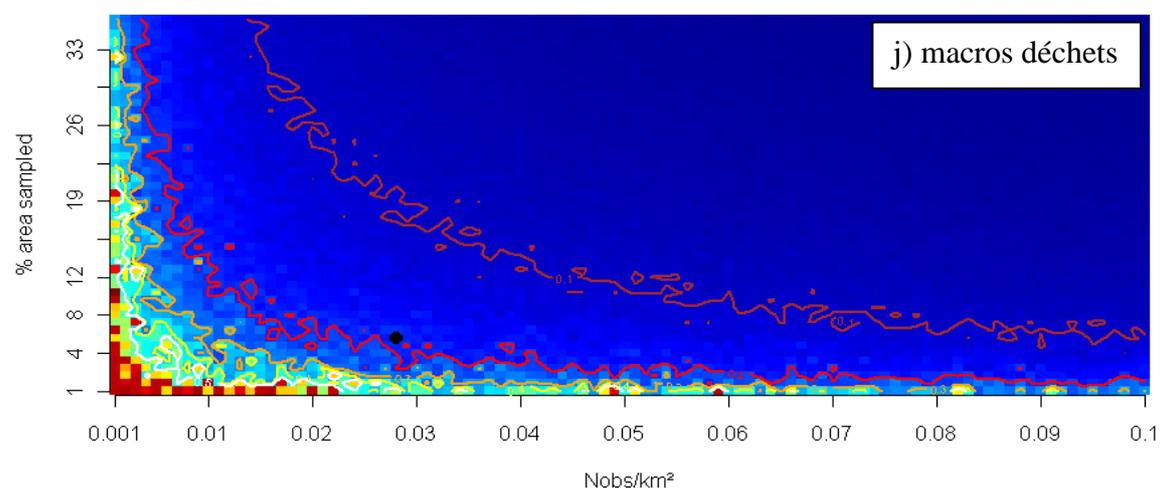
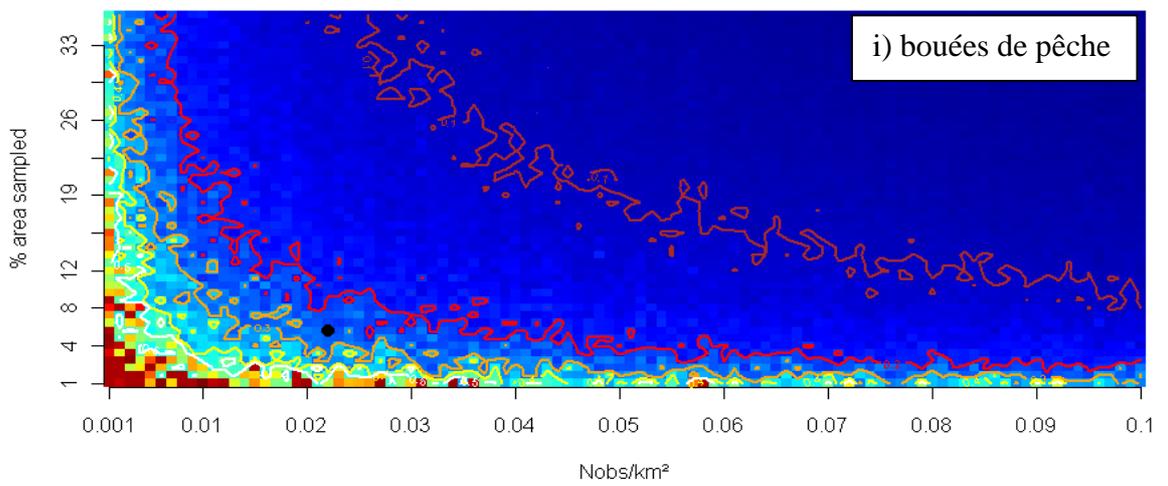
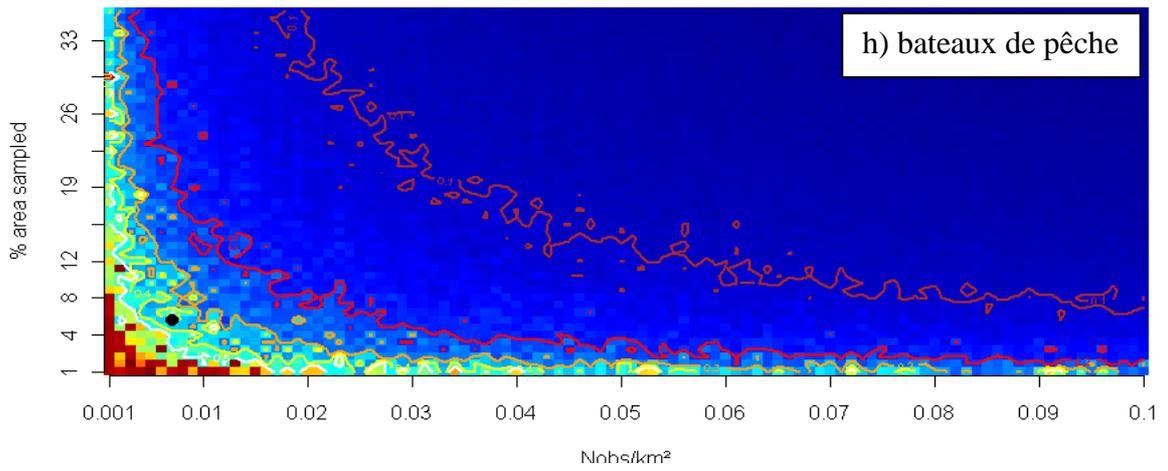
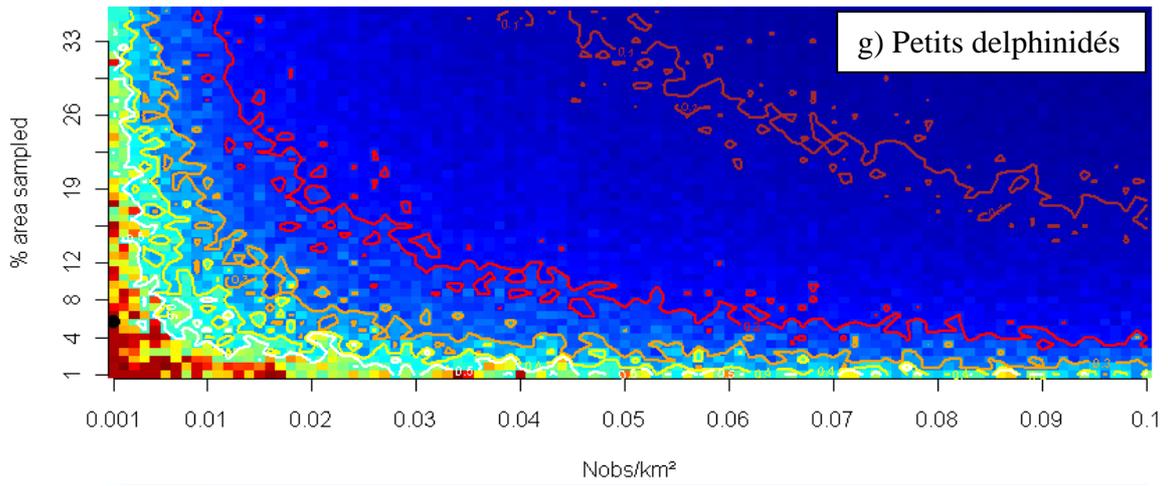
Il est à noter tout de même que de telles valeurs de coefficients de variation pour les mammifères marins sont en accord avec celles trouvées pour ces taxons dans d'autres grands recensements (SCANS, SCANS-II, CODA par exemple).

Il apparait donc clairement que les taxons les plus faciles à suivre au cours du temps, et pour lesquels des tendances seraient le plus rapidement détectées dans le cadre de campagne répétées, sont les pailles-en-queue et, sous réserve d'une augmentation de l'intensité de l'échantillonnage, les sternes brunes. Cette augmentation de l'effort (en proportion de la zone d'étude couverte) peut néanmoins être contrebalancée par une définition plus fine des zones à prospecter, sur la base des zones d'habitat identifiées par les analyses spatiales (fig. 18). Par exemple, un échantillonnage limité aux strates B et E (fig. 3) serait tout à fait adapté au suivi temporel de ces populations d'oiseaux, la réduction de la taille de la zone échantillonnée permettant d'être plus précis dans l'estimation des abondances d'oiseaux dans ces zones. Une telle stratégie faisant l'hypothèse que les populations sont toujours concentrées dans les zones que l'on échantillonne, des survols permettant de mesurer la variabilité temporelle (saisonnière) de la distribution spatiale des animaux seraient néanmoins également requis.

Figure 21 : Résultat des analyses de sensibilité. Chaque graphe montre la valeur de coefficient de variation (CV) d'un estimateur d'abondance que l'on peut attendre pour une densité (abscisse) et un effort d'échantillonnage (ordonnée) donné. Les isolignes délimitent les valeurs de CV de 0.1 (marron), 0.2 (rouge), 0.3 (orange), 0.4 (jaune), et 0.5 (blanc). Le point noir sur chaque graphe correspond à la situation de l'échantillonnage réalisé dans l'Arc Antillais. Chaque graphe est spécifique des propriétés statistique de la distribution des taille de groupe de chaque espèce/objet recensé. (a, b, c, d) oiseaux marins ; (e, f, g) mammifères marins ; (h, i, j) activité humaine.







IV. Synthèse et recommandations

Ce programme d'évaluation des populations de prédateurs supérieurs au sein de l'arc antillais a permis de fournir :

- (i) un inventaire des espèces (ou taxons) d'oiseaux et de mammifères marins observables au large de l'arc antillais (Figures 8 à 13 ; Tableaux 4 à 8) ;
- (ii) une identification des habitats les plus importants pour les prédateurs supérieurs, dont on fait l'hypothèse qu'ils soulignent des zones de productivité biologique importante pour le milieu marin (Figures 16 et 18 ; Tableaux 3 et 9)
- (iii) une identification des secteurs les plus utilisés pour l'activité de pêche, et pour lesquels des conflits pourraient apparaître dans le cadre d'une politique de sanctuarisation de certains espaces marins (Figures 17, 19 et 20);
- (iv) des estimations minimales d'abondance pour les espèces et taxons les plus observées (Tableau 10) ;
- (v) une analyse de sensibilité permettant d'identifier les taxons et espèces pour lesquels des tendances ont le plus de chances d'être détectées, et donnant une idée de l'augmentation d'effort nécessaire à l'obtention d'estimations d'abondance robuste taxon par taxon (Figures 21a à 21j).

Recommandation de mise en œuvre des campagnes aériennes d'observation

Les principales difficultés rencontrées ayant eu un impact sur la réalisation de ces objectifs sont les densités relativement faibles de mammifères marins, combinées à une météorologie peu favorable à l'observation, à cause de la saison des alizés anormalement venteuse et ponctuée de rares d'accalmies.

Il apparaît ainsi que l'effort d'observation déployé aurait dû être plus important ; compte-tenu de coûts fixes non négligeables, l'augmentation de l'effort d'observation n'aurait pas été associée à une augmentation proportionnelle des coûts totaux du projet. Concernant, la dégradation des conditions de détection des animaux en mer liée au vent soutenu, la souplesse de mise en œuvre des moyens aériens a permis de limiter cette contrainte. Toutefois, c'est certainement une source notable de biais négatif dans l'estimation des abondances, en particulier à mesure que les observations s'écartent de la route de l'avion dans la bande des 500m. L'existence de données antérieures sur les densités attendues aurait été une aide précieuse pour le dimensionnement optimum de l'effort d'observation. Des analyses de sensibilité conjointes entre les données des Caraïbes (cette étude) et les données de Guyane (étude à venir) permettront d'étudier deux situations bien distinctes en matière de densité de prédateurs supérieurs. Ces deux valeurs de densités constituent probablement des bornes inférieures et supérieures encadrant la plupart des situations qui seront rencontrées ultérieurement dans l'ensemble de la ZEE françaises d'outre-mer. Sans nul doute, les résultats obtenus dans un premier temps aux Antilles, et dans un second temps en Guyane, permettront de dimensionner l'effort d'observation de manière optimale.

Par ailleurs, il est fort probable que les prédateurs les plus petits et les plus sombres (sternes brunes, fous bruns...) ne soient pas également détectables sur toute la largeur de la bande d'observation. Pour s'affranchir de cette difficulté, il serait utile de définir deux ou trois sous-bandes qui permettront d'estimer l'importance de ce biais de détection. En effet, des modifications de la probabilité de détection lors de l'échantillonnage aérien des oiseaux marins à déjà été détectée au delà de 150m, même pour les espèces les plus visibles comme les fous de Bassan (Certain & Bretagnolle 2008).

Recommandation concernant les habitats prioritaires dans l'arc antillais

Le talus continental a donc été identifié clairement comme une zone d'habitat prioritaire pour les prédateurs supérieurs, notamment les cétacés. A un degré moindre, les zones ou plateau péri-insulaires sont également fréquentés par les oiseaux. Le croisement de ces habitats prioritaires avec ceux où s'exercent les activités humaines fait apparaître des zones d'interactions potentielles situées à une proximité relative des îles. Les premières conclusions de la modélisation spatiale sont à considérer avec précaution car elles sont sensibles au choix des co-variables utilisées. Bien que la procédure de sélection « en avant » des co-variables permette d'extraire prioritairement les plus importantes, il est possible que d'autres variables que celles testées à ce jour soient également importantes. Une poursuite de ces analyses est donc souhaitable, notamment dans le cadre de l'exploitation conjointe des données Caraïbes et Guyane.

Par ailleurs, cette campagne d'observation ne prend pas en considération les possibles variations temporelles (saisonniers ou interannuelles) des distributions et habitats préférentiels de prédateurs supérieurs dans la région. Il faut la considérer comme un point de départ permettant d'établir une première visualisation de la distribution des oiseaux et mammifères marins dans les Antilles françaises et plus généralement l'arc antillais. Ce point de départ devrait stimuler d'autres initiatives similaires permettant d'étoffer géographiquement et temporellement le jeu de données et comprendre plus finement les relations entre prédateurs supérieurs et habitats. La Dominique a émis le souhait de réaliser un projet similaire dans ses eaux et, lors de la réunion de juin 2008, les délégations des Etats-Unis, des Pays-Bas et du Royaume-Uni à la Commission Baleinière Internationale ont pris connaissance avec intérêt des résultats préliminaires obtenus dans les Antilles françaises. Une dynamique régionale pourrait permettre d'enrichir considérablement le jeu de données et de conforter ou préciser la modélisation d'habitats présentée ici. De la même manière, cette démarche permettrait de mettre en évidence l'évolution de la distribution et de l'intensité de l'activité humaine.

Conclusion

A l'issue de ce programme d'échantillonnage de la biodiversité de l'arc antillais, il apparaît que l'utilisation de l'avion et d'analyses appropriées permet d'extraire rapidement et pour un coût acceptable un nombre conséquent d'informations sur une grande étendue spatiale. Ces informations établissent un niveau de référence et pourront servir de point de comparaison pour comprendre l'évolution de l'état de santé de l'écosystème étudié. Les données récoltées pourront en outre servir de base à une réflexion pour la mise en place de secteurs nécessitant des mesures de protection, ainsi que pour prévoir les éventuels conflits liés à ce type de démarche. Enfin, les informations extraites de ce rapport pourront servir de bases solides à la poursuite de l'effort d'étude et de gestion de l'écosystème pélagique de l'arc des Antilles : La mise en évidence des secteurs où se concentrent les oiseaux et mammifères marins permettra de proposer des plans d'échantillonnages allégés dans le but de constituer des séries temporelles, en se focalisant sur les zones prioritaires.

Des axes de recherche pertinents ont également été identifiés de manière à parfaire les outils de gestion de cet écosystème. Par exemple, des opérations complémentaires sont envisageables pour affiner les estimations d'abondances pour les espèces plongeant profondément (Baleines et Cachalots) : le déploiement de balises permettant d'évaluer le temps passé sous l'eau serait un moyen indirect d'évaluer le nombre d'individus non-observé, et donc de corriger les estimations d'abondances en conséquence. De plus, ce type d'action permettrait de valider de manière indépendante l'identification des zones prioritaires pour ces grands plongeurs. Des campagnes exhaustives additionnelles seraient néanmoins utiles pour évaluer la variabilité temporelle des distributions et des abondances des animaux en mer, et s'assurer que les secteurs prioritaires identifiés au cours de ces campagnes le restent à d'autres moments de l'année. De la même manière, cette démarche permettrait de mettre en évidence l'évolution de la distribution et de l'intensité de l'activité humaine. Enfin, l'indice d'habitat prioritaire présenté dans ce rapport peut servir de base pour le développement d'un indice de biodiversité tenant compte à la fois des populations d'oiseaux marins les plus abondantes, des populations de mammifères marins et des activités humaines. Ici encore, des travaux de recherche supplémentaires (prise en compte de la valeur patrimoniale, du degré d'activité humaine et du statut de conservation des espèces) sont nécessaires à la réalisation de cet objectif.

Ces axes de travaux ultérieurs pourront donner naissance à des publications scientifiques qui contribueront à une reconnaissance internationale des outils et indicateurs développés par l'Etat français et qui permettront une harmonisation des modes de gestion du milieu marin au sein de l'arc antillais.

Références

- Boisseau O, Carlson C. and Seipt I. 2000. A report on cetacean research conducted by the International Fund for Animal Welfare (IFAW) off Guadeloupe, Dominica, Martinique, Grenada and Tobago from 12 January to 30 March 2000. Unpublished report of the IFAW: 20 pp.
- Buckland S.T., Anderson D.R., Burnham K.P., Laake J.L., Borchers D.L. & Thomas L. 2001. Introduction to distance sampling: Estimating abundance of biological populations. Oxford University Press, Oxford.
- Certain G., Bellier E., Planque B. and Bretagnolle V. 2007. Characterising the temporal variability of the spatial distribution of animals: an application to seabirds at sea – *Ecography* 30 (5),695-708.
- Certain G. Ridoux V. Van Canneyt O. and Bretagnolle,V. 2008. Spatial distribution and minimal abundance estimate for the small delphinid community of the Bay of Biscay. *ICES Journal of marine science* 65(4),656-666
- Certain G. and Bretagnolle,V. 2008. Monitoring seabirds populations in marine ecosystems: the use of strip-transect aerial surveys. *Remote Sensing of Environment* 112, 3314-3322.
- Collier N., Brown A.C. Hester M. 2002. Report on searches for seabird breeding colonies in the lesser Antilles. *Environmental Protection in the Caribbean*.
- Guillou A., Lagin A. 1997, *Engins et techniques de pêche de la Martinique*, Rapport IFREMER/DRV/RH.215 pp
- Halpern B.S., Regan H.M., Possingham H.P., McCarthy M.A. 2006. Accounting for uncertainty in marine reserve design. *Ecology Letters*. 9:2-11.
- Hiby, A.R. & Lovell, P. 1998. Using aircraft in tandem formation to estimate abundance of harbour porpoise. *Biometrics* 54: 1280-1289
- IFAW, 1996. Cetacean field research conducted from “Song of the Whale” off Dominica and Grenada : spring 1996, IFAW Caribbean report : 16 pp.
- Jeremie S. 2006. Cétacés de la Martinique : échantillonnage visuel et acoustique des eaux territoriales et de la zone contigüe de l'espace maritime, mars-avril 2006. Rapport Association SEPANMAR pour la DIREN Martinique : 63 pp.
- Levesque A., Duzont F., Mathurin A. & Chiffard J. 2007. Liste des oiseaux de la Guadeloupe (3ème édition). Grande-Terre, Basse-Terre, Marie-Galante, les Saintes, la Désirade, Îlets de la Petite-Terre. Rapport AMAZONA n° 15. 12 p.
- Rinaldi C. et Rinaldi R. 2007. Les cétacés dans l'Archipel Guadeloupéen et dans la Caraïbe, Etat des connaissances et perspectives, 1998-2006. Rapport Association Evasion Tropicale pour la DIREN Guadeloupe, PNSP 2006/010 : 83 pp.
- Swartz S.L., Cole T., Mc Donald M.A., Hildebrand J.A., Oleson E.M., Martinez A., Clapham P.J., Barlow J. and Jones M.L., 2003. Acoustic and visual survey of Humpback Whale (*Megaptera novaeangliae*) Distribution in the Eastern and Southern Caribbean Sea. *Caribbean Journal of Science*, Vol. 39, N°2 : 195-208.
- Wood, S. N. and N. H. Augustin. 2002. GAMs with integrated model selection using penalized regression splines and applications to environmental modelling. *Ecological Modelling* 157:157-177.

Liste des figures et tableaux

Figure 1 : aéronef P 68C de la compagnie AirKeyWest affrété pour la campagne et équipé de <i>bubble windows</i>	p5
Figure 2 : les observateurs (a : utilisation de l'inclinomètre pour les relevés de distance, b et c: observation et saisie des données en vol)	p5
Figure 3 : carte de la zone d'étude avec la bathymétrie : limites de la ZEE des Antilles françaises (a) et sous zones d'échantillonnage A à G (b)	p6
Figure 4 : cartes de plan d'échantillonnage prévu dans chacun des blocks (a) et de l'échantillonnage réalisé (b)	p6
Figure 5 : cartes des descripteurs environnementaux utilisés pour la modélisation d'habitats	p10
Figure 6 : Exemple de simulation de données de comptage	p13-14
Figure 7 : Moyennes quotidiennes du vent et de la houle relevées à la bouée atlantique de la Désirade lors de la campagne	p15
Figure 8 : cartes des observations de cétacés (a : les espèces observées ; b : taille des groupes observés)	p18
Figure 9 : cartes de la distribution des observations de delphinidés (a), de cachalots (b) et de baleines à bosse (c)	p19
Figure 10 : cartes des observations d'oiseaux de mer (a : les espèces observées ; b : taille des groupes observés)	p21
Figure 11 : cartes de la distribution des observations des pailles en queue	p22
Figure 12 : cartes de la distribution des observations des sternes « brunes » (bridées ou fuligineuses)	p22
Figure 13 : cartes de la distribution des observations de fous (majoritairement fou brun)	p23
Figure 14 : carte des observations de tortues marines	p23
Figure 15 : cartes de la distribution des bateaux et engins de pêche (a), des bateaux de plaisance (b) et des macros déchets (c)	p24
Figure 16 : cartes prédictives de la distribution des principales espèces d'oiseaux et des cétacés sur l'arc antillais	p26
Figure 17 : cartes prédictives de la distribution des principales activités humaines sur l'arc antillais	p27
Figure 18 : cartographie d'un indice d'habitat prioritaire sur l'arc antillais	p28
Figure 19 : cartographie d'un indice de zones d'activités humaines sur l'arc antillais	p29
Figure 20 : cartographie d'un indice de zone de conflits potentiels sur l'arc antillais	p30
Figure 21 : résultats des analyses de sensibilité pour les oiseaux marins (a, b, c, d), mammifères marins (e, f, g) et activités humaines (h, i, j)	p33-35

Tableau 1 : stratification et répartition de l'effort d'observation	p7
Tableau 2 : Classement des espèces par taxons en fonction de leur caractérisation visuelle	p8
Tableau 3 : récapitulatif des descripteurs environnementaux utilisés pour la modélisation d'habitats et abréviations associées	p10
Tableau 4 : total des observations de cétacés réalisées sur transect ou en transit (espèce et taille des groupes observés)	p16
Tableau 5 : total des observations de cétacés réalisées sur transect et en transit dans chacun des blocks et dans chacune des régions	p17
Tableau 6 : abondance relative par unité d'effort pour les principales espèces de cétacés rencontrées	p17
Tableau 7 : total des observations d'oiseaux (espèce et taille des groupes observés)	p20
Tableau 8 : total des observations d'oiseaux réalisées dans chacun des blocks et dans chacune des régions	p20
Tableau 9 : récapitulatif des modèles statistiques spatiaux et de leur performance respective	p25
Tableau 10 : Estimations d'abondances par strip-transect pour les oiseaux marins, mammifères marins et activités anthropiques	p32

ANNEXE 1 : Estimations minimales des effectifs d'oiseaux de mer sur les colonies des petites Antilles (Iles Vierges à Trinidad et Tobago) exprimées en nombre d'individus

	puffin d'Audubon	paille-en-queue à bec rouge	frégate superbe	fou masqué	fou brun	fou à pieds rouges	sterne des Antilles	sterne pierregarin	sterne de Dougall	sterne caugek	sterne royale	sterne fuligineuse	sterne bridée	noddi brun	noddi noir	Total
Iles Vierges américaines		100		100	250		280		20	50	20	20000	50	100		20970
Anguilla	0	36	310	60	2115	0	213	1	420	0	115	11300	316	891	0	15777
Antilles néerlandaises (sauf Curaçao, Bonaire, Aruba)	1000	890	0	0	130	0	0	10	0	0	90	0	0	0	0	2120
Saint Martin	0	60	0	0	0	0	82	0	0	0	0	0	0	140	0	282
Saint Kitts et Nevis	0	0	0	0	0	0	65	0	0	0	0	0	60	0	0	125
Antigua et Barbuda	0	0	5500	170	300	300	650	0	20	0	0	0	0	0	0	6940
Guadeloupe	0	215	0	0	0	0	130	0	0	0	0	15400	210	230	0	16185
Dominique	0	180	300	0	400	0	0	0	0	0	0	0	500	300	350	2030
Martinique	146	0	100	0	160	0	0	0	550	0	0	7000	230	310	0	8496
Sainte Lucie	0	0	0	0	0	0	0	0	50	0	0	0	250	0	0	300
Barbade	50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	50
Saint Vincent et les Grenadines	0	0	619	0	550	3000	0	0	200	50	550	0	0	0	0	4969
Trinidad et Tobago	600	350	0	80	150	1169	0	0	0	0	0	0	43	0	0	2392
Total petites Antilles	1796	1731	6829	310	3805	4469	1140	11	1240	50	755	33700	1609	1871	350	59666

Source : Birdlife International, Important Bird Areas in the Caribbean : <http://www.birdlife.org/regional/caribbean/index.html> (consulté le 16 janvier 2009)