



Université de Toliara

Ecole Doctorale Thématique : Sciences Marines et Halieutiques

Thèse

Pour obtenir le Diplôme de

DOCTORAT

Option : Gestion de ressources marines

Caractérisation spatio-temporelle de la pêche aux poissons récifo-lagonaires par trajectométrie dans la baie de Toliara (sud-ouest de Madagascar)

Présentée et soutenue publiquement par :

BEHIVOKÉ Faustinato

Le 23 mars 2022

Jury:

Président :	XXXX	XXXX
Directeur de thèse :	RANAIVOSON Eulalie	Professeur Titulaire à l'Université de Toliara
Co-directeur de thèse :	LEOPOLD Marc	Directeur de recherche à l'IRD
Rapporteur interne :	XXXX	XXXX
Rapporteur externe :	XXXX	XXXX
Examineur :	XXXX	XXXX
Examineur :	XXXX	XXXX



REMERCIEMENTS

Mes premiers remerciements s'adressent naturellement, au Pr RANAIVOSON Eulalie, mon directeur de thèse, sans lequel toute cette aventure n'aurait pas été possible. Vos conseils scientifiques et personnels, si riches, ont sûrement été la clé de réussite de cette recherche.

Je remercie également mon co-directeur, le Dr Marc LEOPOLD, qui a développé la recherche sur la trajectométrie des pirogues traditionnelles au sein de l'Institut Halieutique et des Sciences Marins. Sans son encadrement et appui, je ne serai pas parvenu au terme de ce travail. Son dynamisme m'a motivé à explorer davantage le monde halieutique.

Ma gratitude s'adresse aussi au directeur de l'Ecole Doctorale Sciences Marines et Halieutiques de l'Université de Toliara, le Pr MARA Edouard REMANEVY, pour ses appuis administratifs et ses directives.

Je tiens également à remercier les membres du jury d'avoir pris leurs disponibilités et d'avancer leurs suggestions dans le but d'améliorer la qualité de ce manuscrit.

Je suis entièrement reconnaissant envers l'équipe du JEAI-ACOM. Merci au Dr MAHAFINA Jamal, Directeur de l'IHSM d'avoir été toujours présent pour toutes les démarches administratives durant mes mobilités. Ma gratitude s'adresse au Dr Dominique PONTON, pour ses avis scientifiques à la taxonomie des poissons et ses instructions. Une pensée spéciale destinée aux étudiants stagiaires : Randriantsara Roddy Michel, le "GPS man" pour son assistance technique durant cette étude, Nicolas pour sa créativité dans la photographie des échantillons, les techniciens de laboratoire (Romario Tsipy, Jean-Jacques Marcellin et Duprehno) ainsi que les collègues doctorants (Jaonalison et Radonirina), sans oublier les jeunes chercheurs à qui on a partagé des souvenirs au bureau : Huguette, Pathy, Manankery, Sandra, Lisiane, Jovial, Duolah,...

J'exprime toute ma reconnaissance au Pr Grégoire THOMAS, directeur général d'Agrocampus Ouest-Rennes et au Dr Mathieu EMILY, responsable du département de Statistique et d'Informatique pour leurs accueils au cours de ma thèse, sans oublier Mme Hélène ROUILLE pour son assistance administrative. Un grand merci au Dr Marie-Pierre ETIENNE, qui m'a beaucoup aidé dans les explorations et analyses de données, et à Mr Jérôme GUITTON du laboratoire Halieutique qui m'a initié à la gestion de base de données relationnelle. Leurs gentillesse et leurs compétences m'ont été précieuses.

Mes remerciements s'adressent également aux autorités locales et à tous les pêcheurs de la baie de Toliara qui m'ont beaucoup aidé dans la collecte des données sur le terrain. Une pensée amicale s'adresse à Mélan, Jean-Chris, Darea, Guy, Rose, Richard, Toto et Georges.

Un immense merci rempli d'amour s'adresse à ma famille et à mes parents pour leurs soutiens inconditionnels et leurs encouragements tout au long de cette épreuve.

Ce travail n'aurait pu être mené à bien sans l'appui financier de : Jeune Equipe Associée à l'IRD (JEAI-ACOM), de l'IRD via le programme ARTS, du BGF 2017 (aides à la mobilité aux pays du sud), du Critical Ecosystem and Partnership Funds (MG 64 341), du Laboratoire d'Excellence Corail (n°2AO2017) et de la Fondation Rufford (2ac29a-1).

Mahavelo Bevata Rolahy !

RESUME

Afin d'évaluer la durabilité des pêcheries et pour soutenir la gestion des pêcheries, des informations quantitatives et spatiales précises sur la dynamique spatio-temporelle de l'effort de pêche et des captures sont nécessaires. Le suivi des trajectoires des embarcations permet d'obtenir ces informations, mais il reste très difficile à mettre en œuvre dans les pêcheries récifales multi-spécifiques et multi-engins comme dans la baie de Toliara (sud-ouest de Madagascar). Face à cette problématique, l'utilisation de traceurs GPS mobiles (comme équipement d'enregistrement de trajet) a été explorée dans ce cas d'étude pour répondre aux principales questions suivantes : quelle méthode permet de classifier avec précision les opérations de pêche durant la sortie en mer à partir des positions GPS des trajectoires des embarcations (pirogues à voile traditionnelles) ? Comment se répartissent les indicateurs halieutiques (effort de pêche et captures) à fine échelle temporelle et spatiale dans la baie de Toliara, d'après ces nouvelles informations ? Pour ce faire, une méthode d'analyse permettant d'identifier automatiquement les événements « pêche » et « non-pêche » a d'abord été développée par filtre de vitesse et par apprentissage statistique (algorithme de forêt aléatoire ou Random Forest), dont la qualité de prédiction a été satisfaisante pour les cinq principaux engins de pêche étudiés à savoir le filet maillant, la ligne à main, le fusil-harpon, le chalut à moustiquaire et la senne de plage.

Cette méthode de prédiction a ensuite été appliquée à des données de suivi de trajectoires des pirogues et des captures de poissons récifaux (quantités et diversité par famille) associées à ces sorties de pêche sur l'ensemble de flottille piroguière de la baie (892 pêcheurs-piroguiers) de mai 2018 à avril 2019. Les données de suivi ont été extrapolées par inférence statistique pour estimer l'effort de pêche effectif global et la production halieutique à l'échelle de la pêcherie pendant une année.

Les résultats de cette étude révèlent que l'effort de pêche effectif global a été estimé 268 241 heures dont 90% étaient concentrés dans le lagon et le Grand Récif de Toliara alors que l'effort de pêche sur la pente externe du récif ne représentait que 10%. Principal engin utilisé, le filet maillant assurait 41% de l'effort de pêche dans la zone contre 59% pour les quatre autres engins : ligne à main (16%), senne de plage (16%), chalut à moustiquaire (11%) et fusil-harpon (16%). Les déplacements des pirogues montrent que les pêcheurs des villages aux extrémités de la baie (Sarodrano au sud et Ambohitsabo au nord) ont des comportements plus sédentaires par rapport aux autres qui exploitaient une zone plus vaste. L'augmentation de pêcheurs sur le littoral impacte la baie de Toliara par le développement des engins destructifs notamment le chalut à moustiquaire jugé facile à acquérir et à utiliser.

En reliant les données des trajectoires avec les données des captures, on a estimé la production à 1 040 tonnes soit un rendement moyen de 6.6 tonnes/an/km², qui est en diminution (- 45%) par rapport aux résultats antérieurs datant du début des années 1990. La diversité des captures, par contre, a

augmenté avec 75 familles de poissons récifaux recensées (soit + 46%). Ces constats témoignent que la baie de Toliara est en situation de surexploitation.

L'étude trajectométrique a apporté des connaissances inédites sur l'estimation quantitative et spatiale avec précision sur l'effort de pêche, captures et zones pêche qui sont des principaux indicateurs halieutiques nécessaires à la gestion des pêcheries. Des études sur l'indice d'abondance (type CPUE) et sur la composition taxonomique au niveau espèce pourraient approfondir les informations obtenues. Quoiqu'il en soit, les résultats de cette étude pourraient être valorisables pour les scientifiques et les administrateurs afin de réfléchir et de définir des mesures de gestion appropriées dans la zone en considérant son contexte socio-économique.

Mots clés : GPS, forêt aléatoire, apprentissage, effort de pêche effectif, capture, surexploitation, Madagascar

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION GENERALE.....	1
Spécificité de la pêche récifale	1
Poissons récifaux : cibles principales des petits pêcheurs	2
Trajectoires de bateaux pour l’halieutique	3
Problématique	6
Hypothèses et objectifs	7
METHODES GENERALES	9
Zone d’étude	9
Embarcation et engins de pêche	12
Outil d’enregistrement de trajectoires : le traceur GPS	18
Etude trajectométrique des pirogues	19
Chapitre I. IDENTIFICATION AUTOMATIQUE DES EVENEMENTS PECHE DES PIROGUES.....	23
1.1. Introduction	23
1.2. Matériels et Méthodes	24
1.2.1. Collecte de données de trajectoires	24
1.2.1.1. Données de trajectoires de pirogues	25
1.2.1.2. Structuration de données	26
1.2.2. Analyse de données	27
2.2.2.1. Analyse avec le seuil de vitesse	27
2.2.2.2. Analyse avec l’algorithme de Random Forest	28
2.2.2.3. Mesures de performance des méthodes analytiques	30
1.3. Résultats	31
2.3.1. Caractéristique de l’activité de pêche par type d’engin	31
2.3.2. Performance des méthodes analytiques	35
2.3.2.1. Critères de performance des prédictions	35
2.3.2.2. Distribution spatiale de la sensibilité	36
2.3.2.3. Estimation de l’effort de pêche effectif	37
1.4. Discussion	39
1.5. Conclusion	41
Chapitre II. CARACTERISATION DE L’EFFORT DE PECHE DANS LA BAIE DE TOLIARA	42
2.1. Introduction	42
2.2. Matériels et Méthodes	43
2.2.1. Collecte de données	43
2.2.1.1. Inventaire des pirogues et engins de pêche	43
2.2.1.2. Suivi des trajectoires de pirogues	44

2.2.1.3.	Echantillonnage des pirogues.....	45
2.2.2.	Analyse de données.....	46
2.2.2.1.	Détermination de la flottille de pêche piroguière.....	46
2.2.2.2.	Analyse spatiale et temporelle.....	46
2.2.2.3.	Spatialisation et quantification de l'effort de pêche.....	47
2.3.	Résultats.....	47
2.3.1.	Profils des villages de pêcheurs et des sites de débarquement.....	47
2.3.2.	Caractéristiques de la flottille et des engins de pêche aux poissons récifaux.....	50
2.3.3.	Distribution de l'effort de pêche global.....	54
2.3.4.	Distribution de l'effort de pêche par engin.....	57
2.3.4.1.	Effort de pêche du filet maillant.....	58
2.3.4.2.	Effort de pêche de la ligne à main.....	59
2.3.4.3.	Effort de pêche du fusil-harpon.....	60
2.3.4.4.	Effort de pêche du chalut à moustiquaire.....	61
2.3.4.5.	Effort de pêche de la senne de plage.....	62
2.3.5.	Distribution de l'effort de pêche par village.....	63
2.3.5.1.	Effort de pêche de Sarodrano.....	65
2.3.5.2.	Effort de pêche d'Ankilibe.....	66
2.3.5.3.	Effort de pêche d'Ankiembe-haut.....	67
2.3.5.4.	Effort de pêche de Mahavatse 1.....	68
2.3.5.5.	Effort de pêche d'Ankiembe-bas.....	69
2.3.5.6.	Effort de pêche de Mahavatse 2.....	70
2.3.5.7.	Effort de pêche de Besakoa.....	71
2.3.5.8.	Effort de pêche d'Ambohitsabo.....	72
2.4.	Discussion.....	73
2.4.1.	Evolution de la flottille piroguière et des pêcheurs.....	73
2.4.2.	Intensité de pêche dans la baie de Toliara.....	77
2.5.	Conclusion.....	78
Chapitre III. CARACTERISATION DE LA PRODUCTION HALIEUTIQUE DANS LA BAIE DE TOLIARA.....		80
3.1.	Introduction.....	80
3.2.	Matériels et Méthodes.....	81
3.2.1.	Suivi taxonomique des captures.....	81
3.2.2.	Suivi des captures globales par sortie.....	83
3.2.3.	Analyse de données des captures.....	83
3.2.3.1.	Composition et abondance des captures.....	83
3.2.3.2.	Spatialisation et quantification de la production.....	84

3.3. Résultats	85
3.3.1. Diversité et abondance des captures	85
3.3.2. Distribution de la production dans la baie	90
3.3.3. Distribution de la production par engin	91
3.3.4. Distribution de la production par village	94
3.4. Discussion	97
3.4.1. Diversité des captures de pêche	97
3.4.2. Statut d'exploitation des ressources récifales	98
3.5. Conclusion	99
DISCUSSION GENERALE	101
Développement de la méthode de suivi halieutique	101
Dynamique spatio-temporelle de la pêche récifale	103
<i>Evolution de pressions de pêche dans la baie de Toliara</i>	103
<i>Développement du chalut à moustiquaire</i>	104
<i>Augmentation de la diversité des captures de poissons récifaux</i>	105
<i>Baisse de la production halieutique de poissons récifaux</i>	106
Enjeux de la gestion durable de la pêche récifale	106
CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES	109
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	111

ANNEXES

LISTE DES FIGURES

Fig. 1: Dispositif du VMS.....	3
Fig. 2: Fonctionnement du VMS.....	4
Fig. 3: Dispositif de l'AIS.....	5
Fig. 4: Fonctionnement de l'AIS.....	5
Fig. 5: Localisation de la zone d'étude.....	10
Fig. 6: Pirogue monoxyle à balancier.....	12
Fig. 7: Filet maillant (A), Pêche encerclant (B).....	14
Fig. 8: Chalut à moustiquaire (A), Traction du filet (B).....	15
Fig. 9: Senne de plage (A), Halage du filet (B).....	16
Fig. 10: Hameçons (A), Pêche à la ligne (B).....	17
Fig. 11: Fusil-harpon.....	17
Fig. 12: Traceur GPS i-gotU (A), GPS i-gotU branché à un power bank à incorporer dans un boîtier artisanal (B).....	19
Fig. 13: Traceur GPS CatLog (A), GPS CatLog branché à une batterie incorporée dans un boîtier original (B).....	19
Fig. 14: Etapes méthodologiques.....	22
Fig. 15: Présentation des trajets bruts de GPS pour les cinq pirogues utilisant différents types d'engins de pêche (Behivoke et al.,2021).....	32
Fig. 16: Caractéristiques des motifs de trajectoire de la senne de plage.....	33
Fig. 17: Caractéristiques des motifs de trajectoire du filet maillant.....	33
Fig. 18: Caractéristiques des motifs de trajectoire de la ligne à main.....	34
Fig. 19: Caractéristiques des motifs de trajectoire du fusil-harpon.....	34
Fig. 20: Caractéristiques des motifs de trajectoire du chalut à moustiquaire.....	35
Fig. 21: Cartes de la sensibilité spatiale du modèle de Forêt Aléatoire (A) et du seuil de vitesse (B) pour chaque type d'engin (Behivoke et al.,2021).....	37
Fig. 22: Effort de pêche par sortie (h) par type d'engin (Behivoke et al.,2021).....	38
Fig. 23: Codification des pêcheurs.....	44
Fig. 24: Pirogues en parking vertical dans le site de débarquement d'Ankilibe.....	48
Fig. 25: Pirogues suspendues et sur la digue de protection (site de débarquement d'Ankiembe-bas).....	49
Fig. 26: Nombre de pirogues et de pêcheurs par village.....	51
Fig. 27: Fréquence de longueur des pirogues dans la baie.....	51
Fig. 28: Proportion de la longueur des pirogues suivant les engins de pêche.....	52
Fig. 29: Proportion d'utilisation des engins de pêche dans la baie.....	53
Fig. 30: Proportion d'utilisation des engins par village.....	53
Fig. 31: Distribution de l'effort de pêche global dans la baie de Toliara.....	55
Fig. 32: Proportion de l'effort de pêche par géomorphologie récifale.....	56
Fig. 33: Effort de pêche total par engin.....	57
Fig. 34: Variation intra annuelle de l'effort de pêche par engin.....	58
Fig. 35: Distribution de l'effort de pêche du filet maillant.....	59
Fig. 36: Distribution de l'effort de pêche de la ligne à main.....	60
Fig. 37: Distribution de l'effort de pêche du fusil-harpon.....	61
Fig. 38: Distribution de l'effort de pêche du chalut à moustiquaire.....	62
Fig. 39: Distribution de l'effort de pêche de la senne de plage.....	63
Fig. 40: Effort de pêche total par village.....	64
Fig. 41: Variation intra annuelle de l'effort de pêche par village.....	65
Fig. 42: Distribution de l'effort de pêche du village de Sarodrano.....	66
Fig. 43: Distribution de l'effort de pêche du village d'Ankilibe.....	67

Fig. 44: Distribution de l'effort de pêche du village d'Ankiembe-haut	68
Fig. 45: Distribution de l'effort de pêche du village de Mahavatse 1	69
Fig. 46: Distribution de l'effort de pêche du village d'Ankiembe-bas	70
Fig. 47: Distribution de l'effort de pêche du village de Mahavatse 2	71
Fig. 48: Distribution de l'effort de pêche du village de Besakoa	72
Fig. 49: Distribution de l'effort de pêche du village d'Ambohitsabo	73
Fig. 50: Evolution de la population de la ville de Toliara	74
Fig. 51: Codification de l'échantillon des captures.....	82
Fig. 52: Diversité et abondance des captures dans la baie	85
Fig. 53: Répartition des familles capturées en fonction des engins de pêche	86
Fig. 54: Diversité et abondance des captures du filet maillant	87
Fig. 55: Diversité et abondance des captures de la ligne à main	87
Fig. 56: Diversité et abondance des captures du fusil-harpon.....	88
Fig. 57: Diversité et abondance des captures du chalut à moustiquaire	89
Fig. 58: Diversité et abondance des captures de la senne de plage	89
Fig. 59: Distribution de la production halieutique dans la baie de Toliara	90
Fig. 60: Proportion de la production halieutique par géomorphologie récifale	91
Fig. 61: Distribution de la production halieutique par engin	92
Fig. 62: Production halieutique totale par engin.....	93
Fig. 63: Variation intra annuelle de la production halieutique par engin	94
Fig. 64: Distribution halieutique par village de la baie de Toliara	95
Fig. 65: Production totale par village	96
Fig. 66: Variation intra annuelle de la production par village	97

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Classement des évènements de pêche observés lors d'une sortie en mer par type d'engin	20
Tableau 2: Nombre de trajets avec observation par engin suivi.....	25
Tableau 3: Vitesse minimale (seuil) de classification par type d'engin de pêche	28
Tableau 4: Description des 24 covariables qui ont été calculées à la position GPS de chaque pirogue et utilisées par l'algorithme de Forêt Aléatoire (adapté de Behivoke et al.,2021)	29
Tableau 5: Mesures de performance des modèles de vitesse et de Forêt Aléatoire par type d'engin	36
Tableau 6: Code village et code engin utilisé dans la base de données pêcheur	43
Tableau 7: Nombre des pêcheurs-piroguiers par engin inventorié dans la baie de Toliara	44
Tableau 8: Nombre des pirogues suivies (équipés de GPS) par village.....	45
Tableau 9 : Nombre de la population, des pirogues et des pêcheurs (aux poissons récifaux et autres ressources) de la baie de Toliara	50
Tableau 10: Test de comparaison deux à deux entre l'effort de pêche des engins.....	57
Tableau 11: Test de comparaison deux à deux entre l'effort de pêche des villages	64
Tableau 12: Evolution de la population de la Commune rurale de St Augustin	74
Tableau 13: Evolution du nombre des engins de pêche dans la baie de Toliara	76
Tableau 14: Période d'échantillonnage des captures	81
Tableau 15: Indice de diversité des captures par engin.....	86
Tableau 16: Test de comparaison deux à deux entre la production des engins.....	93
Tableau 17: Test de comparaison deux à deux entre la production des villages.....	96

LISTE DES ANNEXES

Annexe 1: Extrait des données GPS lors du suivi	1
Annexe 2: Synthèse méthodologique du code R sur la réalisation de l'analyse forêt aléatoire et de la validation croisée des données de suivi	2
Annexe 3: Fiche d'inventaire des pirogues et des engins de pêche.....	III
Annexe 4: Fiche de suivi des captures aux débarquements	IV
Annexe 5: Dispositif de prise de photo d'échantillon de poissons	V
Annexe 6: Fiche du suivi participatif de la capture globale journalière de pêcheur	VI
Annexe 7: Liste des familles de poissons capturées.....	VII
Annexe 8: Photos des dix familles dominantes des captures de poissons dans la baie de Toliara	VIII
Annexe 9: Liste de nouvelles familles composant les captures des poissons récifaux dans la baie de Toliara.....	X
Annexe 10: Zoom cartographique de la distribution de la production halieutique par engin	XI
Annexe 11: Zoom cartographique de la distribution de la production halieutique par village	XIV
Annexe 12: Liste des communications scientifiques en relation avec la thèse	XVIII

INTRODUCTION GENERALE

Spécificité de la pêche récifale

La pêche maritime demeure une source importante de nourriture et de revenu pour des centaines de millions de personnes avec une production mondiale de 84.4 millions de tonnes contre 12.0 millions de tonnes pour la pêche continentale (FAO, 2018a). Environ 90 % des 120 millions de pêcheurs à temps plein ou partiel dans le monde tirent leur subsistance du secteur artisanal. On estime que la pêche artisanale contribue à 70 % du total des captures mondiales, qui sont principalement destinées à la consommation humaine (Mills et al., 2011).

La petite pêche domine la pêche maritime dans la majorité des pays en développement à l'échelle mondiale. Dans la plupart des régions de l'océan Indien occidental, la petite pêche contribue à 93-98% des captures marines (Tuda et al., 2016).

Nombreuses définitions existent sur la pêche artisanale et la petite pêche, par exemple celle de la (FAO, 2018b) qui la définit comme une pêche réalisée par des personnes au foyer (ménage), utilisant relativement peu de capital et d'énergie (contrairement aux entreprises commerciales), des bateaux de pêche relativement petits (le cas échéant), effectuant de courtes sorties de pêche, à proximité des côtes. Entre autres, Staples et al., (2004) et Tzanatos et al., (2006) ont généralement décrit la petite pêche comme une pêche utilisant des engins et des bateaux de faible technologie pour cibler une variété d'espèces à des fins de subsistance et pour les marchés locaux. Vu la grande diversité des pêcheries à petite échelle et l'absence de définition unique, le terme "pêche artisanale", "petite pêche" et "pêche traditionnelle" sont souvent utilisés pour désigner les pêches à petite échelle et, dans le cadre de cette étude, ces termes sont considérés comme interchangeables pour désigner les mêmes pêches.

La pêche à petite échelle joue un rôle important en contribuant à la sécurité alimentaire et à la nutrition, aux moyens de subsistance, aux économies locales et nationales. Toutefois, les données et les informations disponibles sur cette contribution, sont limitées. Et, par conséquent, la pêche artisanale a tendance à être négligée et marginalisée dans les processus politiques, ce qui entraîne un faible niveau de soutien à ce secteur (FAO, 2018b). Les Directives Volontaires visant à assurer la durabilité des pêches à petite échelle dans le contexte de la sécurité alimentaire et de l'éradication de la pauvreté (SSF guidelines), adoptées par le Comité des pêches de la FAO en 2014, fournissent un cadre politique sur la manière d'assurer la durabilité des pêches à petite échelle par une approche holistique et intégrée ; toutefois, ce processus de transformation a besoin d'un soutien important pour se réaliser et pour réussir (FAO, 2018a). La réalisation d'un tel soutien nécessite l'amélioration des connaissances scientifiques par une étude innovante en considérant une nouvelle méthode pour la collecte de différents types de données.

Les caractéristiques les plus importantes de la petite pêche sont leur extraordinaire diversité et leur adaptabilité à différentes ressources cibles, aux milieux et saisons, qui, en combinaison avec l'absence quasi totale de rejets et de la notion de prises accessoires, la rend souvent plus en accord avec le caractère de l'écosystème local (Kolding et al., 2014)

Les récifs coralliens sont l'un des écosystèmes les plus productifs et les plus riches en biodiversité de la planète. Ils procurent des biens et des services essentiels à des millions de personnes vivant à proximité des côtes. Ils représentent d'importantes sources de nourriture et de revenus, servent d'alevinières à des espèces de poissons commerciaux (Burke et al., 2012). Ils constituent une ressource économique à part entière pour de nombreux territoires (Moberg and Folke, 1999), notamment à travers la pêche (Polunin and Graham, 2003).

Les pêcheries récifales exploitent les ressources des écosystèmes coralliens qui abritent une biodiversité tout aussi importante que celle des forêts tropicales (Connell, 1978). Elles sont caractérisées par une stratégie d'exploitation multi-spécifiques et multi-engins par sa grande variété de structure et de fonctionnement qui s'explique notamment par la diversité du milieu exploité (Ferraris and Cayré, 2003). Face à la diversité des techniques de pêche, les espèces cibles ayant une affinité écologique au récif et au lagon sont très variées. Ainsi, l'absence de grands stocks mono-spécifiques et la difficulté d'accès des unités de pêche industrielle aux récifs coralliens, expliquent que les pêcheries récifales sont principalement artisanales ou traditionnelles (Brenier, 2009).

Poissons récifaux : cibles principales des petits pêcheurs

Les petits pêcheurs exploitent généralement les ressources halieutiques au niveau du récif et de ses environs (lagon, pente externe). D'où l'appellation de la pêche récifale. Parmi les organismes ciblés par la pêche récifale se trouvent les poissons récifaux (en particulier des poissons d'intérêt alimentaire des familles de Serranidae, Lutjanidae, Lethrinidae, Holocentridae, Mullidae, Acanthuridae, Scaridae et les poissons d'intérêt ornemental), les poissons semi-pélagiques qui vivent autour des récifs ou dans les chenaux des lagons (principalement des Clupeidae et Carangidae), les poissons pélagiques, vivant au large, mais qui peuvent être proches des pentes externes des récifs coralliens (thons, bonites, requins), des invertébrés (crustacés, mollusques, échinodermes), et des organismes tels que les coraux, éponges ou algues qui sont parfois exploités à des fins commerciales (Lecaillon et al., 2000 ; Jugant, 2012). Cependant, les poissons récifaux sont les plus exploités par cette pêche (Brenier, 2009; Davies et al., 2009). Pour la plupart des auteurs, les poissons récifaux ou poissons coralliens correspondent à l'ensemble des poissons que l'on rencontre dans les récifs coralliens (Jugant, 2012). Dans cette étude, on définit comme étant poissons récifaux, toutes espèces de poissons pouvant être rencontrées habituellement dans le complexe récifo-lagonaire, qu'elles dépendent étroitement ou non de la vitalité des scléactinaires.

Les récifs coralliens représentent l'écosystème marin où la diversité en espèces de poissons est la plus riche, avec près de 4000 espèces de poissons récifaux connues (Jugant, 2012). Les poissons récifaux sont principalement les cibles des pêcheurs traditionnels en raison de leurs valeurs marchandes élevées, et du fait de la dominance des engins de pêche aux poissons considérés comme efficaces dont les filets et les sennes.

Les pêcheries récifales font l'objet d'une attention particulière à l'échelle mondiale face à la dégradation des récifs coralliens (Wilkinson, 2004). La collecte des données utiles au suivi des pêcheries récifales, notamment sur de larges échelles spatiales et temporelles, nécessite une méthode appropriée pour avoir des données quantitatives et qualitatives précises en vue d'étudier leurs situations actuelles.

Trajectoires de bateaux pour l'halieutique

Des estimations de la distribution spatiale et de l'intensité de l'activité de pêche sont nécessaires dans le cadre de gestion des ressources naturelles, de l'évaluation des impacts potentiels de certains métiers (engin) sur les espèces et les habitats, et dans le cadre de la planification de l'espace maritime (Le Guyader et al., 2016). Depuis l'utilisation du Système de Suivi des Navires (Vessel Monitoring System – VMS) et du Système d'Identification Automatique (Automatic Identification System – AIS), ces instruments constituent une source d'informations très importante pour la distribution spatio-temporelle des activités de pêche.

D'après la définition du département de pêches européennes, le VMS est un système de surveillance par satellite (Fig. 1) qui, à intervalles réguliers, fournit aux autorités de la pêche des données sur la localisation, la trajectoire et la vitesse des navires (Fig. 2).

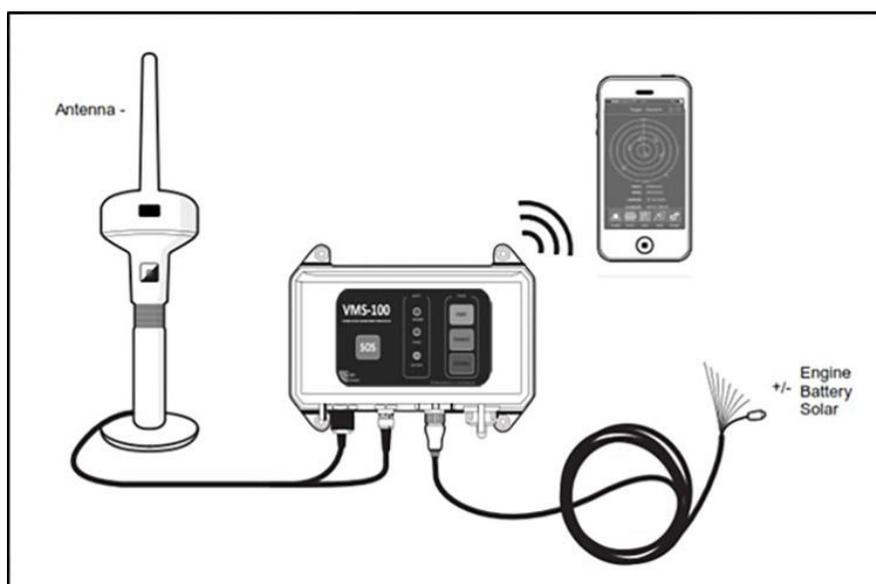


Fig. 1: Dispositif du VMS

(Source : srt-marine.com)

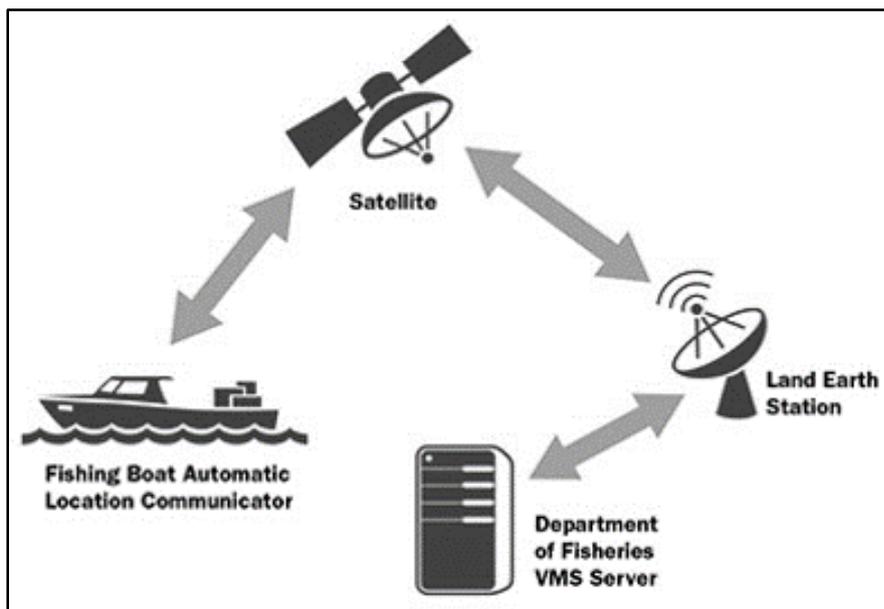


Fig. 2: Fonctionnement du VMS

(Source : fish.wa.gov.au)

Depuis 2009, en Europe, tous les navires de plus de 15m sont réglementairement obligés d'être équipés de terminaux VMS. Progressivement et notamment sous l'égide de la FAO, Le VMS est aujourd'hui un outil standard de surveillance et de contrôle des pêches dans le monde entier.

L'utilisation des données issues de ces outils permettent d'assurer le suivi de la pêche industrielle. Mais les petits navires (< 12 m) ne sont pas concernés par le système VMS, l'accès aux données VMS reste très restreint, et leurs analyses sont habituellement réalisées à une résolution spatiale de 1 km de 10 km en raison de leur faible fréquence de transmission (Le Guyader et al., 2016).

Contrairement au VMS, qui est généralement basé sur des communications par satellite point à point entre le navire et les centres au sol, Les messages AIS sont diffusés par les navires de façon omnidirectionnelle et peuvent être reçus par d'autres navires dans le voisinage, par des récepteurs au sol et par des satellites (Natale et al., 2015).

L'AIS est un système d'échanges automatisés de messages entre navires par radio VHF (Fig. 3) qui permet aux navires et aux systèmes de surveillance de trafic de connaître l'identité, le statut, la position et la route des navires se situant dans la zone de navigation (Fig. 4).

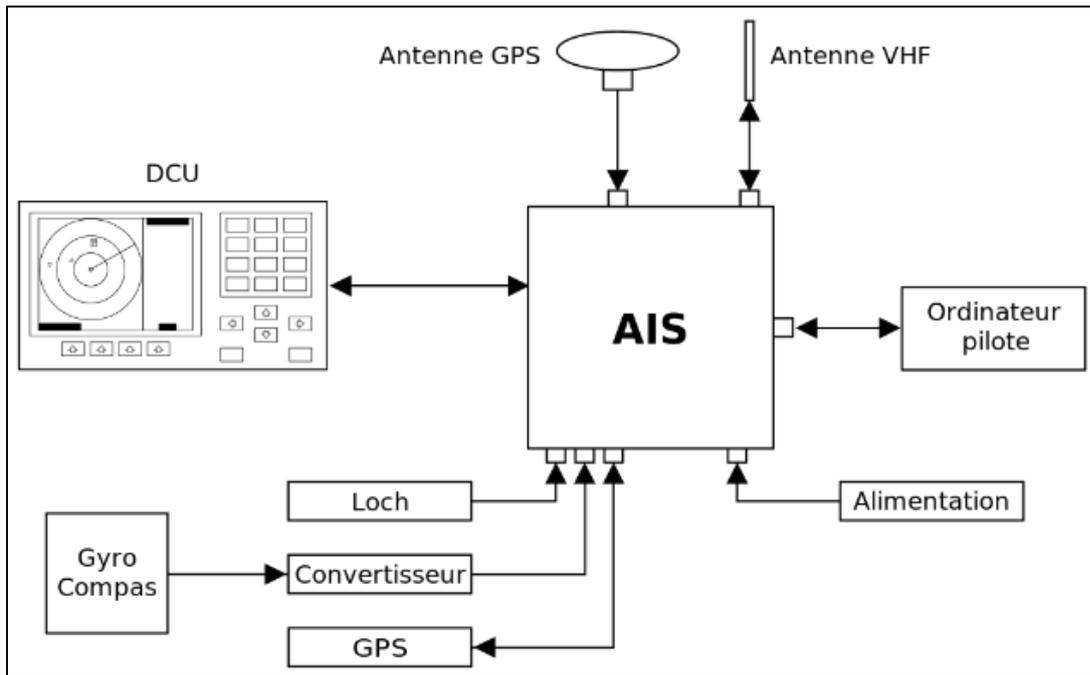


Fig. 3: Dispositif de l'AIS
 (Source : wikimedia.org)

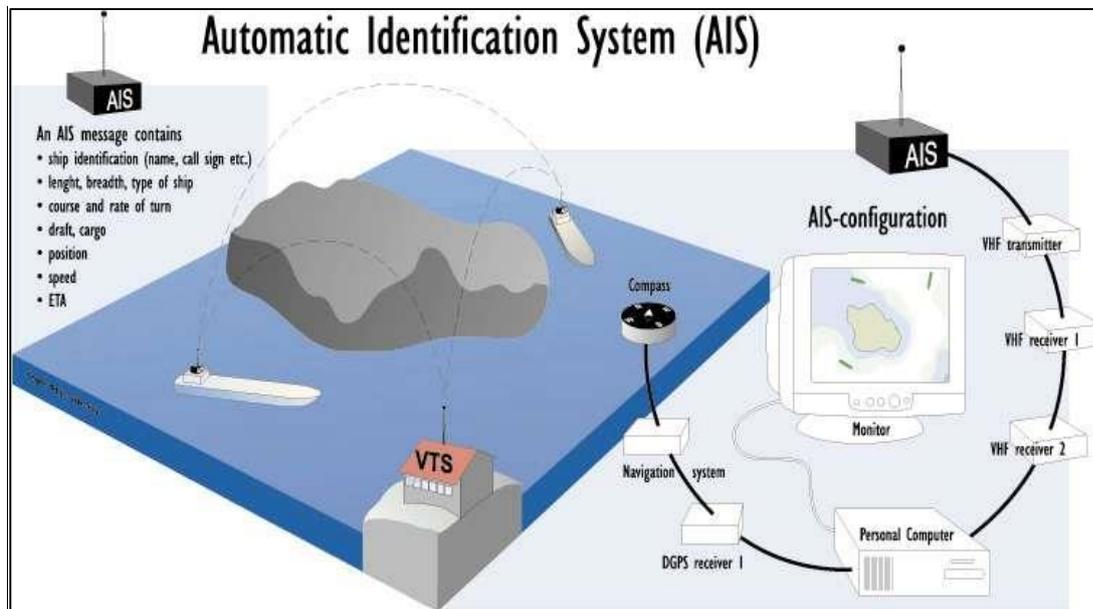


Fig. 4: Fonctionnement de l'AIS
 (Source : shinemicro.com)

L'AIS a été introduit par l'Organisation maritime internationale (OMI) pour améliorer la sécurité maritime et éviter les collisions de navires.

Bien que le VMS et l'AIS soient très différents sur le plan technique, le VMS est parfois utilisé comme un synonyme informel de l'AIS, car les deux peuvent être appliqués à la surveillance et à la navigation maritimes. L'AIS et le VMS sont tous deux des instruments puissants. (Wang and Wang, 2016)

Les suivis des pêcheries industrielles sont généralement basés par l'utilisation des données collectées à partir de VMS ou AIS. Le fonctionnement de ces équipements nécessite principalement d'une source d'énergie permanente à bord et une station de transmission de données à terre auxquelles les acteurs de la petite pêche n'en disposent pas. Dans cette optique, la valorisation d'autres équipements mobiles d'enregistrement de trajets adaptés aux petites embarcations, ouvre une voie d'exploration pour la science halieutique.

Problématique

- Peu de données précises sur la petite pêche

La petite pêche emploie collectivement plus de 230 millions de personnes dans les secteurs direct et indirect (Teh and Sumaila, 2013), et ses prises comestibles rivalisent avec celles de la pêche industrielle (Pauly and Zeller, 2016). La surpêche généralisée a conduit à des engagements internationaux visant à améliorer la durabilité de la pêche artisanale (FAO, 1995) et un appel à la recherche visant à évaluer l'efficacité des méthodes de gestion (Johnson et al., 2013). L'efficacité de la méthode de gestion dépend fortement de la disponibilité des données précises sur l'effort de pêche en tant que l'un des paramètres halieutiques le plus important pour gérer une pêcherie. Ainsi, pour soutenir la gestion durable d'une pêcherie, des informations précises sur l'effort de pêche est primordiale (McCluskey and Lewison, 2008).

Bien que la diminution des captures dans la pêcherie artisanale soit souvent attribuée à l'évolution vers des activités de pêche non durable, il existe peu d'informations à long terme permettant de contextualiser ou de quantifier ces changements (Jennings and Polunin, 1996). Dans de nombreux cas, les trajectoires de la pêche artisanale restent non documentées parce qu'elles impliquent un grand nombre de pêcheurs soit 25 fois plus d'individus que la pêche industrielle (Selgrath et al., 2018). Les pêcheries à petite échelle manquent souvent de données sur le nombre de bateaux, les types d'engins utilisés et les enregistrements des débarquements. Cela rend difficile le calcul de l'effort de pêche et peut remettre en question l'exactitude des résultats obtenus pour ces flottilles.

- Limitation des méthodes d'enquête spatiale

Vu l'absence d'équipement technologique embarqué à bord de pirogue, la caractérisation spatio-temporelle des pêcheries récifales repose généralement sur des enquêtes auprès des pêcheurs (Guillemot et al., 2009; Léopold et al., 2014; Scholz et al., 2011). La plupart de ces travaux sont limités dans le temps et/ou localisés à petite échelle en raison des contraintes méthodologiques des enquêtes,

comme dans le cas du sud-ouest de Madagascar (Brenier, 2009; Mahafina, 2011; Ramahatratra, 2014). En particulier, la localisation et la délimitation des zones de pêche à partir des savoirs locaux (i.e., les toponymes) restent de positions relatives et approximatives (résolution de l'ordre de 1 à plusieurs km²) en l'absence de marqueurs géomorphologiques visuels (Brenier, 2009; Léopold et al., 2014). Habituellement, la méthode d'estimation de l'effort de pêche se fait par la déclaration du pêcheur sur une fiche de suivi au débarquement durant lequel on note à priori la durée de la sortie en mer. Dès lors, cette information est généralement dénommée "l'effort nominal". Cependant, l'effort nominal est quelque chose de plus vague dans la mesure où il peut être vu en définitive comme l'information à partir de laquelle de nombreuses synthèses, dont l'effort effectif, pourront être tirées (Laloë, 1985). Alors que dans une vision de gestion durable des pêches, les informations précises sont plus indispensables que les informations vagues. D'où, on a recours à chercher "l'effort effectif".

- Le suivi de trajectoires des pirogues : un outil prometteur pour la petite pêche ?

Face aux limitations de ces méthodes d'enquête, la disponibilité de dispositifs de géolocalisation (GPS) à faible coût permet depuis peu d'envisager de nouvelles approches spatiales quantitatives basées sur le recueil des données de trajectoires des embarcations de petite pêche (Burgos et al., 2013). Cependant, avec l'avancée technologique, suivre les déplacements des petites embarcations est aujourd'hui possible grâce à l'utilisation de traceurs GPS qui peuvent enregistrer la trajectoire précise de petites embarcations. Ces instruments posent des difficultés logistiques et méthodologiques pour une utilisation à grande échelle dans le cas de petites pêcheries multi-engins et peu équipées, comme les pêcheries récifales. Ainsi, l'estimation précise (quantitative et spatiale) de l'effort de pêche est-il envisageable à partir du suivi de trajectoires des pirogues? Les estimations de pression de pêche exigent en effet des informations précises sur la répartition spatiale de l'effort de pêche car les activités de pêche sont variables à très petite échelle temporelle (i.e., <1 heure) et spatiale (i.e., <1 km). Le suivi de déplacement de bateaux à haute fréquence (enregistrement toutes les cinq secondes) réduit l'incertitude de l'utilisation des données spatiales (Navarrete Forero et al., 2017), mais les cas présentés dans la littérature n'abordent pas le traitement statistique de telles données à haute résolution spatio-temporelle permettant de caractériser spatio-temporellement l'effort de pêche et la production halieutique de poissons récifaux.

Hypothèses et objectifs

La connaissance de la dynamique spatio-temporellement de la pêcherie récifale est importante pour diagnostiquer les enjeux de la gestion durable de ressources exploitées. Pour le cas de la baie de Toliara, cela est conditionnée par l'existence d'une méthode innovante d'analyse de données vu les caractères multi-engins et multi-spécifiques de la pêcherie.

Caractériser une pêcherie considère principalement l'estimation de l'effort de pêche. Ce derniers temps, différentes méthodes ont été développées pour estimer les positions en pêche des trajectoires des bateaux, par exemple l'identification des limites de vitesse correspondant à l'évènement pêche par une classification hiérarchique automatique (Le Guyader et al., 2016) et la discrimination entre les différents états comportementaux d'une sortie de pêche par le modèle hiérarchique bayésien en utilisant le processus de Markov caché (Vermard et al., 2010).

L'utilisation de système de géolocalisation (traceur GPS mobile) sur les suivis des pêcheries artisanales s'est développée. Ainsi, pour les petites embarcations artisanales (sans source d'énergie), des défis techniques et logistiques sont nécessaires pour pouvoir faire fonctionner le système.

Le suivi des trajectoires de pirogues à l'aide de traceur GPS est-il un déterminant pour la cartographie précise des activités de la petite pêche en milieu récifal ? Telle est la principale question posée. Citons comme une hypothèse 1 que le traceur GPS améliore la connaissance de déplacements et fréquentations de pirogues traditionnelles à voile dans la zone qui sont des informations cruciales pour diagnostiquer les activités de pêche, comme dans l'utilisation du VMS ou AIS. Face aux difficultés de collecte de données quantitatives et à grande échelle dans la pêcherie récifale, le suivi de pirogues par le traceur GPS pourrait donner de nouvelles issues. Depuis l'apparition de la technologie de géolocalisation, l'étude sur l'écologie de mouvement a bien développé.

Une attention particulière concerne l'exploration de la méthode d'analyse automatique permettant de classifier les évènements pêche et non-pêche des pirogues par rapport aux nombreux engins de pêche utilisés. « L'évènement pêche » correspond à l'action de pêche proprement dite (effort effectif) où l'engin de pêche est dans l'eau ; tandis que « l'évènement non-pêche » correspond à l'action de déplacement de la pirogue ou de préparation des engins à bord. Cette classification s'ajoute à l'application du programme de suivi et de la méthode à grande échelle spatio-temporelle (couvrant toute la baie et pendant un an).

L'effort de pêche est une mesure de l'ensemble des moyens de capture mis en œuvre par les pêcheurs sur un stock, pendant un intervalle de temps déterminé (Laurec and Le Guen, 1981). Dans ce travail, l'effort de pêche effectif a été défini comme la durée en heure uniquement de « l'évènement pêche » réalisé par les pêcheurs (selon les engins) dans la zone.

Le suivi des déplacements des pirogues à haute fréquence grâce à de petits GPS embarqués permettra d'apporter une connaissance inédite sur la pression de pêche effective sur le Grand Récif de Toliara (GRT), et plus généralement dans les écosystèmes coralliens du sud-ouest de Madagascar. L'hypothèse 2 est que l'intensité de l'effort de pêche et la zone de production halieutique dans la baie de Toliara se répartit en fonction des engins ou des villages. Le nombre de pirogue et de pêcheurs par engin ou par village déterminent la pression de pêche et la production halieutique. Aussi, plusieurs facteurs d'ordre

environnemental, social et écologique sont à considérer si on veut connaître les caractéristiques de l'effort de pêche et des captures.

En effet, à notre connaissance, c'est une première étude en milieu récifal des trajectoires de pêche, qui y sont particulièrement complexes par rapport aux pêcheries artisanales européennes (embarcation motorisée, utilisation engin unique, Système d'Information Halieutique opérationnel,...). Les résultats seront comparés aux données historiques connues sur le GRT et à la littérature disponible sur les écosystèmes coralliens (Newton et al., 2007) pour actualiser le diagnostic des enjeux pour la durabilité de la pêche dans la baie de Toliara.

Dans ce sens, la présente étude a pour objectifs de :

- Identifier les caractéristiques de trajectoires des pirogues pour une automatisation de méthodes d'analyse quantitative et spatiale de données de trajectoires des pirogues à voile
- Caractériser à fine échelle la dynamique spatiale et temporelle de la pêche récifale (multi-engins et multi-spécifiques) de la baie de Toliara

Par rapport à ces objectifs, le présent travail se structurera en trois chapitres de la manière suivante :

- La première chapitre développe la méthode d'identification automatique des évènements pêche et non-pêche des pirogues ;
- La deuxième chapitre montre la caractérisation spatio-temporelle de l'effort de pêche en appliquant la prédiction automatique des activités de pêche durant la sortie en mer ; et
- La troisième et dernière chapitre présente la caractérisation spatio-temporelle de la production halieutique de la baie en couplant les données GPS avec les données de suivi des captures.

Enfin, le manuscrit se termine par une discussion suivie d'une conclusion synthétisant les principaux résultats et les perspectives.

METHODES GENERALES

Zone d'étude

Située dans le Canal de Mozambique, dans le sud-ouest de Madagascar, la baie de Toliara se trouve entre les fleuves Fiherenana au nord et Onilahy au sud. Du point de vue géomorphologique, elle comprend plusieurs unités récifales comme : terrasse peu profonde, lagon, passes, bancs coralliens, récifs internes, récifs externes et la zone au large (Pichon, 1978; Harris, 2010; Andréfouët, 2012). Les récifs externes sont composés du Grand Récif de Toliara et de Nosy Tafara en face du village de Sarodrano. Du sud au nord, on distingue trois récifs internes tels que : Beloza, Dimadimatsy et Norinkazo. Au nord de ces récifs internes, la partie médiane de la baie de Toliara, est occupée par deux bancs coralliens dont Ankilibe et Mareana.

La baie de Toliara est matérialisée par la présence du Grand Récif de Toliara ayant une longueur de 18 km et une largeur variant entre 950 et 3 000 m (Pichon, 1978; Harmelin-Vivien, 1979; Ranaivomanana, 2006; Harris, 2010). Un lagon peu profond sépare le Grand Récif de Toliara de la côte. La profondeur de ce lagon ne dépasse pas 10 m à l'exception des deux passes (Harmelin-Vivien, 1979a) Notons également qu'il existe de la mangrove dans le sud, dans la partie médiane et dans le nord de la baie avec une superficie totale de 4 km².

La baie de Toliara est la principale zone de pêche pour l'exploitation de ressources récifales avec plus de 1 900 pirogues (Brenier et al., 2012). La baie est située à proximité de la zone urbaine de Toliara, principal foyer de population de la région sud-ouest avec plus de 326 000 habitants (INSTAT, 2018). Le littoral de la baie est bordé par huit villages de pêcheurs : Sarodrano, Ankilibe, Ankiembe-haut, Mahavatse 1, Ankiembe-bas, Mahavatse 2, Besakoa et Ambohitsabo (Fig. 5). Administrativement, ces deux premiers villages (au sud) sont rattachés à la Commune Rurale de St Augustin (District Toliara II) ; tandis que les six autres villages (au nord) rattachés à la Commune Urbaine de Toliara (District Toliara I), tous appartiennent à la Région Atsimo Andrefana de Madagascar.

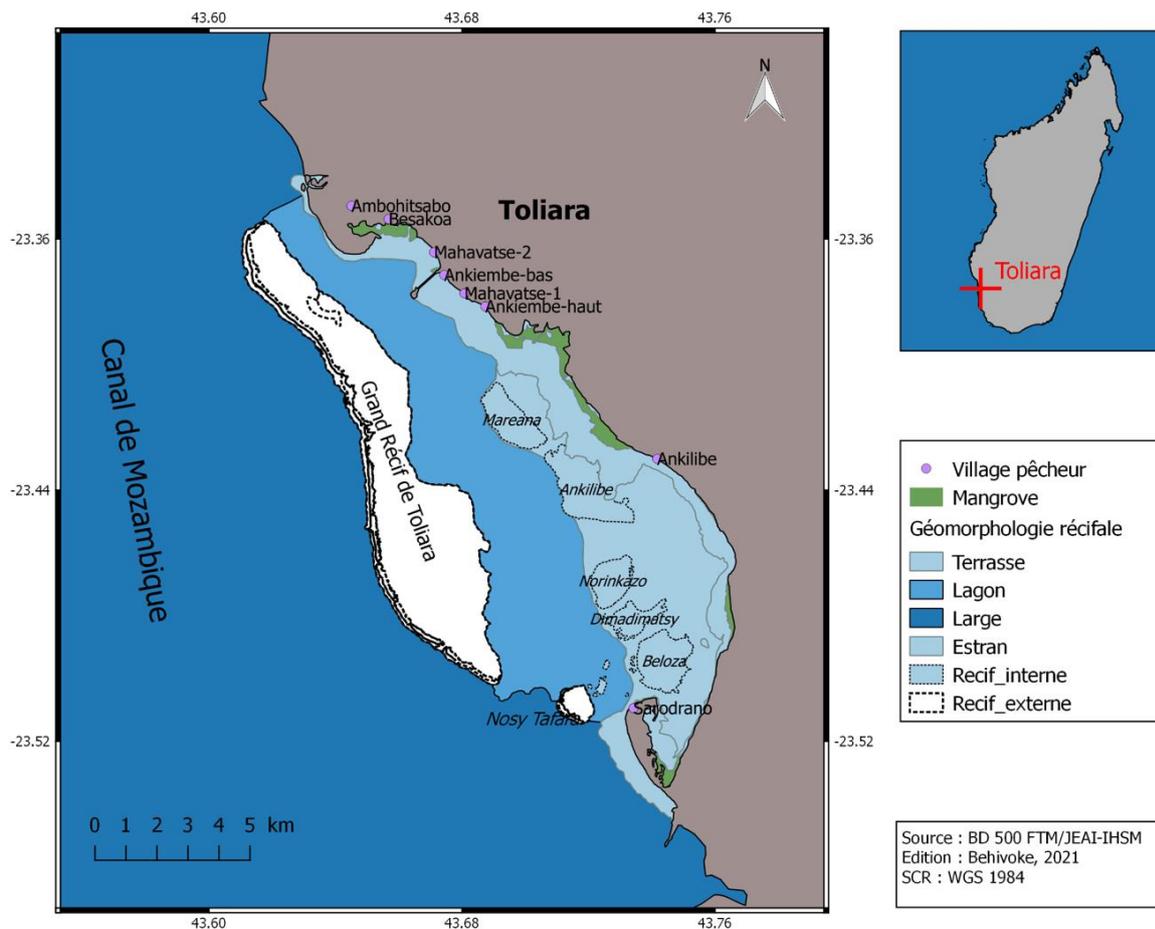


Fig. 5: Localisation de la zone d'étude

Les petits pêcheurs dépendent étroitement de l'exploitation des ressources halieutiques pour leur subsistance et leur revenu. Ils opèrent à bord de pirogues monoxyles à balancier à voile et utilisent différents engins de pêche (senne de plage, chalut à moustiquaire, filet maillant, ligne de fond, traîne, fusil-harpon, pêche à pied, ...).

La baie de Toliara dispose d'un grand nombre de ressources vivantes. Elle se caractérise par sa grande diversité ichthyologique avec 714 espèces de poissons récifaux recensées dans la zone (Harmelin-Vivien, 1979b; Rasoarimalala, 2001).

La baie de Toliara est considérée comme surexploitée par la pêche locale (Brenier, 2009) et elle présente une diminution de biomasse (observée en plongée) qui est due essentiellement à l'augmentation de la pression de pêche sur le récif (Mahafina, 2011; Ramahatratra, 2014)

Depuis les années 1960, les recherches sur le GRT se sont focalisées notamment sur la géomorphologie (Pichon, 1978) et les communautés de poissons (Harmelin-Vivien, 1979b). C'est à partir des années 1990 que l'étude sur la pêche récifale a commencé de prendre de l'ampleur. Les captures très diversifiées sont composées de poissons, crevettes, crabes, coquillages, poulpes, holothuries et gonades d'oursin (Vasseur, 1988). Par rapport à d'autres ressources, les poissons sont les plus ciblés par la pêche et les plus convoités par les consommateurs de Toliara.

Ces travaux de recherche sur la pêche comportent cependant un certain nombre de lacunes. D'une part, la dynamique intra-annuelle de la pêche récifale n'est pas bien connue à ce jour, car la plupart des travaux sont limités à des études ponctuelles dans le temps et/ou localisées (Rakotoarinivo, 1998; Mahatante, 2008; Brenier, 2009; Ramahatratra, 2014). Mais ces nombreux résultats scientifiques serviront de base de comparaison par rapport aux données obtenues par cette présente étude. En outre, on constate que la pêche à partir des trois villages (Mahavatse 2, Besakoa et Ambohitsabo) du secteur nord de la ville de Toliara n'est généralement pas étudiée. Pourtant, elle concerne le même système récifal exploité par les pêcheurs des autres villages de la baie de Toliara. D'autre part, les données spatiales sur la petite pêche sont relativement peu précises ce qui rend difficiles les analyses quantitatives spatialisées (Brenier, 2009).

La pêche de la baie de Toliara a été déjà décrite par Laroche and Ramananarivo (1995), montrant le niveau global de l'effort de pêche et du rendement estimé à $12t/km^2/an$, il y a plus de 20 ans. Ainsi, il s'avère primordial de caractériser spatio-temporellement les activités de pêche dans la baie de Toliara en utilisant les nouvelles technologies existantes et de mettre à jour les informations halieutiques disponibles sur les poissons récifaux de la baie.

Le choix de la zone d'étude a été également basé sur la spécificité du système pêche de la baie dont les activités des pêcheurs ne dépassent généralement pas les limites naturelles (embouchures des

deux fleuves : Fiherenana et Onilahy). Ainsi, on peut dire que c'est un système pêche fermé où l'étude quantitative et spatiale des déplacements de pirogues trouve son importance en halieutique.

Embarcation et engins de pêche

La pêche se fait généralement à bord d'une pirogue monoxyle, à balancier, à voile avec des pagaies, appelée localement « pirogue Vezo » qui est est typique de la région du sud-ouest de Madagascar. C'est une pirogue monoxyle à balancier, mue à la pagaie ou à la voile carrée (Faublée, 1975) (Fig. 6).



Fig. 6: Pirogue monoxyle à balancier

La coque brute de la pirogue est faite en bois d'Euphorbiacée : *Givotia madagascariensis* (*farafatse*) qui provient de la région autour du fleuve Mangoky : Beroroha, Manja et Morombe. La partie supérieure de la pirogue provient de la réhabilitation des anciennes coques abandonnées. Le support du balancier et les mâts sont en bois de palétuviers : *Rhizophora sp* (*tanga*), *Sonneratia alba* (*songery*) ou en bois long comme Filaos (*akao*). Le fond externe est peint avec deux ou trois couches de goudron chauffé et mélangé avec des gommes d'Euphorbiacée : *Euphorbia stenoclada* (*famata*) afin de résister au frottement de la mer, au choc éventuel du récif et à l'attaque des insectes xylophages sur la coque, et pour renforcer l'imperméabilité. Les autres peintures sont purement décoratives au gré du propriétaire (Ramanatsialonina, 1988) . Chaque famille peut réaliser la finition, la réparation et l'entretien de la pirogue. Selon leurs dimensions, on distingue : i) les pirogues de tailles inférieures à 3 m réservées pour la pêche à la ligne et pour les femmes (collectes des mollusques, des poulpes et d'oursins); ii) les pirogues de pêche aux filets qui sont de taille moyenne comprise entre 4 et 6,5m, avec une charge utile de 300 kg à 600 kg ; et iii) les grandes pirogues de transport de marchandises et de voyageurs avec une longueur totale de 7 m à 8 m et une capacité d'une tonne (Tovondrainy, 2004).

A Madagascar, la petite pêche n'utilise que des pirogues traditionnelles non motorisées de 3 à 8 m de long, dotées d'un seul balancier et d'une voile carrée, et dans la plupart des cas, pratiquant trois

méthodes de pêche dont : la pêche à la ligne, pêche au filet et la pêche à la senne (Laroche and Ramananarivo, 1995). Et, le terme pêche traditionnelle désigne la pêche non motorisée, de pratique ancestrale, à des fins de subsistance ou pour les marchés locaux (Mathew, 2001 ; Grenier, 2013). Auparavant, le terme “pêche traditionnelle” a été mentionné dans un texte législatif (Ordonnance n°93-022 du 04/05/95), mais désormais remplacé par le terme “petite pêche”.

En effet, la pêche récifale fait partie intégrante de la catégorie de la petite pêche. Ainsi, elle est multi-engins, multi-technique (pour un même engin), et multi-spécifique (espèces ciblées), mais également multi-objectifs du fait de la diversité des raisons (nutritionnelles, économiques et socio-culturelles) des pêcheurs d’aller en mer. on peut donc définir la pêche récifale est une activité de pêche dans des zones côtières à l’aide des embarcations traditionnelles, multi-engins, multi-techniques, multi-spécifiques et multi-objectifs, développée pour répondre aux besoins alimentaires et financiers des acteurs de la filière.

Selon la législation malagasy (Loi n°2015-053 du 02/12/15 portant le Code de la pêche et de l’aquaculture et le Décret n°2016-1492 du 06/12/16 portant la réorganisation générale des activités de pêche maritime), il existe trois subdivisions de catégories de pêche commerciale tels que :

- Petite pêche : activité de pêche réservée aux personnes physiques, pratiquée dans les eaux sous juridiction malagasy à l’aide d’embarcations motorisées, dont la puissance totale du moteur est inférieure à 15 CV, d’embarcations non motorisées ou à pied.
- Pêche artisanale : activité de pêche utilisant des navires pontés ou non-pontés, dont la puissance totale du moteur est comprise entre 15 CV et 50 CV maximum.
- Pêche industrielle : activité de pêche utilisant des navires motorisés dont la puissance totale du moteur dépasse 50 CV.

Sur la côte sud-ouest de Madagascar, des pirogues de 3 mètres de long sont généralement utilisées par un homme pratiquant la pêche à la ligne ou la pêche en plongée en apnée. Des pirogues de 4 à 8 mètres de long sont généralement utilisées par deux à quatre hommes pratiquant la pêche aux filets maillants, ou au moins trois personnes pratiquant la pêche à la senne ou le filet à moustiquaire.

Différents engins et techniques de pêche sont utilisés par les pêcheurs Vezo dans le sud-ouest de Madagascar(Rejela, 1993), certains détails sont décrits par Tovondrainy (2004) et leurs évolutions sont développées par Angin, (2007). Le Vezo est un peuple entièrement tourné vers la mer et généralement installé dans le sud-ouest de Madagascar (Rejela, 1993).

Les pêcheurs Vezo sont de nomades et la pêche traditionnelle constitue leur activité principale soit pour l’autosubsistance soit pour le revenu. Ils utilisent de variétés d’engins et techniques de pêche pour chercher leurs espèces cibles au niveau de l’écosystème récifal.

Dans la baie de Toliara, les pêcheurs utilisent des engins de pêche très variés dont les plus pratiqués sont : le filet maillant, la ligne à main, la senne de plage, le fusil-harpon et le chalut à moustiquaire (ou

senne de fond). Notons que ces engins sont utilisés pour cibler les poissons récifaux. Ainsi, la description des engins et le déroulement des opérations de pêches sont décrits ci-après:

- **Filet maillant**

C'est un filet en mono filament. La dimension est très variable d'un pêcheur à l'autre. En général, d'après la collecte de données réalisée, la longueur varie de 100 à 800 m tandis que la chute est presque standard de 1 à 2 m. En général, c'est un assemblage de plusieurs de rouleaux de filet (100 m) ce qui rend les mailles différentes (20 à 55 mm). Le filet est aussi muni de deux ralingues dont celle supérieure supporte le flotteur (en bois léger ou en caoutchouc) et celle inférieure où se fixe le lest (en plomb ou en boulette de ciment).

Le filet maillant (Gillnet) est connu localement sous le nom de *Harato*. Selon la classification statistique internationale type des engins de pêche (CSITEP), son abréviation standard est : GN.

Le filet maillant est généralement utilisé pour pêcher au niveau du lagon ou des pentes récifales. En identifiant des bancs de poissons, les pêcheurs créent des bruits (obstacles sonores) en tapant la coque de la pirogue ou la surface de l'eau avec le *Tehy* (mât de la voile) au cours duquel le filet est mis dans l'eau en encerclant la zone ciblée (Fig. 7).



Fig. 7: Filet maillant (A), Pêche encerclant (B)

Une autre variante de cette technique consiste à encercler une patate de récif ou un massif corallien en poussant le filet vers la profondeur. Des manœuvres en apnée sont ensuite nécessaires pour fermer le filet tout en perturbant les crevasses de récif afin que les poissons sortent de leurs habitats. Progressivement, le filet est remonté, les poissons maillés sont détachés et mis dans la pirogue. Toujours en utilisant le filet maillant, le pêcheur exerce aussi la technique de barrage (*mananjake*). Il suffit de mettre le filet au niveau de passes ou fausses passes durant la marée descendante et le pêcheur le récupère après lors de la marée basse.

- Chalut à moustiquaire

La grande partie de l'engin est faite en moustiquaire, et l'engin est constitué d'un corps et d'une poche centrale et de deux « ailes » dont la conception générale rappelle en bien des points celle du chalut. Les deux ailes permettent de rabattre les espèces capturées dans la poche centrale et de remonter le filet à bord de la pirogue. Le Haut du filet comporte une ralingue munie de flotteurs qui sont fabriqués avec des morceaux de bois légers ou des sandales usagées ; les flotteurs sont disposés à raison de quatre à cinq pièces par mètre. La partie inférieure du chalut est lestée : elle est parcourue d'une corde sur laquelle sont attachés des lests de coquillages lourds comme celui de gastéropodes de l'espèce *Anadara sp.* La largeur de la poche varie entre 0.7 et 3 m. La longueur de la poche varie entre 3 et 10 m. La longueur des ailes est comprise entre 5 et 28 m, et la longueur du filet entre 12 et 56 m (Volandrae, 2019 ; Herinirina, 2019).

Le chalut à moustiquaire (mosquito trawl net) est connu localement sous le nom de *draotsy*. Selon la CSITEP, il est parmi la catégorie d'engins chalut de fond (non spécifié), son abréviation standard est de : TB.

A la manière d'un chalut classique, Il est mis à l'eau de manière à assurer le plus grand rabattage possible vers l'ouverture de la poche (Fig. 8).



Fig. 8: Chalut à moustiquaire (A), Traction du filet (B)

Durant la marée descendante, le pêcheur met le filet dans l'eau au moment où la pirogue fait un itinéraire en arc. Toujours dans l'eau, les cordes des deux bouts du filet sont tractées par deux pêcheurs au moment où la profondeur est déjà faible (1 m environ). La traction à pied du filet continue en le rétrécissant progressivement afin de le rapprocher de la poche moustiquaire (zone de convergence des prises).

- **Senne de plage**

C'est un filet généralement en nylon, de longueur et de chute variables allant respectivement de 100 à 1200 m et de 2 à 8 m. La maille est très petite (10 à 15 mm). Il est muni d'une poche moustiquaire ayant une longueur de 4 à 10 m et de hauteur de 2 à 10 m. Les deux bouts du filet sont munis de cordes de 50 à 800 m de longueur. Comme sur le chalut à moustiquaire, les flotteurs utilisés sont de bois légers ou de caoutchouc de morceaux de sandales, et les lests sont généralement constitués par des coquilles de gastéropodes comme le *Strombus sp* ou *Trochus sp*.

La senne de plage (beach seine) est connue localement sous le nom de *tarikaky*. Selon la CSITEP, son abréviation standard est : SB.

L'action de pêche se passe dans le lagon exempt d'obstacles pour le filet (Fig. 9).



Fig. 9: Senne de plage (A), Halage du filet (B)

Au moins 4 personnes sont nécessaires dont l'un tient le bout de la corde du filet sur la plage et les trois autres rament la pirogue vers la zone peu profonde du lagon. Ensuite, ils font un itinéraire en arc tout en immergeant le filet. Après, ils repartent vers la plage pour déployer le second bout de la corde. Le halage de la corde peut durer plusieurs heures durant lesquelles les pêcheurs tirent lentement les deux bouts de la corde sur la plage. Lorsque le filet est proche du rivage, le halage du filet continue jusqu'à atteindre la poche moustiquaire pour récupérer les prises et les mettre dans la pirogue.

- **Ligne à main**

La ligne à main est composée d'un fil mono filament dont à l'extrémité se trouvent les hameçons (de différentes tailles) et d'un plomb qui joue le rôle de stabilisateur (Fig. 10). Les appâts utilisés sont très variés selon les espèces ciblées.

Appelé localement *vinta* ou *firango*, la ligne à main (handline) est connu dans la CSITEP sous le nom de LHP comme abréviation standard.

La pêche à la ligne se déroule dans le lagon ou au niveau des pentes récifales. En partant du village vers une zone jugée poissonneuse (selon la connaissance écologique traditionnelle), le pêcheur y ancre sa pirogue et lance dans l'eau sa ligne au bout de laquelle sont attachés des hameçons appâtés avec des morceaux de poissons ou de crustacés. Si un poisson est capturé, il suffit de remonter la ligne et de le récupérer.



Fig. 10: Hameçons (A), Pêche à la ligne (B)

Durant une sortie, le pêcheur change d'un endroit à l'autre, à plusieurs reprises, pour chercher des zones poissonneuses.

- **Fusil-harpon**

Le fusil-harpon est engin de chasse sous-marine. C'est comme une arbalète dont le matériau peut-être moderne ou artisanal (Fig. 11).



Fig. 11: Fusil-harpon

Du fait de la cherté du modèle moderne (environ 400 000 Ariary), généralement, c'est le fusil-harpon artisanal qui est très répandu. Il est fabriqué par les pêcheurs eux-mêmes dont le fût et la crosse sont en bois. La flèche (environ 1 m) est confectionnée à partir d'un morceau de fer rond (de 6 ou 8 mm). Le sandow (tendeur) est réalisé à l'aide d'une matière élastique comme la bande d'une jante de roue de véhicule.

Le fusil-harpon (spear gun) est connu localement sous le nom de *basim-pia*. Selon la CSITEP, son abréviation standard est : HAR.

Dans le contexte de la pêche récifale du sud-ouest de Madagascar, le harpon (appelé localement *voloso*) désigne techniquement une lance éventuellement propulsée à la main (sans l'aide d'élastique), et il sous-entend directement l'engin de la pêche à pied pour chercher les poulpes. Le terme courant pour l'engin utilisé pour harponner les poissons en apnée (avec une flèche propulsée par un élastique est "fusil à poissons" (*basim-pia*), dont le diminutif est "fusil". Ce terme ne figure cependant pas dans la classification internationale des types d'engins. Ainsi, afin de respecter le terme technique universel et de considérer le terme local couramment utilisé, on a utilisé par convention le terme "fusil-harpon" pour désigner cet engin dans notre étude.

Le fusil-harpon est un engin utilisé pour la pêche à la plongée en apnée. En faisant de petits déplacements, à bord de la pirogue, le plongeur peut observer (à l'aide d'un masque) et chercher ses cibles le long de son itinéraire. Dès qu'une cible est identifiée, le plongeur la vise directement et la ramène dans la pirogue. Une autre variante de la technique consiste à stabiliser la pirogue par une ancre ou par une pagaie (2ème personne à bord), pour permettre au plongeur de chercher des cibles dans les environs.

Outil d'enregistrement de trajectoires : le traceur GPS

Deux modèles de traceur GPS mobiles ont été utilisés dont : i-gotU GT 600 et le CatLog Gen2. Ce sont des modèles disponibles sur le marché. Tous exportés d'Europe, leurs coûts d'achats respectifs sont : 46 Euros et 94 Euros.

Le modèle i-gotU (Fig. 12) peut enregistrer 262 000 positions. Il dispose de deux leds (allumage et détection satellite). Il est muni d'une interface USB pour le connecter à un ordinateur, le paramétrer et télécharger les données par le logiciel spécifique *atrip driver*.



Fig. 12: Traceur GPS i-gotU (A), GPS i-gotU branché à un power bank à incorporer dans un boîtier artisanal (B)

L'i-gotU dispose d'une batterie interne de 750 mA. Un accumulateur de type commercial (*power bank*) d'une capacité de 50 000 mA a été utilisé pour augmenter l'autonomie du GPS et celui-ci a été mis dans un boîtier artisanal en tuyau PVC afin d'assurer l'étanchéité de l'appareil durant la sortie en mer.

Le modèle CatLog (Fig. 13) dispose des mêmes fonctionnalités et il est doté d'un boîtier plastique original pour protéger l'appareil contre le choc et l'humidité.

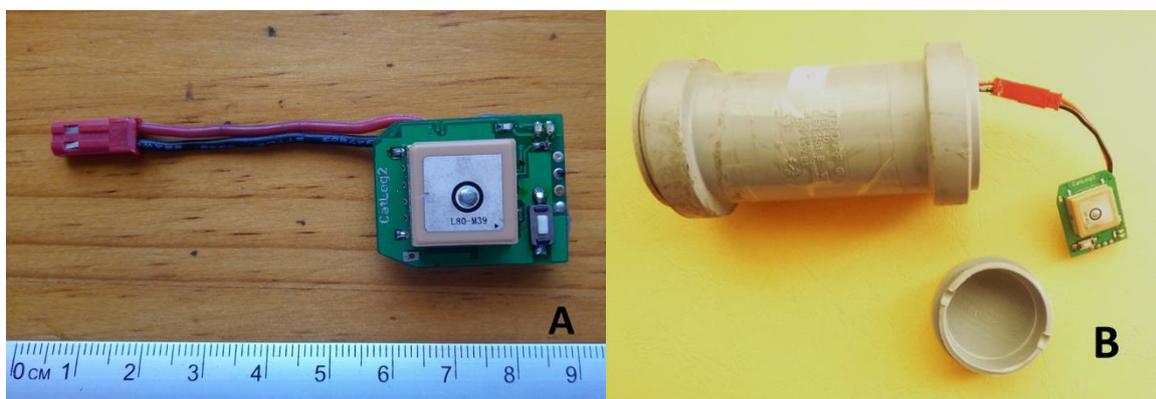


Fig. 13: Traceur GPS CatLog (A), GPS CatLog branché à une batterie incorporée dans un boîtier original (B)

Le traceur GPS CatLog peut enregistrer jusqu'à 400 000 points et il dispose d'une batterie ayant une charge suffisante de 3000 mA. Celui-ci est plus pratique et performant que l'i-gotU. Le logiciel de paramétrage et de décharge de données est le : *CatLog GPS Control Center*.

Etude trajectométrique des pirogues

La cartographie des principaux indicateurs halieutiques (effort de pêche, captures et zone de pêches) nécessite que les opérations de pêche à chaque sortie en mer des pirogues soient bien identifiées

préalablement sur les trajectoires GPS. Du fait de la complexité et du grand nombre de pirogues de la pêcherie récifale dans la baie de Toliara, un modèle de prédiction a été explorée afin d'identifier automatiquement les catégories et le déroulement des opérations de pêche d'une sortie selon les types d'engins.

Des trajectoires ont été observées (à bord et sous SIG) pour servir à la calibration et à la validation du modèle d'apprentissage utilisé. Les observateurs à bord peuvent fournir des observations directes des activités des navires pendant les sorties de pêche, ce qui permet de valider et d'estimer la qualité du modèle (Walker and Bez, 2010). Les trajectoires observées sont nécessaires afin de déterminer les évènements de pêche des pirogues équipées de GPS et ils sont considérés comme des trajectoires de références. Les caractéristiques des trajectoires des évènements de pêche des pirogues sont différentes selon les engins. Les évènements pêche comprennent les opérations pendant lesquelles au moins une partie des engins est immergée tandis que les évènements non liés à la pêche comprennent généralement : le déplacement du village vers le lieu de pêche (et le trajet retour), la préparation de l'engin et le déplacement (recherche) vers un autre site de pêche. La transcription des évènements de pêche durant une sortie a été classée par « état détaillé » et « état agrégé ». Les différents classements des évènements observés à bord lors d'une sortie de pêche par engin sont détaillés dans le Tableau 1.

Tableau 1: Classement des évènements de pêche observés lors d'une sortie en mer par type d'engin

Filet maillant_Etats détaillés (10)	Filet maillant_Etats agrégés (2)
Départ vers le site	Non pêche
Installation voile	Non pêche
Désinstallation voile	Non pêche
Attente avant la pose filet	Non pêche
Recherche bon endroit	Non pêche
Pose filet	Pêche
Pousser filet (en apnée)	Pêche
Remonter filet	Pêche
Déplacement autre site	Non pêche
Retour vers village	Non pêche

Ligne à main_Etats détaillés (7)	Ligne à main_Etats agrégés (2)
Départ vers le site	Non pêche
Installation voile	Non pêche
Désinstallation voile	Non pêche

Recherche bon endroit	Non pêche
Actions de pêche	Pêche
Déplacement vers autre site	Non pêche
Route vers village	Non pêche

Fusil harpon_Etats détaillés (7)	Fusil harpon_Etats agrégés (2)
Départ vers le site	Non pêche
Installation voile	Non pêche
Désinstallation voile	Non pêche
Recherche bon endroit	Non pêche
Plongée de pêche	Pêche
Déplacement vers autre site	Non pêche
Route vers village	Non pêche

Chalut à moustiquaire_Etats détaillés (11)	Chalut à moustiquaire_Etats agrégés (2)
Départ vers le site	Non pêche
Installation voile	Non pêche
Désinstallation voile	Non pêche
Attente avant la pose filet	Non pêche
Recherche bon endroit	Non pêche
Pose filet	Pêche
Tirer filet	Pêche
Collecte captures	Pêche
Remonter filet	Pêche
Déplacement vers autre site	Non pêche
Route vers village	Non pêche

Senne de plage_Etats détaillés (12)	Senne de plage_Etats agrégés (2)
Départ vers le site	Non pêche
Installation voile	Non pêche
Désinstallation voile	Non pêche
Attente avant la pose senne	Non pêche
Recherche bon endroit	Non pêche
Pose senne	Pêche
Trait senne	Pêche
Décrochage senne du récif	Pêche
Collecte captures	Pêche
Remonter senne	Pêche
Déplacement vers autre site	Non pêche
Route vers village	Non pêche

Les « états détaillés » correspondent aux activités effectuées par les pêcheurs durant la sortie en mer pendant une période donnée. Ils se regroupent dans les « états agrégés pêche », s’il existe une relation directe avec les captures de poissons et se regroupent dans les « états agrégés non-pêche » dans le cas contraire (Randriantsara, 2018).

Un modèle d'apprentissage de classification supervisée par forêt aléatoire a été appliqué sur les données préliminaires collectées en début des années 2017 et 2018 pour tester et valider le modèle d'apprentissage. Des covariables dérivées de la trajectoire ont été créées pour prédire correctement "l'état pêche" et "l'état non-pêche". En utilisant le modèle d'apprentissage, l'algorithme peut détecter les événements de pêche qui ont été formés. Ainsi, grâce au logiciel R (statistique), Postgres (Système de Gestion de Base de Données Relationnelle) et Postgis (SIG) on peut estimer dans le temps et dans l'espace les indicateurs halieutiques (effort, captures et zone de pêche) et qu'on veut analyser. Ensuite, la méthode de classification (déjà validée) a été appliquée à un cas réel sur l'ensemble de jeu de données issues d'une centaine de pirogues pendant 12 mois consécutifs à partir de mai 2018 jusqu'à avril 2019.

Toutes les démarches ont synthétisés dans le schéma de flux ci-après :

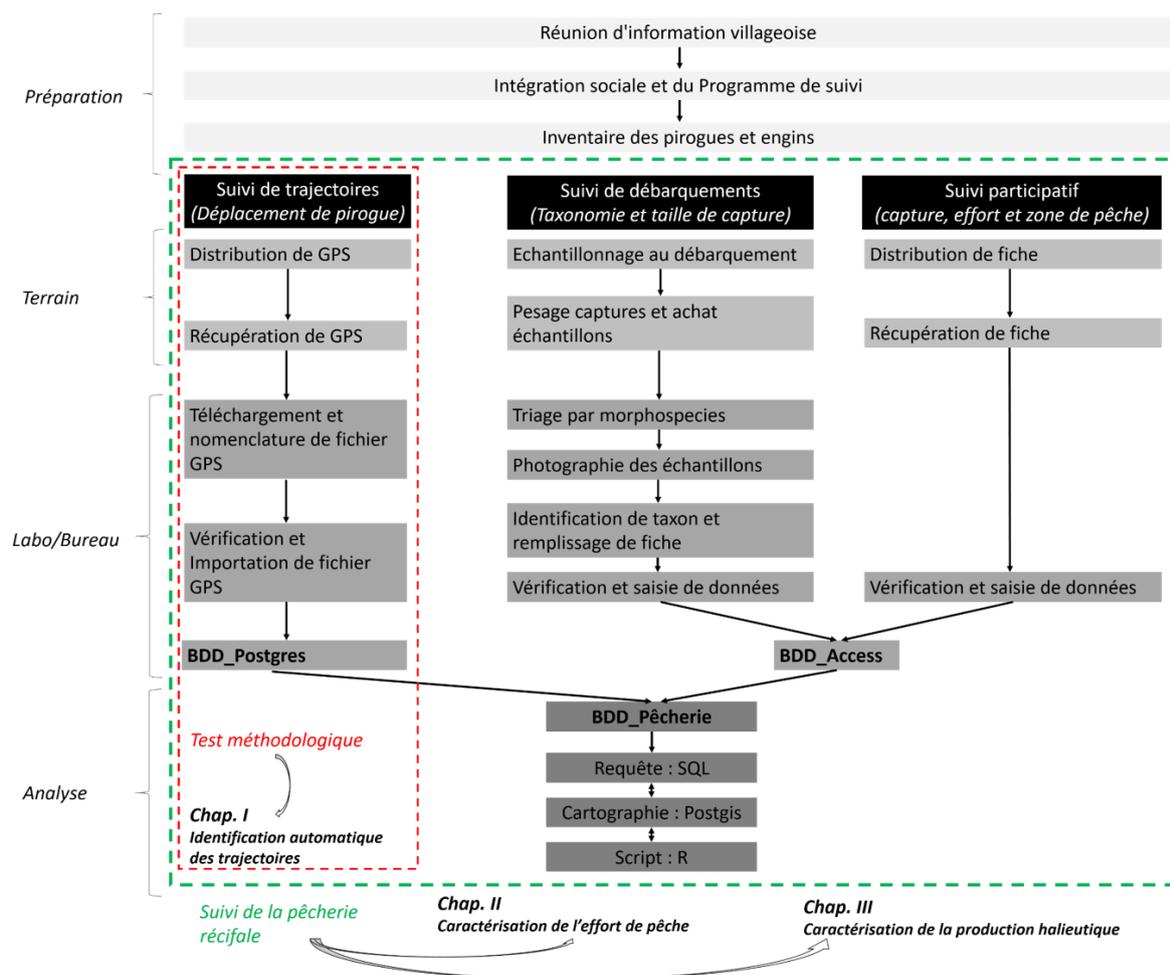


Fig. 14: Etapes méthodologiques

Chapitre I. IDENTIFICATION AUTOMATIQUE DES EVENEMENTS PECHE DES PIROGUES

1.1. Introduction

Des informations quantitatives et spatiales précises sur l'utilisation des engins de pêche sont indispensables non seulement pour évaluer la durabilité des pêcheries et leur impact sur l'environnement marin, mais aussi pour soutenir la réglementation de captures par zone de pêche (Wilén, 2004; McCluskey and Lewison, 2008). Pour étudier la dynamique spatio-temporelle du comportement des pêcheurs suivant les engins de pêche utilisés, la recherche halieutique a profité d'une manière opportune des systèmes de surveillance en temps réel des grands navires de pêche, à savoir le VMS et l'AIS. Ces systèmes enregistrent la position des bateaux à intervalles de temps réguliers (habituellement de 30 minutes à 2 heures) pour la plupart des pêcheries industrielles dans le monde.

Au cours de la dernière décennie, la caractérisation des allures spatiales de trajet des bateaux de pêche industrielle a été bien établie grâce aux technologies de la géolocalisation de trajectoire. Les données de localisation sont traitées automatiquement par trois types d'outils d'analyses : i) des méthodes de discrimination basées sur le seuil de vitesse du bateau (Lee et al., 2010; De Souza et al., 2016; Le Guyader et al., 2017), ii) des méthodes de segmentation comprenant des modèles espace-état (Vermard et al., 2010; Walker and Bez, 2010; Peel and Good, 2011; Gloaguen et al., 2015), et iii) des algorithmes d'apprentissage automatique comprenant des réseaux de neurones et des forêts aléatoires (Russo et al., 2011 ; Joo et al., 2013) lorsque les données de mouvements de comportements de bateaux ont été enregistrées simultanément. Ces méthodes d'analyses permettent de segmenter un grand nombre de trajectoires de navires en événements pêche et non-pêche selon les critères comportementaux de mouvements du bateau (par exemple, sa vitesse et sa direction), ce qui permet de quantifier et de localiser la capture pendant les sorties de pêche à haute résolution spatiale (<100 m) et à l'échelle temporelle (<1heure). Des cartes précises des indicateurs de l'effort de pêche (notamment, le nombre d'heures de pêche par unité de surface) peuvent ensuite être produites dans ces pêcheries industrielles pour estimer la distribution spatiale de la pression de pêche suivant les types d'engins ainsi que la capture par unité d'effort (CPUE) avec plus de précision.

Cependant, pour la petite pêche, l'insuffisance des données numériques spatiales est un problème récurrent car le VMS et l'AIS ont peu d'applicabilité dans la pêche traditionnelle des pays en voie de développement. Cela est dû principalement aux coûts d'utilisation et de maintenance très élevés de ces systèmes. Outre, cela est dû également à la faible capacité technologique des petites embarcations dont la plus remarquable est l'absence de source d'énergie permanente à bord. Par conséquent, les mouvements des pêcheurs ont été peu étudiés pour estimer et cartographier l'effort de pêche dans la petite pêche, tandis que des indicateurs spatiaux de l'effort de pêche ont été clairement proposés (Daw, 2008; Stewart et al., 2010).

D'une manière sporadique, les dispositifs de géolocalisation (GPS) ont été utilisés pour cartographier des lieux ou des traits d'opérations de pêche afin d'explorer la dynamique spatiale, l'exploitation et la gestion des ressources dans la petite pêche (Begossi, 2001; Stelzenmüller et al., 2007). L'émergence de traceur GPS sophistiqué moins cher a récemment ouvert de nouvelles pistes pour la collecte de données de trajectoire afin d'estimer et cartographier l'effort de pêche. Dans la littérature publiée, le seuil de vitesse des bateaux, établi par des analystes, a été utilisé comme l'unique classificateur prédéfini pour prédire les activités pêche et non-pêche à partir des trajectoires des bateaux (Burgos et al., 2013; Navarrete Forero et al., 2017). Cependant, nous tenons que l'utilisation d'un paramètre unique sur la vitesse ne peut pas convenir a priori pour classer les activités pêche et non-pêche dans un contexte de petite pêche très complexe avec différents types d'engins. Étant donné que les procédures d'apprentissage automatique effectueraient cette tâche de classification en s'appuyant sur l'inférence et un large panel de descripteurs des trajectoires des bateaux, elles devraient fournir un cadre analytique plus efficace et généralisable des mouvements des bateaux dans les pêcheries à petite échelle, comme elles l'ont déjà fait dans les pêcheries à grande échelle (De Souza et al., 2016). Pour cette première partie, nous étudions les performances de l'algorithme de Forêt Aléatoire (Random Forest) et de la méthode de seuil de vitesse pour classer automatiquement les mouvements des embarcations en activités pêche et non-pêche dans une pêcherie récifale à petite échelle à Madagascar. Pour cette étude de cas, nous avons suivi les mouvements des pirogues à l'aide de traceur GPS et de données de position GPS (vérifiées sur le terrain) pour cinq types d'engins de pêche. Les trajectoires des pirogues de pêche ont été ensuite traitées par type d'engin au moyen de l'algorithme Forêt Aléatoire et la méthode de seuil de vitesse suivant une approche comparative. Les résultats sont interprétés en termes de fiabilité et de capacité de généralisation des méthodes d'analyse pour estimer l'effort de pêche pour tous les types d'engins. À notre connaissance, il s'agit de la première étude utilisant le modèle d'apprentissage automatique par Forêt Aléatoire et des données des trajectoires des pirogues pour estimer l'effort de pêche dans le contexte de la petite pêche.

1.2. Matériels et Méthodes

1.2.1. Collecte de données de trajectoires

Dans la baie de Toliara, les pêcheurs utilisent des pirogues traditionnelles à voiles pour se déplacer de la station de débarquement vers le site de pêche. Différents mouvements et opérations de pêche peuvent être observés suivant les engins utilisés et les habitudes des pêcheurs.

1.2.1.1. Données de trajectoires de pirogues

Nous avons suivi les mouvements d'un échantillon de 31 pirogues à l'aide de petits traceurs GPS (i-GotU GT600 et CatLog) en 2017 et 2018. Nous avons fourni une explication objective de l'utilisation future des informations obtenues et une petite incitation financière (30 000 Ar par mois) aux pêcheurs participants équipés de GPS. Le traceur GPS a enregistré la position de la pirogue à un intervalle de temps d'environ 45 s afin de détecter le changement rapide des actions des pêcheurs pendant huit à quinze jours consécutifs, selon la durée de vie de la batterie. Chaque position (ping) contient la date, l'heure et la position spatiale (longitude et latitude). Au total, 306 trajets ont été enregistrés sur les cinq principaux engins de pêche : senne de plage, chalut à moustiquaire, filet maillant, ligne à main et fusil-harpon (Tableau 2).

Tableau 2: Nombre de trajets avec observation par engin suivi

Types d'engins	Données GPS enregistrées (avec observation à bord)	
	Pirogue	Trajet
Senne de plage	5 (4)	30 (10)
Filet maillant	4 (3)	62 (9)
Ligne à main	2 (2)	34 (9)
Fusil-harpon	12 (3)	72 (10)
Chalut à moustiquaire	8 (3)	108 (11)

Afin de vérifier les données de localisation de GPS (Alvard et al., 2015), le comportement des pêcheurs a été simultanément enregistré par un seul observateur à bord dont 15 pêcheurs et 49 de ces trajets respectifs sont concernés (Tableau 2). L'observateur a enregistré la nature, l'heure et la durée de toutes les actions pêche et non-pêche dans un journal de bord à l'aide d'une montre synchronisée avec l'heure du GPS. Il a ensuite combiné ces données avec les trajets GPS correspondants pour déterminer les trajectoires de pêche typiques de chaque engin. Enfin, les connaissances spécifiques de l'observateur ont été utilisées pour classifier (sous le SIG) avec précaution les 257 trajets GPS non visibles en événement pêche et non-pêche.

Ces trajets typiques, spécifiques aux engins de pêche, ont montré que les données GPS étaient acquises à une résolution temporelle appropriée pour suivre le comportement des pêcheurs. En outre, ils ont permis à l'observateur de pré-classer avec précaution les 257 traces GPS invisibles en événement pêche et autres, avec une précision vraisemblablement élevée, en utilisant le SIG, qui a validé l'approche de la vérité de terrain et les résultats analytiques du suivi.

Les déplacements entre les sites de débarquement et les lieux de pêche ont été également classifiés par catégorie pour chaque trajet. Le temps moyen de pré-classification des 306 trajets varie entre 30 et 90 minutes par trajet selon la durée de sortie et de l'utilisation des engins de pêche.

1.2.1.2. *Structuration de données*

Initialement, chaque fichier de trajet GPS a été utilisé indépendamment. Les données de chaque fichier ont été filtrées en utilisant soit QGIS, soit Excel, soit R (logiciel statistique). Certaines manipulations modifient la structure des informations (nouvelles colonnes, nouveau séparateur décimal, nouveau séparateur de colonnes ...), et plusieurs versions de la collection de fichiers ont été produites. Comme il était prévu de collecter une grande quantité de fichiers de trajectoires GPS, nous avons décidé d'augmenter le niveau de structuration des données afin d'assurer leur convivialité, leur qualité et leur unicité.

Une base de données relationnelle Postgres/postgis a été mise en place pour rassembler les fichiers GPS ainsi que les informations des observateurs. Au fur et à mesure, il est possible de stocker les données du suivi des trajectoires et permet de calculer les paramètres étudiés par exemple l'effort de pêche ou la production halieutique.

Le choix de Postgres/postgis a été motivé par trois raisons principales :

- i) le volume élevé de données à gérer (60 000 positions pour chaque fichier de trace ~ 21 jours * 24 heures * 60 minutes * 2 positions par minute) et les capacités spatiales de Postgres/postgis
- ii) la nécessité d'être centralisé et disponible depuis différents endroits dans le monde (principalement Madagascar et France)
- iii) l'aboutissement à un seul fichier de sortie avant de réaliser l'analyse après quelques manipulations et d'uniformisation

A l'IH.SM, une fois téléchargés au format csv, les fichiers des trajectoires GPS sont importés dans la base de données (centralisée au serveur du Pôle Halieutique de l'Agrocampus Ouest à Rennes) en utilisant un script R. Le téléchargement des données permet de renseigner la pirogue surveillée. Le renseignement permettra aux utilisateurs de la base de données de relier la trace GPS à une pirogue, à un village et à un pêcheur et, à l'avenir, d'observer les captures.

L'utilisation de Postgres/postgis permet de développer une collection de scripts SQL pour prétraiter les données. Comme les traceurs GPS ont été activés avant le départ en mer, le premier filtrage des données consiste à extraire les positions qui sont uniquement dans la zone d'intérêt sur la mer (c'est-à-dire pas sur la terre). Ce filtrage, traité comme une intersection spatiale avec une carte (shapefile) de Madagascar diminue suffisamment le nombre de positions à analyser. En effet, l'enregistreur GPS effectue un suivi continu même si la pirogue ne pêche plus (stationnement au débarquement ou repos

à la maison). L'utilisation de ce filtre permet de réduire le nombre de positions de 1 120 millions à 320 000. Cela correspond à la durée moyenne de pêche par jour : ~6 heures, ¼ des 24 heures).

En outre, les paramètres d'entrée du modèle statistique sont tous calculés à l'aide de SQL Script dans la base de données Postgres. Cette dernière offre une grande extensibilité et un processus décrit (script) mélangeant des requêtes spatiales et non spatiales. Tous les processus sont stockés en tant que sorties matérialisées de mise en cache des vues pendant que la requête/le script est disponible et peut être mis à jour lorsque de nouvelles données sont téléchargées via une procédure de déclenchement.

Les données téléchargées sont manipulables via une grande variété de logiciels, avec une connexion Internet. Les SIG comme les QGIS sont capables d'afficher toute la géométrie spatiale décrite dans le tableau (point de localisation du ping mais aussi les polygones utilisés pour identifier la position sur terre). Le logiciel R via DBI, RODBC, RpostgreSQL et le package rportgis peut connecter et utiliser les données.

1.2.2. Analyse de données

D'une part, l'analyse consiste à estimer un modèle permettant d'attribuer un label « pêche » ou « non-pêche » à chaque point GPS, à partir des données des trajectoires des pirogues ; et d'autre part à estimer l'effort de pêche total des pirogues (avec et sans observateur à bord). Nombreux modèles statistiques sont couramment utilisés comme le plus simple celui est basé sur un seuil de vitesse (Lee et al., 2010). Toutefois, la vitesse pourrait ne pas être suffisante pour faire la distinction entre les différentes activités, en particulier dans la présente étude qui concerne la pirogue traditionnelle dont la force de déplacement dépend de la force (naturelle) du vent ou de l'homme : les temps de repos pourraient être confondus avec la pêche. Ainsi, un modèle d'apprentissage de classification supervisée par Forêt Aléatoire a été également testé.

Les données ont été nettoyées des erreurs évidentes du GPS et des incohérences spatiales. Etant donné que les traceurs GPS enregistraient la position des pirogues à des intervalles de temps variables selon la réception des signaux satellites, la standardisation des trajectoires des pirogues était nécessaire avant le traitement des données. Un jeu de données de positions GPS reconstruites a été généré en déduisant linéairement les positions des pirogues à intervalles réguliers de 60 s à l'aide du package R adehabitatLT (Calenge, 2006) qui est un outil d'analyse de mouvements.

2.2.2.1. Analyse avec le seuil de vitesse

Les positions GPS des pirogues de chaque trajet enregistré ont été classées en événements de pêche et non de pêche en utilisant un seuil de vitesse prédéfini. Comme les informations préliminaires sur la

vitesse de pirogue n'étaient pas disponibles dans la pêcherie étudiée, ce seuil a été estimé à l'aide de nos données empiriques selon un processus en deux étapes :

- Tout d'abord, la vitesse de la pirogue a été calculée à chaque position GPS en divisant la distance par l'intervalle de temps entre deux positions de pirogues consécutives (c'est-à-dire 60 secondes).
- Deuxièmement, comme la vitesse de la pirogue pendant le trajet entre les sites de débarquement et les lieux de pêche variait en fonction de facteurs liés à la pêche (par exemple, la taille de la pirogue, l'équipement, le nombre de pêcheurs à bord, la distance par rapport au lieu de pêche) et de facteurs non liés à la pêche (par exemple, la force et la direction du vent, le courant de marée), nous avons estimé la vitesse qui maximisait le taux de vrais positifs (c'est-à-dire la proportion d'évènements de pêche qui ont été correctement prédits comme tels) et de vrais négatifs (c'est-à-dire la proportion d'évènements non liés à la pêche qui ont été correctement prédits comme tels) en fonction d'un gradient de vitesse pour chaque type d'engin.

Les vitesses minimales présentées dans le Tableau 3 ci-dessous ont été trouvées et utilisées pour traiter tous les trajets de pirogues par type d'engin.

Tableau 3: Vitesse minimale (seuil) de classification par type d'engin de pêche

Type d'engin de pêche	Seuil de vitesse (km.h ⁻¹)
Senne de plage	0,54
Chalut à moustiquaire	0,84
Filet maillant	0,63
Ligne à main	0,48
Fusil-harpon	1,62

Les positions GPS des pirogues de chaque type d'engin ont donc été classées en "pêche" si la vitesse de la pirogue était inférieure à la limite de vitesse correspondante, et en "non-pêche" si la vitesse de la pirogue dépassait ce seuil.

2.2.2.2. Analyse avec l'algorithme de Random Forest

Les 306 trajets pré-classés ont été utilisés comme un jeu de données GPS (de vérité de terrain) pour former un algorithme Random Forest dans un cadre de validation croisée (Boehmke et al., 2019). La validation croisée est une méthode permettant de tester la précision prédictive dans un échantillon

test par rapport à la précision de l'échantillon d'apprentissage à partir duquel le modèle a été développé.

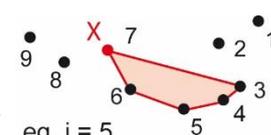
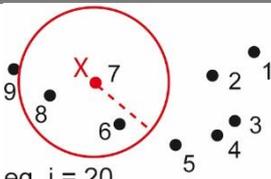
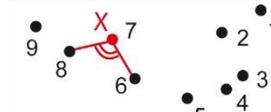
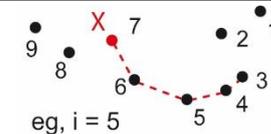
Au total, 24 covariables ont été calculées à chaque position GPS de chaque pirogue pour tenir compte de la géométrie locale des trajets.

Ces covariables (Tableau 4) décrivent :

- i) la surface du polygone obtenue en reliant cinq à dix positions consécutives (Conv),
- ii) la surface du polygone (Conv) divisée par le carré du périmètre du polygone (ConvP),
- iii) le nombre de positions GPS dans un cercle d'un rayon de 20 à 100 m (Cercle),
- iv) l'angle entre trois positions consécutives (Angle), et
- v) la vitesse moyenne entre cinq à dix positions consécutives (Vitesse).

Le choix de ces covariables a été dérivé des modèles géométriques des trajectoires des pirogues observés parmi les trajets de pêche pré-classés et a évidemment eu un impact sur les sorties des modèles. Alors que le lieu d'utilisation des engins de pêche était probablement lié aux conditions géographiques et environnementales (par exemple, l'habitat marin, la profondeur et la distance au rivage), seules les données GPS ont été intégrées dans les algorithmes d'apprentissage afin d'améliorer la généralité des modèles.

Tableau 4: Description des 24 covariables qui ont été calculées à la position GPS de chaque pirogue et utilisées par l'algorithme de Forêt Aléatoire (adapté de Behivoke et al.,2021)

Covariables		Nombre des covariables	
Conv(X _i)	Aire (en m ²) de l'enveloppe convexe obtenue en reliant les positions X, X-1, ..., et X+i+1.	6 i ∈ [5,6,7,8,9,10]	
ConvP(X _i)	Conv(X _i) divisé par le carré du périmètre du polygone.	6 i ∈ [5,6,7,8,9,10]	eg, i = 5
Cercle(X _i)	Nombre de positions dans un cercle de rayon i-mètre centré sur la position X.	5 i ∈ [20,40,60,80,100]	
Angle(X)	Angle (en degré) entre les positions X-1, X, et X+1.	1	
Vitesse(X _i)	Vitesse moyenne sur le terrain (en m/s) calculée en utilisant la distance et le temps entre les positions X et X+i+1.	6 i ∈ [5,6,7,8,9,10]	

Ces covariables ont été ensuite calculées comme des caractéristiques par un algorithme de Random Forest utilisant l'échantillonnage avec remplacement (bootstrapping) et fixant les hyper-paramètres comme suit : *Gini Impurity Index* (mesure pour générer des arborescences de classification) a été utilisé comme critère de découpage des nœuds tout en conservant au moins 10 positions GPS à chaque nœud des arbres de décision. Le nombre d'arbres (200, 500, 1000 et 1500) et les sous-ensembles aléatoires de covariables à diviser éventuellement à chaque nœud (2, 4, 6, 8, 10 et 12) ont été déterminés pour maximiser la performance du modèle en utilisant l'aire sous la courbe ROC-Receiver Operating Characteristic (ou AUC-Area Under Curve). Une courbe ROC est un graphique qui représente les performances d'un modèle de classification pour les seuils de classification. Une procédure de validation croisée a été suivie pour éviter un surajustement du modèle. Pour chaque type d'engin, cette procédure consistait à :

- i) sélectionner les trajets pré-classés de tous les pêcheurs sauf un comme ensemble de données d'apprentissage,
- ii) utiliser le modèle pour prédire la probabilité d'un événement de pêche à la position GPS de chaque pirogue sur les trajets des autres pêcheurs,
- iii) répéter l'étape précédente afin d'effectuer la prédiction du modèle pour chaque pirogue, et
- iv) produire une matrice de confusion globale des prédictions du modèle en utilisant le classificateur MAP ou *maximum a posteriori* (méthode d'estimation d'un certain nombre de paramètres inconnus).

2.2.2.3. *Mesures de performance des méthodes analytiques*

Sur la base des observations à bord, l'analyse post-hoc a permis de supprimer, d'une part les prédictions de faux positifs en reclassant tous les « événements pêche » inférieurs à 5 minutes (i.e. événements pêche consécutifs ≤ 5 entourés d'événements non-pêche > 10) en « événements non-pêche ». D'autre part, les prédictions de faux négatifs sont aussi supprimées en reclassant tous les « événements non-pêche » inférieurs à 5 minutes (c'est-à-dire événements consécutifs non-pêche ≤ 5 entourés d'événements pêche > 10) en « événements pêche ».

Trois types de mesures de performance de l'estimation de l'effort de pêche ont été utilisés pour comparer les deux méthodes analytiques afin de tenir compte de la diversité des objectifs, des besoins et des contraintes des programmes de suivi de la pêcherie en fonction du contexte de gestion :

- Premièrement, les résultats de chaque méthode ont été évalués au moyen d'une matrice de confusion qui a été calculée sur la base de trois critères de performance quantitatifs :

- la précision (c'est la proportion de prédictions correctes d'évènements pêche et non-pêche),
 - la sensibilité (taux de vrais positifs, c'est la proportion d'évènements pêche qui ont été correctement identifiés comme tels), et
 - la spécificité (taux de vrais négatifs, c'est la proportion d'évènements non-pêche qui ont été correctement identifiés comme tels).
- Deuxièmement, la sensibilité spatiale des méthodes a été étudiée par une approche cartographique afin d'évaluer leur capacité à détecter des évènements de pêche individuels. Pour chaque méthode et chaque type d'engin, la sensibilité spatiale a été calculée en utilisant une grille carrée ($0,005^\circ \times 0,005^\circ$) comme le nombre total de vrais positifs dans chaque grille divisé par le nombre d'évènements pêche de l'observateur dans cette grille. La taille de la grille a été définie pour permettre la représentation de la géomorphologie des récifs dans la zone d'étude. Les grilles dont la sensibilité spatiale était inférieure à 80 % ont été cartographiées et comparées entre les méthodes.
- Troisièmement, l'effort de pêche par sortie (en heures) a été estimé comme le produit du nombre prévu d'évènements pêche de trajets correspondants à 60 s (c'est-à-dire l'intervalle de temps standardisé entre deux positions GPS consécutives). Les estimations de l'effort de pêche par sortie ont ensuite été comparées entre les méthodes par type d'engin en utilisant des représentations de boxplot et de plot. La différence de moyenne de l'effort de pêche entre les mesures et les prévisions de l'observateur par type d'engin a été calculée et comparée entre les méthodes à l'aide de diagramme de densité de noyau (*Kernel density plots*).

L'analyse des données a été effectuée à l'aide de package R caret (Kuhn et al., 2018) et R ranger (Wright and Ziegler, 2017). Un extrait des données (GPS) lors du suivi est montré en Annexe 1. Une synthèse méthodologique de code R sur l'analyse Forêt Aléatoire et de la validation croisée des données de suivi des pirogues développée par Etienne, (2020) est présentée en Annexe 2.

1.3. Résultats

2.3.1. Caractéristique de l'activité de pêche par type d'engin

Différents types d'engins de pêche ont été répertoriés dans la pêcherie de la baie de Toliara, mais les pêcheurs ont surtout utilisé un seul type d'engin pour chaque sortie. Chaque sortie des 31 pêcheurs participants (équipés de GPS) a été ensuite assignée à un type d'engin unique selon la déclaration des pêcheurs.

Les évènements pêche et non-pêche ont été caractérisées suivant les motifs (formes) des trajectoires. Le motif des trajets des pirogues varie en fonction du déroulement des activités de pêche (c'est-à-dire

la préparation engins, opération de pêche et le halage des engins) et subséquemment varie selon le type d'engin (Fig. 15).

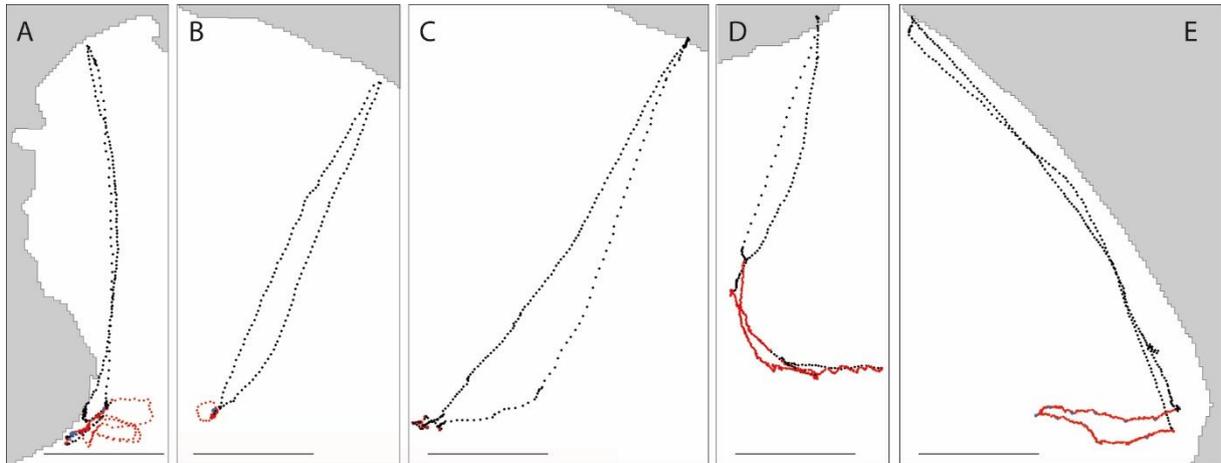


Fig. 15: Présentation des trajets bruts de GPS pour les cinq pirogues utilisant différents types d'engins de pêche (Behivoke et al.,2021).

Cette présentation indique le comportement des pêcheurs potentiels pour la senne de plage (A), le filet maillant (B), la ligne à main (C), le fusil-harpon (D) et le chalut moustiquaire (E). Les points représentent les positions GPS individuelles observées. Les points rouges et noirs représentent respectivement les évènements pêche et non pêche observés. La barre d'échelle représente 1 km.

Les trajets GPS correspondant aux évènements de pêche ont été caractérisés par des larges segments de trajets courbés, denses et bien définis pour l'utilisation des sennes de plage (Fig. 16), des petites boucles ou des segments irréguliers associés à des groupements denses pour l'utilisation des filets maillants (Fig. 17), des groupements irréguliers correspondant au point d'ancrage des pirogues pour l'utilisation des lignes à main (Fig. 18), et des segments sinueux et denses pour l'utilisation des fusils-harpons (Fig. 19) et des chaluts à moustiquaires (Fig. 20).

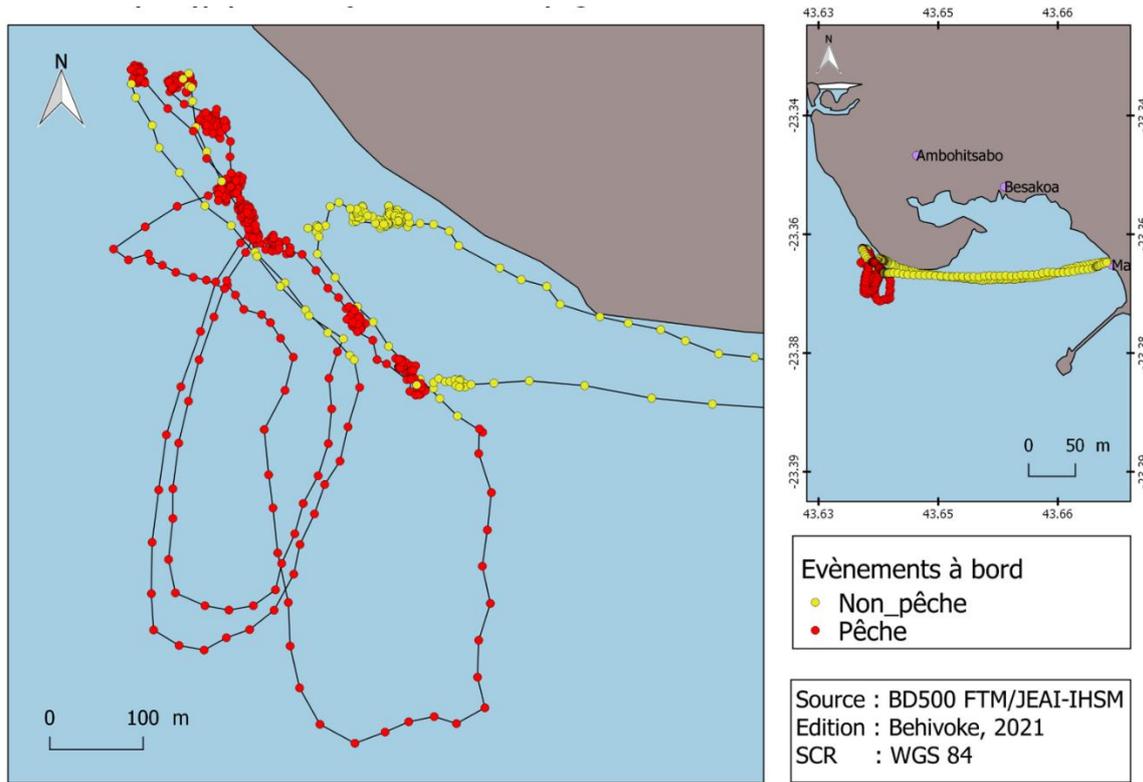


Fig. 16: Caractéristiques des motifs de trajectoire de la senne de plage

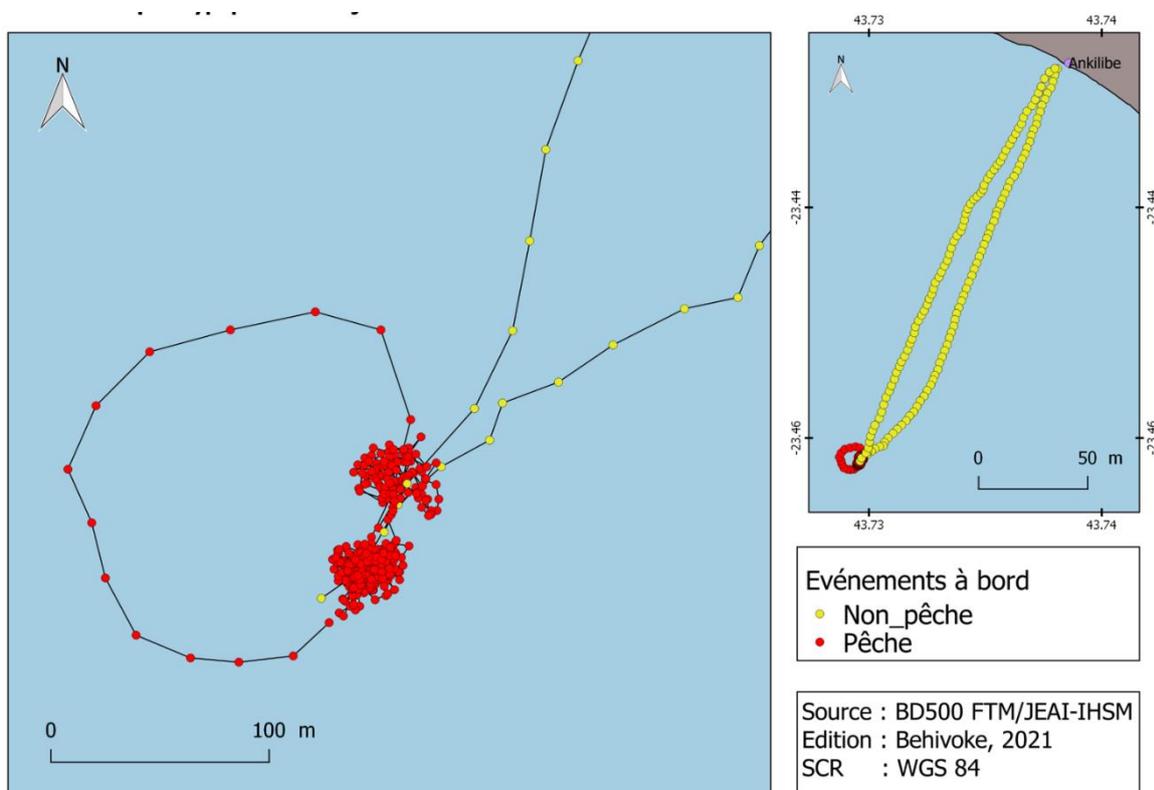


Fig. 17: Caractéristiques des motifs de trajectoire du filet maillant

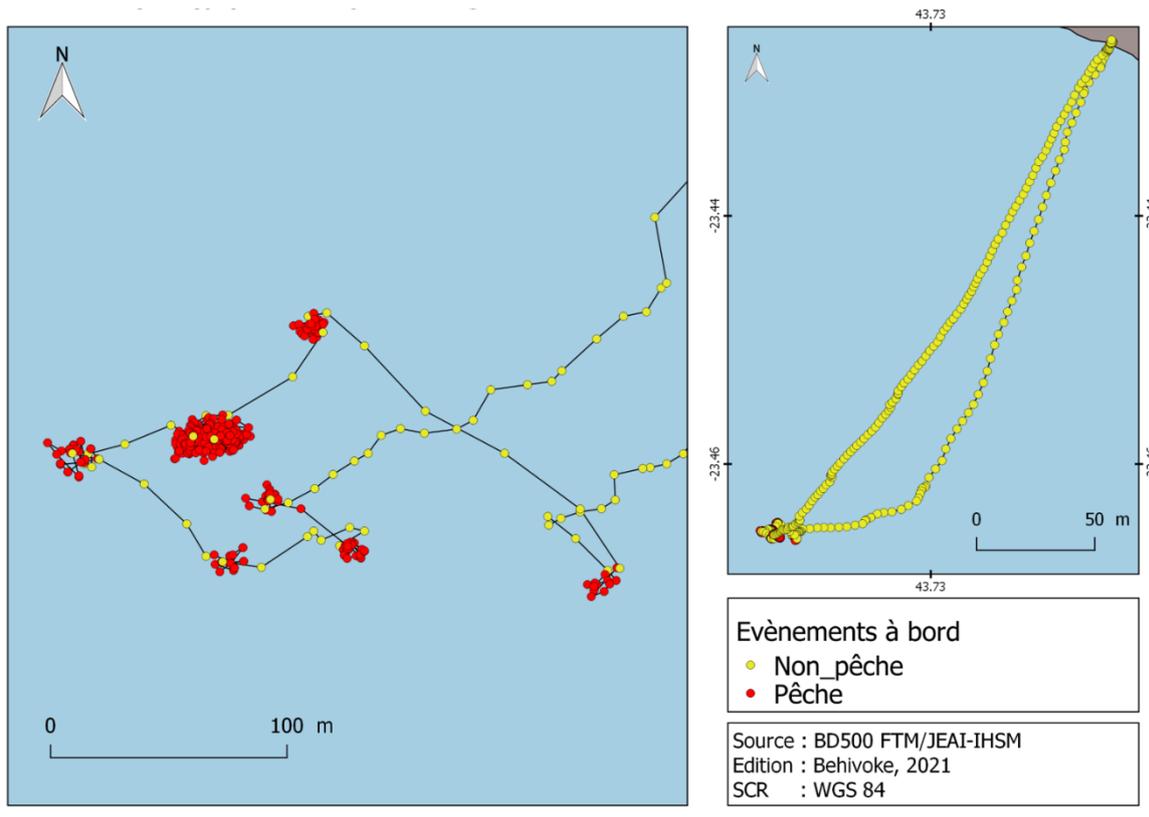


Fig. 18: Caractéristiques des motifs de trajectoire de la ligne à main

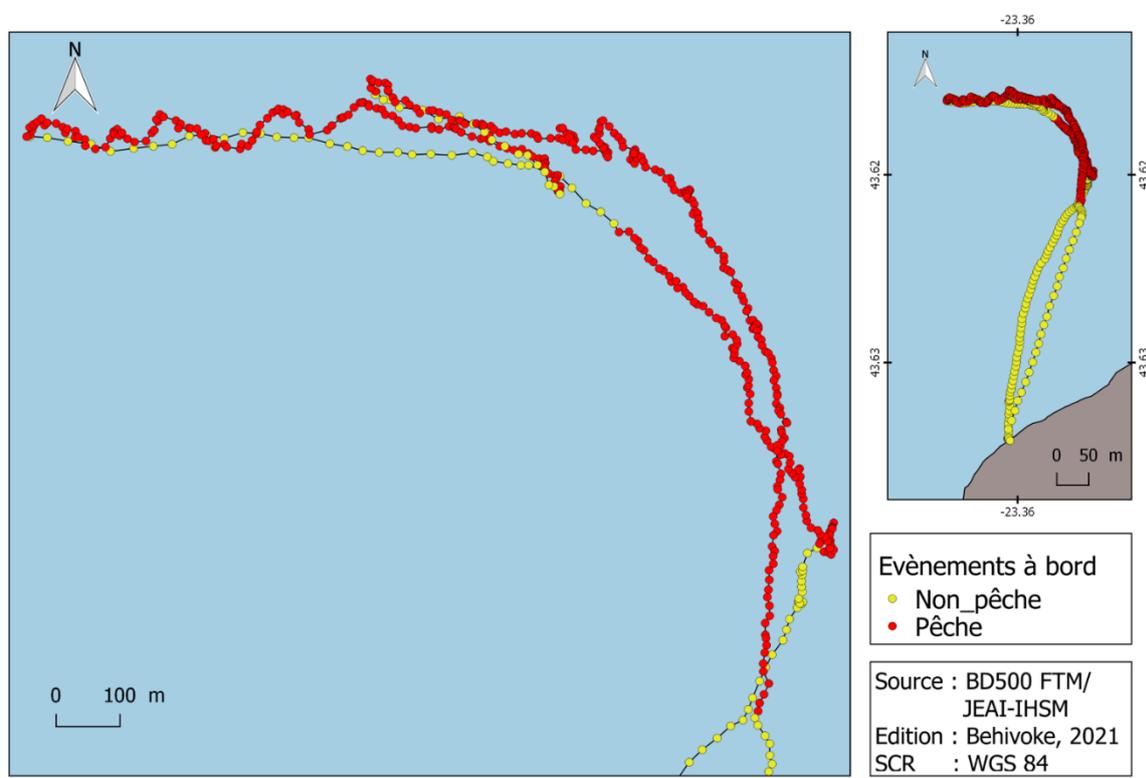


Fig. 19: Caractéristiques des motifs de trajectoire du fusil-harpon

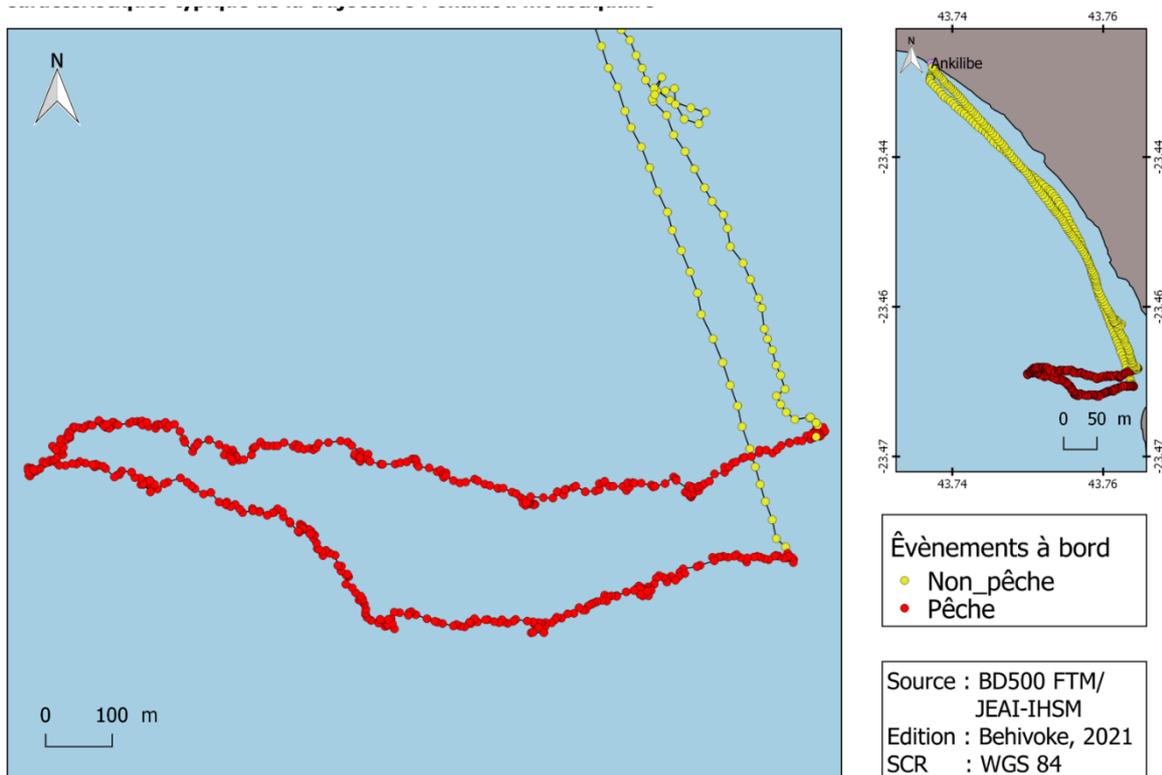


Fig. 20: Caractéristiques des motifs de trajectoire du chalut à moustiquaire

Les évènements non-pêche étaient en revanche globalement similaires pour tous les types d'engins. Ils consistaient à i) se déplacer des sites de débarquement vers les lieux de pêche (et vis-versa) sur une distance de <1 km à plusieurs km en naviguant à la voile ou à la pagaie, et ii) à préparer la pirogue (par exemple installer ou plier la voile). Des évènements non-pêche accidentels de courte durée et imprévisibles ont été aussi occasionnellement détectés. Ces évènements ont été généralement causés par l'état de la mer (courants de marée) et des facteurs socio-environnementaux. Les motifs des trajets GPS correspondants affichaient systématiquement de petits segments de trajet avec une distance variée entre les points GPS et des groupements de points irréguliers (Fig. 16) et (Fig. 20).

L'enregistrement de la position de pirogue à 60 s d'intervalle a été jugé approprié pour représenter le mouvement des activités des petits pêcheurs dans un écosystème récifal comme dans la baie de Toliara.

2.3.2. Performance des méthodes analytiques

2.3.2.1. Critères de performance des prédictions

Les prédictions de la méthode du seuil de vitesse de pirogue et du modèle de Forêt Aléatoire ont obtenu des scores de critères de performance élevés à très élevés pour les quatre types d'engins (filet maillant, fusil-harpon, ligne à main et chalut à moustiquaire), bien que dans la plupart des cas le

modèle de Forêt Aléatoire ait obtenu de meilleurs résultats (Tableau 5). Toutefois, les résultats ont montré que les mouvements à faible et à grande vitesse des pirogues pratiquant la senne de plage étaient loin d'être systématiquement associés à des événements pêche et non pêche. Ainsi, ce constat fait que la vitesse de la pirogue est un mauvais prédicteur de l'activité de pêche pour ce type d'engin. Rien n'indique qu'il existe un lien entre la performance du modèle Forêt Aléatoire et la taille de l'échantillon selon le type d'engin (Tableau 5), ce qui suggère que la performance du modèle Forêt Aléatoire a été déterminée par les habitudes d'utilisation des engins plutôt que par la taille de l'échantillon.

Tableau 5: Mesures de performance des modèles de vitesse et de Forêt Aléatoire par type d'engin

- Mesures basées sur des enregistrements de données GPS et des trajets de pêche pré-classés. PR, SE et SP sont des termes qui désignent la précision, la sensibilité et la spécificité.
- Les scores les plus élevés des critères de performance entre les deux méthodes sont soulignés.

Types d'engins	Données GPS enregistrées (avec observation à bord)		Trajets de pêche pré-classés			Critères de performance					
	Pirogue	Trajet	Total événement pêche	Durée moyenne de sortie (h)	Temps d'évènement pêche (%)	Seuil de vitesse			Random forest		
						PR	SE	SP	PR	SE	SP
Senne de plage	5 (4)	30 (10)	6 036	6.07	55.3%	0.66	0.65	<u>0.67</u>	<u>0.74</u>	<u>0.81</u>	0.66
Filet maillant	4 (3)	62 (9)	15 278	6.40	64.2%	0.86	0.86	<u>0.85</u>	<u>0.88</u>	<u>0.94</u>	0.78
Ligne à main	2 (2)	34 (9)	8 520	5.95	70.1%	<u>0.89</u>	0.88	<u>0.89</u>	<u>0.89</u>	<u>0.97</u>	0.71
Fusil-harpon	12 (3)	72 (10)	16 690	6.54	59.1%	0.85	0.85	<u>0.85</u>	<u>0.89</u>	<u>0.92</u>	<u>0.85</u>
Chalut à moustisquaire	8 (3)	108 (11)	17 772	4.79	57.2%	0.77	0.77	0.77	<u>0.88</u>	<u>0.95</u>	<u>0.80</u>

2.3.2.2. Distribution spatiale de la sensibilité

La sensibilité est le taux de vrai positif, c'est-à-dire des points identifiés en pêche et qui sont prédits en pêche. La distribution spatiale de la prédiction des véritables événements pêche a également montré que le modèle de Forêt Aléatoire a détecté de manière plus cohérente les événements pêche dans la zone de pêche pour tous les types d'engins, tandis que le seuil de vitesse a donné une sensibilité spatiale élevée uniquement pour les filets maillants et les lignes à main (Fig. 21).

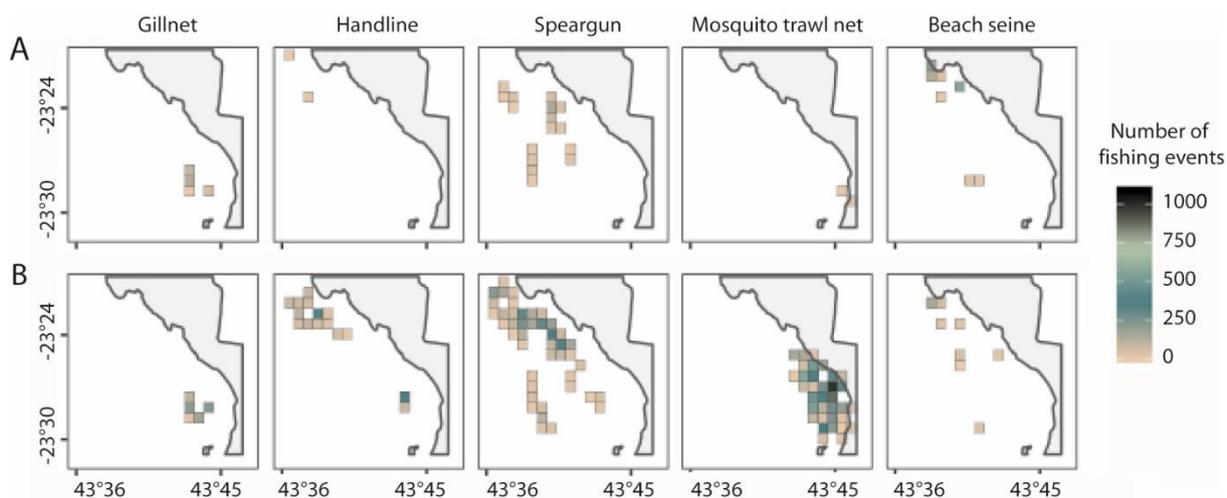


Fig. 21: Cartes de la sensibilité spatiale du modèle de Forêt Aléatoire (A) et du seuil de vitesse (B) pour chaque type d'engin (Behivoke et al., 2021)

- Carte à l'aide d'une grille carrée de $0,005^\circ \times 0,005^\circ$ (555 m x 555 m). Seules les grilles dont la sensibilité est inférieure à 80 % sont affichées pour une meilleure clarté.
- Le gradient de couleurs montre la différence dans le nombre d'évènements pêche entre les mesures de l'observateur et les vrais positifs prédits par les deux modèles.

Le nombre de grille avec une sensibilité <80% était en effet sensiblement plus faible pour le modèle de Forêt Aléatoire par rapport au seuil de vitesse pour le fusil-harpon (-14 grilles, 19.7%), le chalut à moustiquaire (-7 grilles, 17.5%), et la senne de plage (-8 grilles, 44.4%). Cela montre que la méthode de seuil de vitesse était moins efficace pour suivre les pratiques de pêche à haute résolution que le modèle Forêt Aléatoire pour ces types d'engins ().

2.3.2.3. Estimation de l'effort de pêche effectif

Selon les mesures prises par les observateurs, la durée moyenne des sorties de pêche se situe entre 4,8 h et 6,5 h pour tous les types d'engins. Les temps des opérations de pêche varient en moyenne de 2,8 h à 4,2 h par sortie soit 55,3 % à 70,1 % de la durée de la sortie (Fig. 22-A).

Les prédictions de l'effort de pêche moyen par sortie ont montré que les deux méthodes ont atteint une précision de 89,4 % à 97 % pour tous les types d'engins. Toutefois, des différences dans les estimations de l'effort de pêche ont été observées entre les méthodes et ont partiellement contredit les résultats obtenus par rapport aux critères de performance. Le seuil de vitesse a légèrement sous-estimé cet indicateur de 3,0 % à 7,2 % (Fig. 22-C). Plus précisément, la différence des moyennes de l'effort de pêche par sortie entre les mesures des observateurs et les prédictions du seuil de vitesse variait de +0,09 h (+3,3 %) à +0,13 h (+3,4 %) pour la ligne à main, le fusil-harpon et le chalut moustiquaire et atteignait jusqu'à +0,24 h (+7,2 %) et +0,27 h (+6,6 %) pour la senne de plage et le filet

maillant (Fig. 22-B). Au contraire, le modèle de Forêt Aléatoire a surestimé l'effort de pêche par sortie dans une mesure variable tout en donnant une précision comparativement plus faible pour la ligne à main, le chalut à moustiquaire et le filet de plage. Plus précisément, la différence des moyennes d'effort de pêche par sortie entre les mesures de l'observateur et les prédictions du Forêt Aléatoire varie de -0,42 h (-10,4 %) à -0,26 h (-6,3 %) pour la ligne à main, la senne de plage, le chalut à moustiquaire et le filet maillant, et atteint jusqu'à -0,12 h (-3,1 %) pour le fusil-harpon (Fig. 22-A-B). La précision de l'estimation de l'effort de pêche était similaire entre les deux méthodes et était plus élevée pour le filet maillant, la ligne à main, le fusil-harpon et le chalut à moustiquaire que pour la senne de plage (Fig. 22-C).

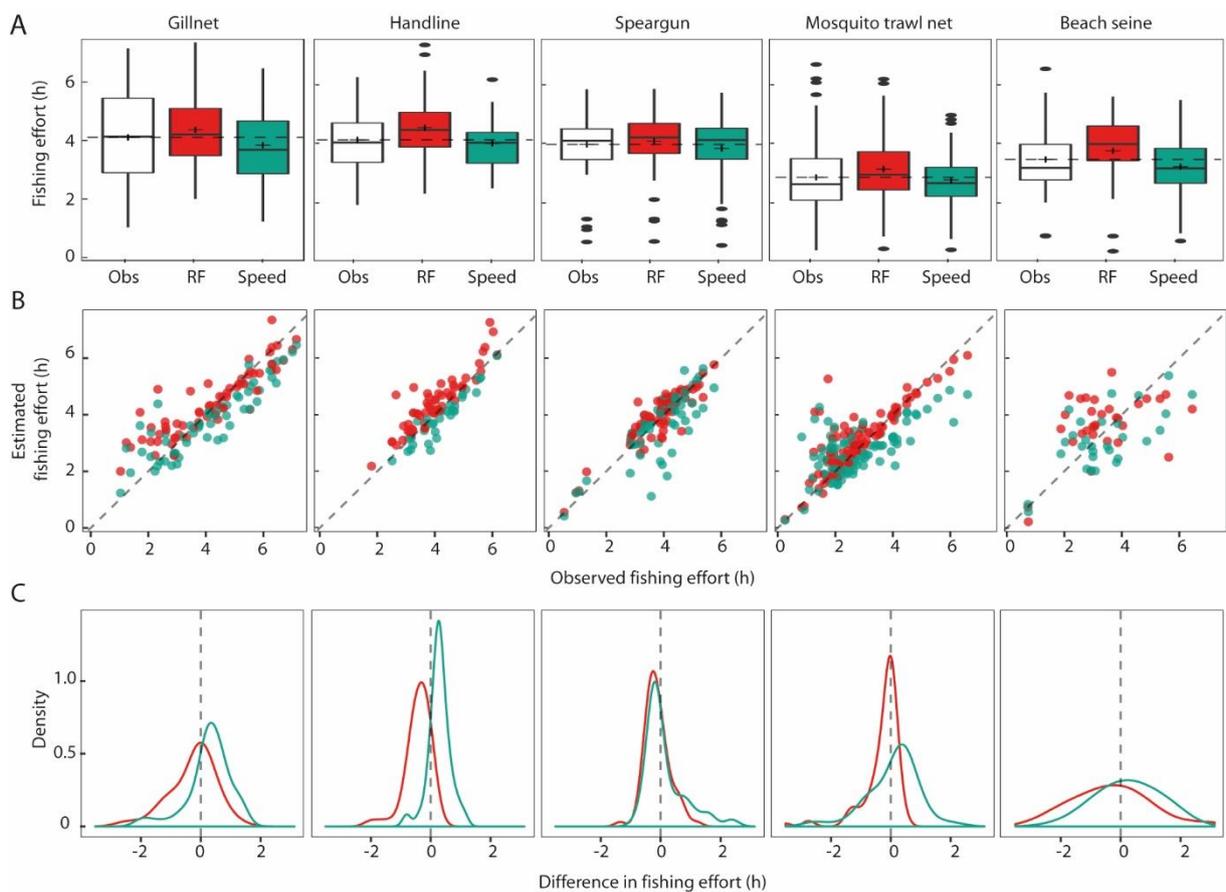


Fig. 22: Effort de pêche par sortie (h) par type d'engin (Behivoke et al., 2021)

- Les boxplots (A) montrent la médiane (ligne continue), la moyenne (croix noire), les premiers aux troisièmes quartiles, et les valeurs aberrantes des mesures de l'observateur (Obs) et des prédictions du modèle de Random Forest (Forêt Aléatoire) et du seuil de vitesse (Speed). Les moyens de mesure de l'observateur sont indiqués à titre de comparaison (ligne pointillée).
- Les diagrammes (B) montrent les prévisions de l'effort de pêche du modèle de Forêt Aléatoire (points rouges) et le seuil de vitesse (points verts) par rapport aux mesures de l'observateur pour chaque sortie de pêche individuelle. La fonction $x=y$ est affichée (ligne pointillée).

- Les diagrammes de densité de noyaux (C) montrent la dispersion de la différence d'effort de pêche (h) entre les mesures de l'observateur et les prédictions du modèle de Forêt Aléatoire (ligne rouge) et du seuil de vitesse (ligne verte).

Les résultats montrent que la performance perçue du modèle de Forêt Aléatoire et le seuil de vitesse varient selon l'effort de pêche considéré (global ou individuel). L'estimation de l'effort de pêche est le produit de vrais positifs. Ainsi, de faux positifs surestiment les événements pêche et de faux négatifs surestiment les événements non-pêche. Le compromis entre la précision, spécificité et sensibilité peut conduire à une interprétation trop optimiste de la fiabilité des prédictions des seuils de vitesse de l'activité de pêche, pour les quatre types d'engins (le filet maillant, la ligne à main, le fusil-harpon et le chalut à moustiquaire). Par exemple, l'erreur relative de l'estimation du seuil de vitesse de l'effort de pêche moyen par sortie des utilisateurs de chaluts à moustiquaires (-3,3 % en moyenne, Fig. 22-A) était inférieure à celle du modèle de Forêt Aléatoire (+10,6 % en moyenne, Fig. 22-A-B). Rappelons que les scores de performance et la sensibilité spatiale de Forêt Aléatoire étaient beaucoup plus élevés que ceux du seuil de vitesse pour le chalut à moustiquaire (Tableau 5, Fig. 22). Il ne faut donc pas trop insister sur l'efficacité de la méthode du seuil de vitesse pour s'adapter à la diversité des types d'engins et de leurs utilisations dans la pêcherie à petite échelle. La fixation du seuil de vitesse est une décision difficile qui influence fortement les résultats et nécessite du jugement pour équilibrer les compromis entre précision, spécificité et sensibilité.

Les résultats de performances entre la méthode Forêt Aléatoire et celle de seuil de vitesse sont différents. Ces résultats suggèrent que le choix de la méthode de prédiction appropriée pour la gestion de la pêche dépendrait de l'utilisation locale des engins, des indicateurs pertinents de l'effort de pêche et de l'expertise analytique disponible. L'algorithme d'apprentissage de Forêt Aléatoire a fourni des résultats cohérents pour tous les types d'engins et s'est révélé être une méthode analytique plus générique, bien que plus complexe, pour les données de suivi des petites embarcations. Dans l'ensemble, ce modèle Forêt Aléatoire a permis d'obtenir une plus grande fiabilité d'indicateur de l'effort de pêche spatialement explicite par rapport au seuil de vitesse pour les cinq types d'engins (auf la senne de plage (Fig. 22)). En outre, la procédure de validation croisée permet d'estimer la performance des prédictions, ce qui constitue un avantage majeur des méthodes d'apprentissage automatique comme le l'algorithme de Forêt Aléatoire que la méthode de seuil de vitesse.

1.4. Discussion

Les trajectoires de pirogues Vezo dans le sud-ouest de Madagascar ont été étudiées afin de connaître le comportement (durant la sortie en mer) de pêcheurs selon les engins tout en développant une méthode permettant d'identifier les positions des pirogues en pêche ou non-pêche d'un trajet. Les

motifs de trajets sont variables selon l'engin. Des motifs de trajectoires d'engins spécifiques ont été mentionnés dans d'autres études antérieures utilisant des dispositifs de géolocalisation dans des pêcheries à petite et à grande échelle (Joo et al., 2013; Alvard et al., 2015; De Souza et al., 2016).

Le seuil de vitesse et l'algorithme Randon Forest ont été explorés pour les prédictions. Les deux méthodes peuvent prédire les événements de l'activité de pêche avec des scores de performance très élevés.

Cependant, la différence de performance et de résultats entre les deux méthodes remet en question la littérature disponible qui considère la vitesse du bateau comme un prédicteur spatial fiable et à échelle fine du comportement des petits pêcheurs et, par conséquent, de l'activité de pêche (Burgos et al., 2013; Alvard et al., 2015; Navarrete Forero et al., 2017). Cette différence est probablement due aux caractéristiques différentes des types d'engins et des pêcheries étudiées. En effet, les études de cas susmentionnées se sont concentrées sur la pêche à l'hameçon (c'est-à-dire la ligne à main, la ligne de traîne, la palangre de fond et la palangre verticale) pratiquée par des bateaux motorisés. Ces embarcations étaient évidemment moins affectées par des facteurs environnementaux autres que la pêche (par exemple la direction et la force du vent, le courant de marée) pendant les sorties de pêche par rapport aux embarcations à voiles étudiées. En outre, l'investigation a porté sur une plus grande diversité de types d'engins et d'utilisation spatiale de motifs correspondants.

Dans un cadre de gestion de la pêcherie à petite échelle, la méthode analytique basée sur le suivi par GPS a fourni des estimations précises et exactes de l'effort de pêche (en heures par sortie) qui n'ont pas été obtenues par d'autres méthodes de suivi de la pêche. Par exemple, les méthodes d'enquête par interview basées sur les cartes des pêcheurs sont devenues de plus en plus populaires au cours des 15 dernières années en tant que solution rentable au manque de données dans les pêcheries à petite échelle (Close and Brent Hall, 2006; Léopold et al., 2014; Gill et al., 2019). Toutefois, une des limites de cette méthode vient du fait qu'elle utilise couramment l'unité "sortie de pêche" comme mesure de l'effort de pêche. En effet, cette unité ne peut pas saisir les changements dans la durée de la sortie et le temps effectivement passé à pêcher, qui sont deux indicateurs pertinents de la pression de pêche. En outre, comme l'ont montré d'autres auteurs (Harley et al., 2001; McCluskey and Lewison, 2008), l'unité "sortie de pêche" renforce l'hyperstabilité de la relation entre l'abondance de la ressource et les indices d'abondance dépendant de la pêche largement utilisés tels que les CPUE, ce qui entrave la détection des changements dans l'état de la ressource et des effets potentiels de la pêche.

Les résultats de cette étude montrent que le suivi des bateaux et le traitement des données de suivi par GPS au moyen du modèle Forêt Aléatoire ou du seuil de vitesse (dans certaines conditions) permettraient de surmonter ces limitations. En outre, en localisant les événements de pêche par sortie, les suivis des trajectoires de bateaux par GPS qui suivent un plan d'échantillonnage approprié et une couverture spatio-temporelle de l'activité des pêcheurs peuvent permettre de déduire la

distribution de l'effort de pêche à une résolution spatiale fine (Burgos et al., 2013). Une telle cartographie est nécessaire pour la gestion spatiale de la pêcherie à petite échelle.

1.5. Conclusion

Nous avons comparé les performances d'un seuil de vitesse et d'algorithmes d'apprentissage automatique pour estimer et de cartographier l'effort de pêche par sortie dans une pêcherie récifale à petite échelle à Madagascar, en utilisant des traceurs GPS de pirogues. Dans l'ensemble, il a été constaté que l'algorithme de Forêt Aléatoire permettait de détecter de manière fiable et précise les événements pêche et non-pêche des trajets de pirogues, quel que soit le type d'engin (senne de plage, chalut à moustiquaire, filet maillant, ligne à main et fusil-harpon). Cela permet de dire que le modèle Randon Forest est un outil puissant et générique pour l'analyse des suivis basés sur les trajectoires GPS dans les pêcheries à petite échelle. Néanmoins, si l'expertise analytique exclut l'utilisation d'une procédure analytique aussi sophistiquée, l'utilisation d'un seuil de vitesse peut être appropriée pour les types d'engins qui induisent un changement marqué de la vitesse de pirogue entre les activités de pêche et les autres activités. À notre connaissance, aucune étude antérieure n'a comparé l'apprentissage automatique et les méthodes basées sur la vitesse pour le traitement des données de trajectoire des pirogues afin d'évaluer la distribution spatiale et l'intensité de la pêche à petite échelle. La participation des pêcheurs au suivi a permis d'optimiser la collecte des données GPS, les procédures d'apprentissage et les prédictions consécutives du modèle sur l'effort de pêche par sortie. En intégrant les connaissances des pêcheurs dans la recherche halieutique et en améliorant la précision de l'indicateur d'effort de pêche à la fois quantitatif et spatial, cette étude suggère que le suivi des embarcations combiné à une procédure analytique appropriée peut contribuer de manière pertinente à la gestion de la pêche à petite échelle.

Chapitre II. CARACTERISATION DE L'EFFORT DE PECHE DANS LA BAIE DE TOLIARA

2.1. Introduction

La pêche à petite échelle manque souvent de données sur l'effort de pêche notamment sur le nombre de navires, les types d'engins utilisés et les enregistrements des débarquements. Cela rend le calcul de l'effort de pêche difficile et peut remettre en question l'exactitude des résultats obtenus pour ces flottes (Stewart et al., 2010), alors que la réflexion sur la durabilité d'une pêcherie nécessite de données actualisées. Des informations à jour et précises sur les captures et l'effort de pêche sont donc nécessaires pour faciliter la gestion durable des pêches (McCluskey and Lewison, 2008), étant donné que l'effort de pêche est considéré comme un indicateur de pression pour diagnostiquer une pêcherie. La notion d'effort de pêche a toujours eu une très grande importance en halieutique. D'une part, elle est à la base de nombreux diagnostics concernant l'état des stocks exploités et d'autre part, la gestion directe ou indirecte de l'effort est généralement considérée comme un moyen privilégié de régulation de l'activité de pêche (Gascuel, 1993). Il est certain que la promotion d'une pêche durable nécessite la quantité et la qualité des données pour l'application de la stratégie et de la politique de gestion. L'un des principaux défis à relever pour comprendre l'impact de la pêche sur les écosystèmes côtiers est le manque de données sur l'effort de pêche (Stewart et al., 2010).

La cartographie de l'activité de pêche donne une haute résolution spatiale et temporelle de l'effort de pêche, ce qui est très utile pour gérer durablement les ressources exploitées. La cartographie de l'effort de pêche côtier est une approche pour quantifier l'intensité relative à la pression de pêche sur de grandes zones (Stewart et al., 2010). La pratique de cette méthode peut contribuer à améliorer la quantité et la qualité des journaux de bord récupérés, à obtenir l'accès à des estimations de l'effort de pêche indépendantes de la pêche et à une déclaration rapide des captures/efforts, ce qui permet une gestion régionale et une compréhension de la dynamique de la flotte et du comportement des navires (Chang, 2011).

En général, la caractérisation des pêches à petite échelle est basée sur les connaissances des pêcheurs ou sur l'enquête sur les débarquements. Cette approche peut produire une représentation spatiale des pêcheries (Léopold et al., 2014). Avec les limites de ces méthodes de relevé, la disponibilité des dispositifs de géolocalisation (traceur GPS) a récemment permis d'envisager de nouvelles approches spatiales quantitatives basées sur la collecte de données de trajectoire de petits bateaux de pêche (Burgos et al., 2013). Dans la petite pêche, l'estimation de la pression de pêche nécessite des informations précises sur l'effort de pêche car les activités de pêche sont variables à petite échelle. Ainsi, comment se répartit l'intensité de pêche dans une petite pêche axée à l'exploitation de ressources récifales? Face à la disponibilité de méthodes d'estimation (spatiale et quantitative) automatique de l'effort de pêche (développé dans le chapitre I), il est possible de caractériser l'effort de pêche d'une pêcherie récifale sur une échelle étendue comme dans la baie de Toliara. Comment se

répartit l'effort de pêche dans la baie de Toliara? Dans ce chapitre, l'objectif est de spatialiser l'effort de pêche dans la baie en fonction du village de pêcheurs, de l'engin pratiqué et de la géomorphologie récifale.

2.2. Matériels et Méthodes

2.2.1. Collecte de données

Après la validation de la méthode de classification automatique des événements de pêche, le suivi de trajectoires de pirogues a été généralisé dans les huit villages de la baie de Toliara (Fig. 5).

2.2.1.1. Inventaire des pirogues et engins de pêche

Pour effectuer le suivi des trajectoires de pirogues selon les types d'engins pratiqués, il est primordial de connaître l'effectif total des pêcheurs/piroguiers et les engins de pêche dans chaque village. Ainsi, une réunion villageoise a été organisée par localité à laquelle tous les pêcheurs aux poissons récifaux ont été invités. En interrogeant chaque pêcheur, les informations (pirogue, engin utilisé,...) ont été recueillies dans une fiche d'inventaire Annexe 3 pour constituer une base de données. Alors, deux équipes de deux personnes ont été mobilisées pour faire l'inventaire par village au cours de l'année 2017 avant la réalisation du suivi global des pirogues. Chaque pêcheur a été attribué à un code pêcheur (identité unique) qui est composé du code village, code engin (Tableau 6) et le numéro du pêcheur dans l'inventaire, par exemple : S_FM_001 (pêcheur du village de Sarodrano, pratiquant du filet maillant, enregistré n°1 dans la fiche d'inventaire).

Tableau 6: Code village et code engin utilisé dans la base de données pêcheur

code village	nom village
S	Sarodrano
L	Ankilibe
H	Ankiembe-haut
M	Mahavatse 1
K	Ankiembe-bas
V	Mahavatse 2
B	Besakoa
O	Ambohitsabo

code engin	type engin
FM	Filet maillant
LN	Ligne à main
FU	Fusil-harpon
SF	Senne de fond ou chalut à moustiquaire
SP	Senne de plage

La codification de pêcheur a été réalisée comme suit (Fig. 23).

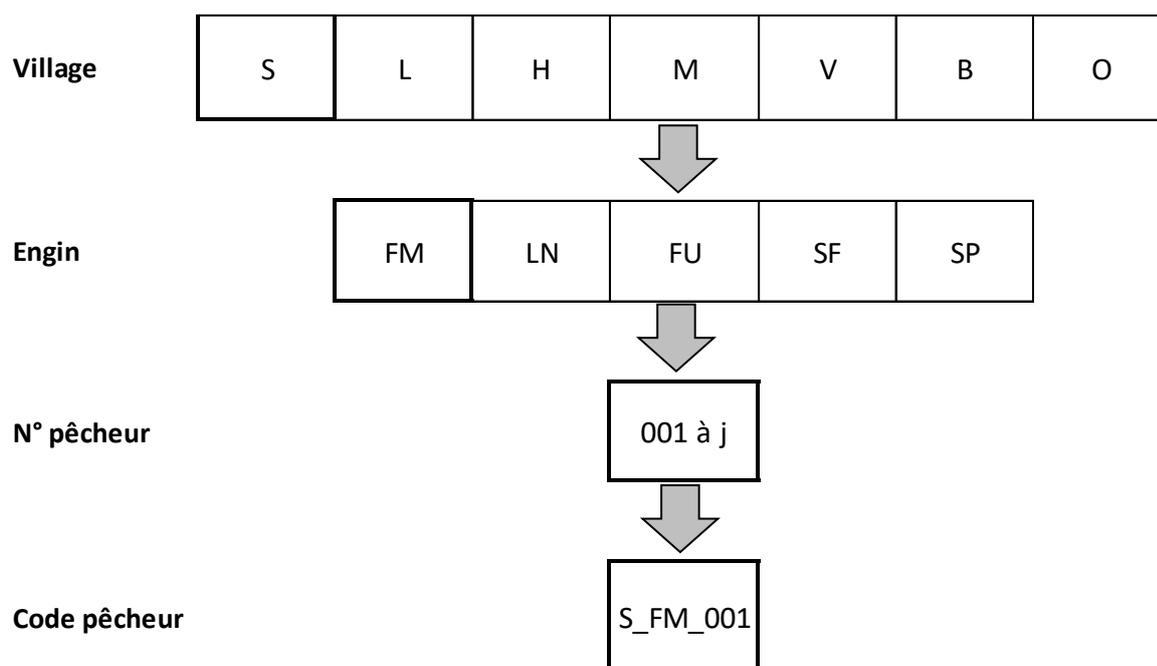


Fig. 23: Codification des pêcheurs

Par ailleurs, pour mieux décrire la flottille piroguière et les engins de pêche dans la baie, la méthode d'observation directe a été privilégiée. D'une part, elle consiste à confirmer les informations obtenues lors de l'interview avec le pêcheur durant l'inventaire ; et d'autre part à participer aux activités de pêcheurs durant la sortie en mer afin de compléter les connaissances déjà acquises sur les engins et techniques de pêche.

2.2.1.2. Suivi des trajectoires de pirogues

Un suivi des trajectoires des pirogues a été opéré pendant 12 mois consécutifs de mai 2018 à avril 2019. Les engins de pêche dominants ont été d'abord déterminés à partir des données d'inventaires des pêcheurs (possédant de pirogues) et d'engins de pêche (ciblant les poissons récifaux) dans les huit villages de la baie (Tableau 7).

Tableau 7: Nombre des pêcheurs-piroguiers par engin inventorié dans la baie de Toliara

Village	Filet maillant	Fusil-harpon	Ligne à main	Chalut à moustiquaire	Senne de plage	Total
Ambohitsabo	0	25	11	0	0	36
Ankiembe_bas	89	12	10	21	70	202
Ankiembe_haut	28	2	39	0	1	70
Ankilibe	104	6	21	108	4	243
Besakoa	13	49	18	0	1	81
Mahavatse_1	52	8	11	0	5	76
Mahavatse_2	15	28	17	0	44	104
Sarodrano	57	3	15	2	3	80
Total	358	133	142	131	128	892

Dans chaque village, un échantillon de pêcheurs pratiquant les engins de pêche dominants a été identifié sur la base du volontariat et d'une motivation monétaire. Leurs pirogues ont été ensuite équipées d'un traceur GPS enregistrant leurs positions toutes les 30 secondes en continu pendant 25 jours consécutifs (durée de l'épuisement de la batterie du GPS). Les boîtiers étanches sont maintenus sous un banc de la pirogue à l'aide d'une sangle élastique pendant la sortie en mer. Ils sont installés et désinstallés quotidiennement par chaque pêcheur pour leur sécurité.

Les aspects sociaux ont été articulés avec les aspects logistiques. L'information des pêcheurs sur le programme de suivi devraient être en cohérence avec la manipulation d'échantillons de poissons sur le terrain vers le laboratoire pour la photographie. L'enregistrement des données de trajectoires par les GPS dépend de l'autonomie de la batterie, ainsi la planification de leur chargement et de leur déploiement aux pêcheurs méritent une considération spécifique car le travail s'est déroulé dans un village sans électricité.

2.2.1.3. *Echantillonnage des pirogues*

L'échantillonnage des pirogues a été basé sur les engins de pêche dominants dans le village pour mieux représenter l'activité halieutique dans la zone. Les données issues de l'inventaire montrent qu'il existe 5 engins de pêche dominants : le filet maillant, la ligne à main, le fusil-harpon, le chalut à moustiquaire et la senne de plage.

Selon les statistiques obtenues, il y avait 892 pêcheurs-piroguiers (spécialisés à la pêche aux poissons récifaux) inventoriés. Au total, 100 GPS ont été déployés par mois d'une manière tournante dans la baie. Le déploiement a été réparti suivant la proportionnalité des GPS selon les engins et par village (Tableau 8).

Tableau 8: Nombre des pirogues suivis (équipés de GPS) par village

Village	Filet maillant	Fusil-harpon	Ligne à main	Chalut à moustiquaire	Senne de plage	Total
Ambohitsabo	0	16	9	0	0	25
Ankiembe_bas	46	9	7	19	31	112
Ankiembe_haut	22	0	21	0	0	43
Ankilibe	69	6	16	64	4	159
Besakoa	9	30	16	0	0	55
Mahavatse_1	28	2	10	0	3	43
Mahavatse_2	0	21	11	0	34	66
Sarodrano	48	2	13	1	3	67
Total	222	86	103	84	75	570

Pour chaque village, les données de trajectoires GPS ont été récupérées tous les mois et téléchargées dans un ordinateur sous format csv en utilisant des noms de fichier standards (composés par le code village, code engin, numéro pêcheur et date du téléchargement de données). Dans certains cas, la récupération des données GPS est parfois tributaire de l'autonomie de la batterie qui est très variable, durant laquelle le dysfonctionnement du GPS est alerté par le pêcheur vers l'assistant local villageois et par la suite celui-ci informe l'équipe de laboratoire à IH.SM.

Une fois téléchargées et vérifiées, les données brutes ont été envoyées à la base de données Postgres dont les règles d'accès sont programmées pour chaque utilisateur.

2.2.2. Analyse de données

En général, l'analyse consiste à caractériser l'effort de pêche dans la baie de Toliara en appliquant la méthode d'identification automatique des événements pêche des pirogues par l'algorithme de Random Forest (développé dans le chapitre I). Toutefois, une analyse descriptive de la flottille et des engins de pêche est primordiale.

2.2.2.1. Détermination de la flottille de pêche piroguière

Dans la baie de Toliara, la pêcherie récifale utilise la pirogue Vezo comme moyen d'embarcation. A partir des données issues de l'inventaire, l'effectif des pêcheurs dans la baie a été analysé par village. La description de la flottille a été déterminée en fonction de l'effectif de pirogues par village et par intervalle de taille (longueur) de 0.5 m. Cet intervalle de longueur a été choisi face aux variabilités de longueurs des pirogues observées.

2.2.2.2. Analyse spatiale et temporelle

Dans les 8 villages littoraux bordant la baie de Toliara, les pêcheurs ciblent les poissons selon leurs connaissances écologiques traditionnelles avec les engins de pêche existants en parcourant la baie. Ainsi, les zones de pêche fréquentées par les pêcheurs peuvent être largement variées et sont déterminées par des facteurs incluant : le village, l'engin, la géomorphologie récifale et la temporalité (mois et saison). Bien que différents auteurs stipulent la présence de deux saisons dans le sud-ouest de Madagascar cette étude a pris en compte une saisonnalité fraîche d'avril à septembre et chaude d'octobre à mars (Ramanantsoa et al., 2018).

Il existe une différence substantielle entre les zones de pêche dans le complexe récifo-lagonaire de la baie de Toliara. Ainsi, nous avons utilisé la cartographie de la géomorphologie récifale disponible pour la zone d'étude, réalisée à partir de l'interprétation d'images satellite SENTINEL 2A (S2A_MSIL1C_20180529T071211_N0206_R020_T38KLV_20180529T094012). L'imagerie choisie a été

acquise dans la zone de Toliara le 29-05-2018 à 10h12 AM. Cette scène a été optée du fait qu'elle n'est pas obstruée par les nuages et qu'elle correspond à une période de marée basse de 0,8m.

2.2.2.3. Spatialisation et quantification de l'effort de pêche

La présentation cartographique est largement utilisée dans la recherche de systèmes de suivi des navires. Elle montre la distribution spatiale de l'effort de pêche suivant l'engin (Lee et al., 2010; Burgos et al., 2013; Joo, 2013). Dans cette présente étude, on a spatialisé l'effort de pêche de la baie de Toliara à partir des données de trajectoires GPS des pirogues collectées pendant 12 mois de suivi.

Les données d'effort de pêche de l'échantillon des pirogues (Tableau 8) ont été extrapolées par l'inférence statistique pour l'ensemble de la flottille dans la baie de Toliara, en fonction des strates (village, engin, géomorphologie récifale) qui peuvent caractériser les activités de pêche. Le rapport du nombre des pirogues suivies (équipés de GPS) par le nombre des pirogues inventoriées donne le taux d'échantillonnage. Par la suite, le taux d'extrapolation a été obtenu par l'inverse du taux d'échantillonnage. Ainsi, l'effort extrapolé par strate a été estimé par le produit de l'effort de pêche (des pirogues suivies) et le taux d'extrapolation. Ces résultats ont été cartographiés sous le logiciel SIG (QGIS) pour spatialiser l'effort de pêche en utilisant la grille carrée (555m x 555m) pour leur quantification. Cette largeur de la grille a été choisie du fait de la longueur des filets (avec les cordages) qui dépassent généralement 400m. Cette grille de 0,30 km² a été créée dans la zone d'étude pour représenter l'estimation de l'effort de pêche de la baie de Toliara.

La spatialisation et la quantification de l'effort de pêche a été obtenue par l'estimation de la durée (en heure) cumulée et de la localisation de nombres des positions des pirogues en « évènement pêche » par chaque cellule de la grille. Avec l'unité en nombre d'heure de pêche, l'effort de pêche effectif a été déterminé par les évènements pêche identifiés selon la méthode d'estimation automatique de l'effort par l'algorithme de Forêt Aléatoire développé dans le chapitre I. Notons que ce modèle arrive à détecter avec une grande précision les évènements pêche et non-pêche des trajets de pirogues, quel que soit le type d'engin.

2.3. Résultats

2.3.1. Profils des villages de pêcheurs et des sites de débarquement

Les villages de pêcheurs de la baie de Toliara se situent en bordure de mer. Ils sont dominés par les pêcheurs Vezo où la mer pour eux est à la fois un lieu de pêche et un espace de déplacement. La population est traditionnellement organisée suivant le lignage, chaque famille possède une parcelle de terrain délimitée par des haies ou des barrières constituées de branchages. On retrouve dans chaque parcelle les maisons des différents membres de la famille. Les maisons sont très simples, constituées par des murs en quatre côtés et de toiture en deux versants. Ces maisons sont construites

à l'aide de différents matériaux tels que : le roseau (*Typha angustifolia*), le tôle métallique, la planche en bois et le parpaing.

Le village de Sarodrano est installé dans l'extrême nord de la flèche sableuse où le site de débarquement (600 m) se trouve généralement dans la partie nord-ouest. On y observe des activités alternatives comme l'algoculture et l'holothuriculture qui se sont développés depuis quelques années.

Pour Ankilibe, il a été créé au niveau de la partie médiane de la baie. C'est un gros village avec un site de débarquement de 1000 m le long du rivage. Le parking vertical de pirogues a été constaté du fait de l'insuffisance d'espace (Fig. 24).



Fig. 24: Pirogues en parking vertical dans le site de débarquement d'Ankilibe

Les villages de pêcheurs à proximité de la ville de Toliara se trouvent au sud et au nord du Port (grand port commercial). Ankiembe-haut, Mahavatse 1 et Ankiembe-bas sont au sud qui se juxtaposent, leurs rivages respectifs mesurant 750m, 300m et 1100m servent de parcs de stationnement de pirogues le long de la digue de protection. L'absence d'espace a été manifestée depuis quelques années. En conséquence, certains pêcheurs font recours au parking suspendu de pirogues (Fig. 25).



Fig. 25: Pirogues suspendues et sur la digue de protection (site de débarquement d'Ankiembe-bas)

Signalons qu'ils existent des pirogues qui sont ancrés et stabilisés par le mât dans la zone de balancement des marées (durant les vives eaux ou mortes eaux). Mais, cela n'était pas une bonne option pour la durabilité de la coque, ce qui a obligé les pêcheurs à remonter leurs embarcations à terre. Les villages au nord du Port sont Mahavatse 2, Besakoa et Ambohitsabo. Si le site de débarquement des pirogues de Mahavatse 2 se trouve le long d'un petit rivage de 400m, celui de Besakoa s'aperçoit le long du chenal jusqu'à l'arrière mangrove. Seul le village des pêcheurs d'Ambohitsabo est assez éloigné de la mer (à 2.5 km du rivage). Les pêcheurs utilisent la plage de la batterie pour servir de site de débarquement qui mesure 1200m. L'espace y est encore relativement vaste où le parage de pirogues ne pose pas encore de problème.

Sur le plan démographique, selon les données collectées auprès des autorités locales (Président Fokontany) de chaque localité, les 8 villages de pêcheurs de la baie de Toliara comptent aux environs de 37 000 habitants.

Les villages de pêcheurs de la baie de Toliara ont connu ces dernières décennies une croissance démographique importante. Un exode rural en lien avec les aléas climatiques et la perte de zone agricole dans l'arrière-pays à entrainer la population à s'installer vers la ville et le littoral pour trouver de l'emploi. Il n'est pas facile de trouver du travail, d'autant plus que la capacité de ces nouveaux résidents (majoritairement agro-pasteurs) est évidemment limitée. D'où, la grande partie de ce nouveau peuplement s'est converti en pêcheur (métier jugé facile). Comme nous montre le Tableau 9,

la population littorale de la baie de Toliara a passée de 23 916 habitants en 1998 à 36 443 habitants aujourd'hui.

Tableau 9 : Nombre de la population, des pirogues et des pêcheurs de la baie de Toliara

Année	1995	1998	2008	2018
nb_pêcheur	1556	1810	2415	2600
nb_pirogue		1171	1348	1400
nb_population		23916	22604	36443

Source :

1995 : Laroche & Ramananarivo, 1995

1998 : Rakotoarinivo, 1998 ; DRPRH, 2002

2008 : Mahatante, 2008 ; Randriambololona, 2008 ; Voajanahary, 2011

2018 : RGPH3,2018 ; Résultats de cette étude

Le nombre de pêcheurs augmente au fil des années. Par exemple, à l'est du village de Sarodrano, au pied de la falaise, a été fondé Antanandreviky, vers l'année 2000, un petit hameau de migrants venant de la localité aux abords du fleuve Onilahy (arrière-pays). Si certains font de l'algoculture ou de la main d'œuvre de nettoyage périodique des enclos de concombre de mer, d'autres exercent la pêche en exploitant la zone peu profonde par la senne de plage ou le chalut moustiquaire. Cette situation été observée aussi dans le village d'Ankilibe où on a recensé des pêcheurs migrants dans les deux secteurs sud du village dénommé Ankalalo et Namakia.

2.3.2. Caractéristiques de la flottille et des engins de pêche aux poissons récifaux

La baie de Toliara est la principale zone de pêche pour l'exploitation de ressources récifales dans le sud-ouest de Madagascar. On y enregistre 1 968 pêcheurs et 1 208 pirogues traditionnelles spécialisés à la pêche aux poissons récifaux.

Les pirogues se répartissent au niveau des villages d'une manière inégale dans la baie (Fig. 26).

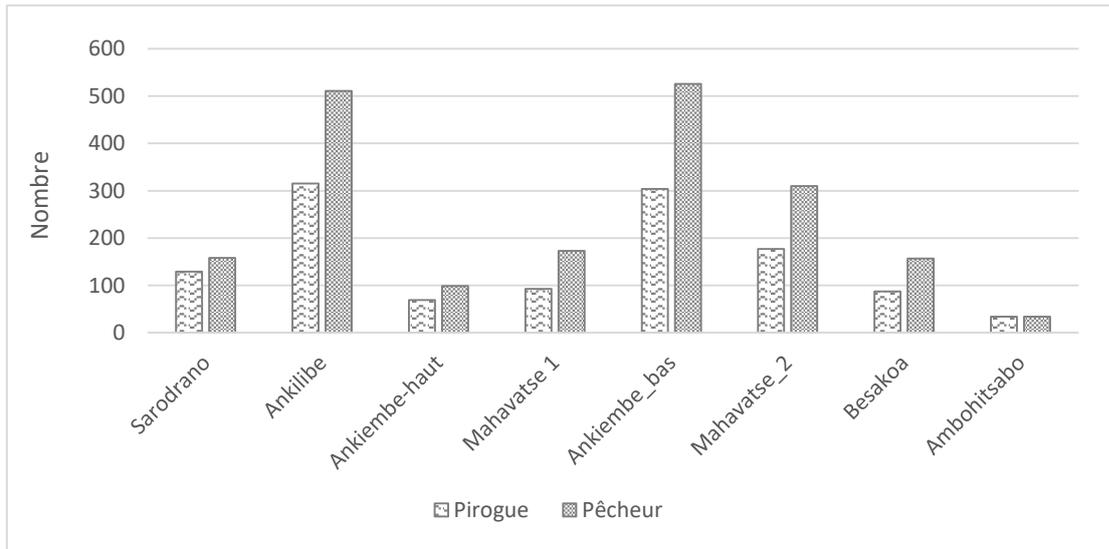


Fig. 26: Nombre de pirogues et de pêcheurs par village

La plupart des villages enregistre moins de 200 pirogues par localité sauf pour Ankilibe et Ankiembe où le nombre de dépasse 300 pirogues et où se concentrent 51% (soit 619) des pirogues dans la baie. Bien que fabriqué traditionnellement et localement, la longueur de la flotte piroguière de la baie de Toliara est très diversifiée. Elle varie de 2.5 m à 7.5 m (Fig. 27).

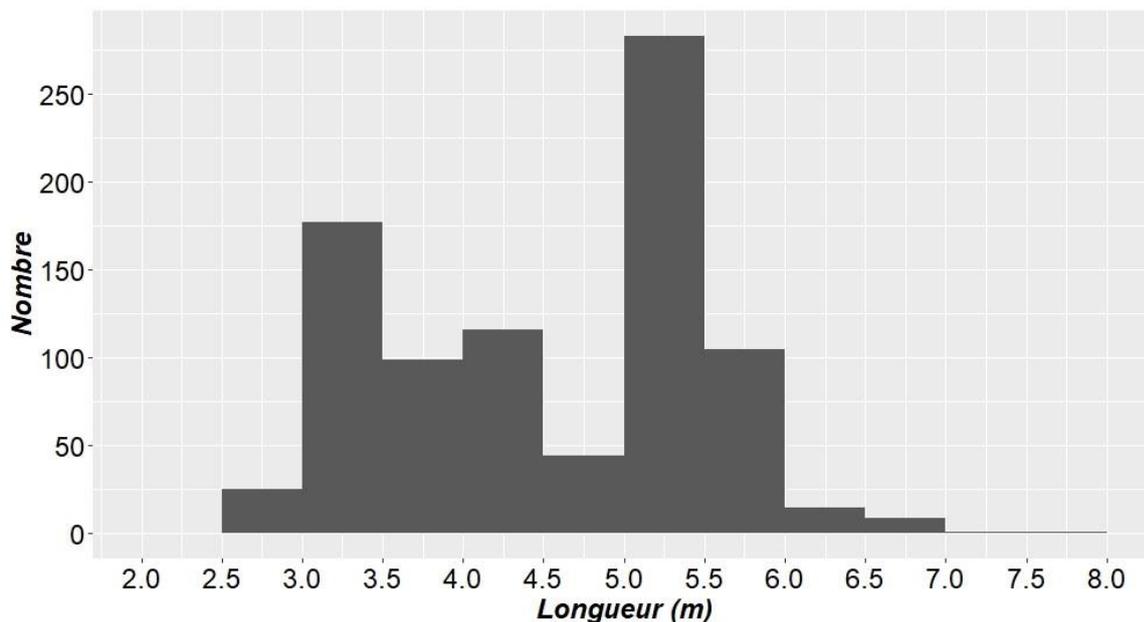


Fig. 27: Fréquence de longueur des pirogues dans la baie

La classe de longueur entre 5 et 5.5m est la plus utilisée, qui est suivie par la classe 3 à 3.5m. Le choix (achat) de pirogue dépend de l'activité de pêcheur. Ainsi, en fonction des engins de pêche, la longueur de pirogue se répartit d'une manière hétérogène (Fig. 28).

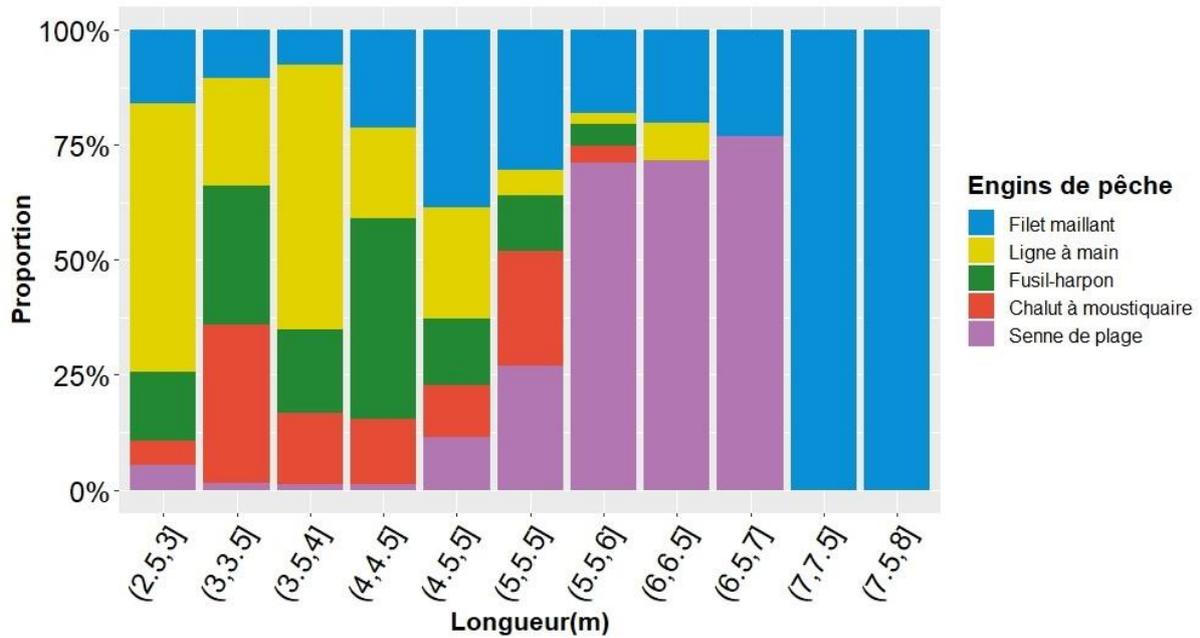


Fig. 28: Proportion de la longueur des pirogues suivant les engins de pêche

En général, on peut dire que les pirogues > 5 m sont destinées pour la pêche au filet maillant et à la senne de plage ; tandis que celles < 5 m concernent tous les engins confondus. L'utilisation de filets nécessite toujours au moins 2 personnes comme le cas de chalut à moustiquaire, voire jusqu'à 6 personnes pour le cas de la senne de plage. Le nombre de pêcheurs à bord exigé par la pêche conditionne la taille des pirogues à acquérir. La pêche aux filets entraîne l'acquisition de pirogue de grande taille. Par contre, la pêche à la ligne et au fusil-harpon qui se fait individuellement (ou au maximum 2 personnes) est faisable à bord d'une pirogue de petite taille.

Les pêcheurs ciblent les poissons récifaux en utilisant différents types d'engins de pêche. D'après l'analyse descriptive, on a déduit le pourcentage d'usage des engins ciblant les poissons récifaux de la baie (Fig. 29).

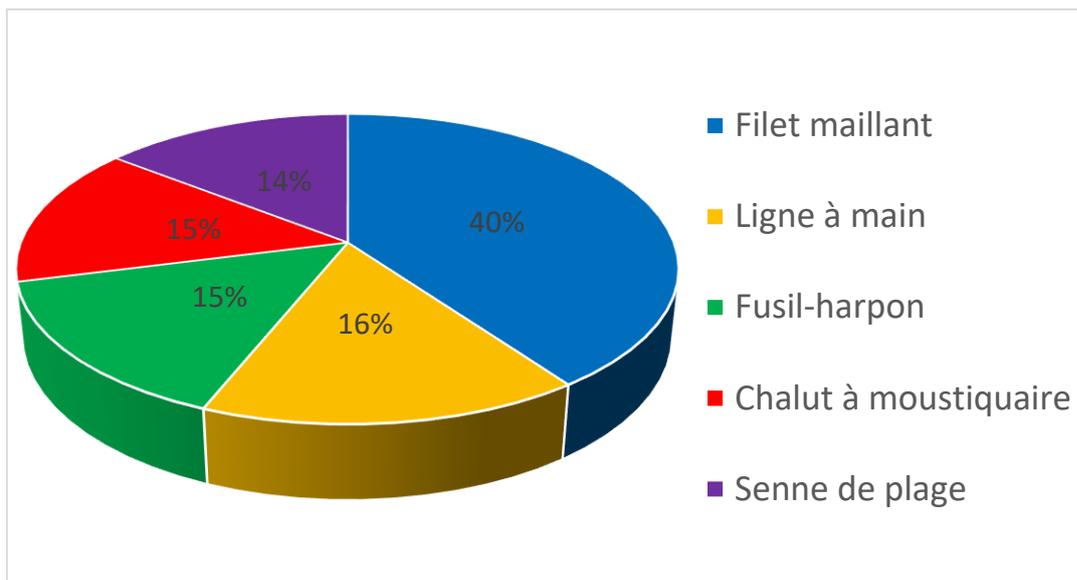


Fig. 29: Proportion d'utilisation des engins de pêche dans la baie

Le filet maillant est l'engin de pêche le plus pratiqué dans la baie de Toliara avec un taux d'utilisation de 40%. C'est l'engin jugé efficace par les pêcheurs en termes de probabilité de capture de poissons au cours de l'opération de pêche. Les taux d'utilisation des 4 autres engins sont relativement homogènes avec une proportion d'environ 15% pour chacun.

La diversité des unités géomorphologiques récifales dans la baie de Toliara a permis aux pêcheurs de développer depuis des décennies une diversité d'engins qui sont spécifiques pour chaque type de pêche. En effet, chaque village possède ses propres engins et techniques habituels et adaptés aux conditions environnementales de la zone de pêche (Fig. 30).

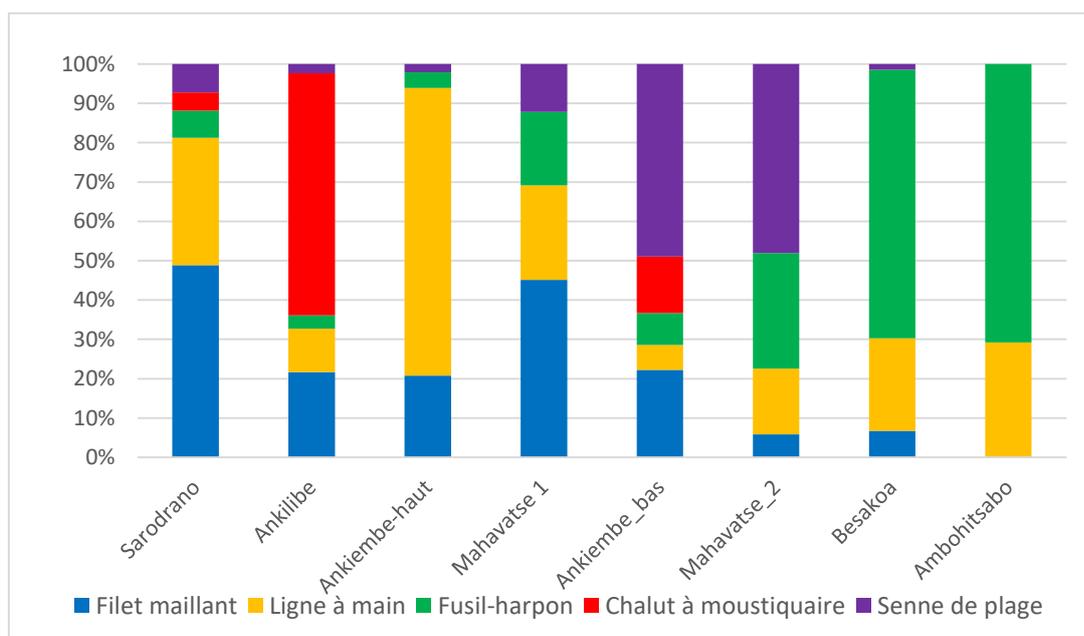


Fig. 30: Proportion d'utilisation des engins par village

En général, tous les villages de la baie pratiquent essentiellement le filet maillant, la ligne à main et le fusil-harpon ; bien que les trois villages au nord du Port utilisent peu le filet maillant. On a déduit aussi que le fusil-harpon est moins pratiqué par les pêcheurs d'Ankilibe et d'Ankiembe-haut.

Presque la moitié du filet maillant (54%) est utilisée par les pêcheurs d'Ankiembe-bas et d'Ankilibe.

Bien que l'utilisation de la ligne soit assez importante dans les autres villages (variant de 7 à 15%), la proportion maximale a été observée à Ankiembe-haut (27%) le principal liner de la baie.

Les trois villages au nord du Port (Mahavatse 2, Besakoa, Ambohitsabo) ont de faibles taux d'usage du filet maillant. Par contre, ils sont très actifs pour la pêche en plongée en apnée à l'aide de fusil-harpon atteignant au total 77% d'utilisation. Notons que le village de Besakoa a représenté presque le 1/3 de la proportion d'utilisation du fusil-harpon dans la baie avec une valeur de 37%.

Les chaluts à moustiquaires ne sont généralement présents que dans les villages d'Ankiembe-bas et d'Ankilibe représentant 98% d'usage dont 82% appartient pour uniquement Ankilibe.

Pour la senne de plage, 89% d'utilisation sont représentés par les villages d'Ankiembe-bas et de Mahavatse 2, sachant que plus de la moitié d'utilisation (54%) de cet engin a été observée à Ankiembe-bas.

2.3.3. Distribution de l'effort de pêche global

L'effort de pêche effectif global de la baie de Toliara a été estimé à 268 421 heures dans une année.

Toutes les zones dans la baie sont presque exploitées (Fig. 31).

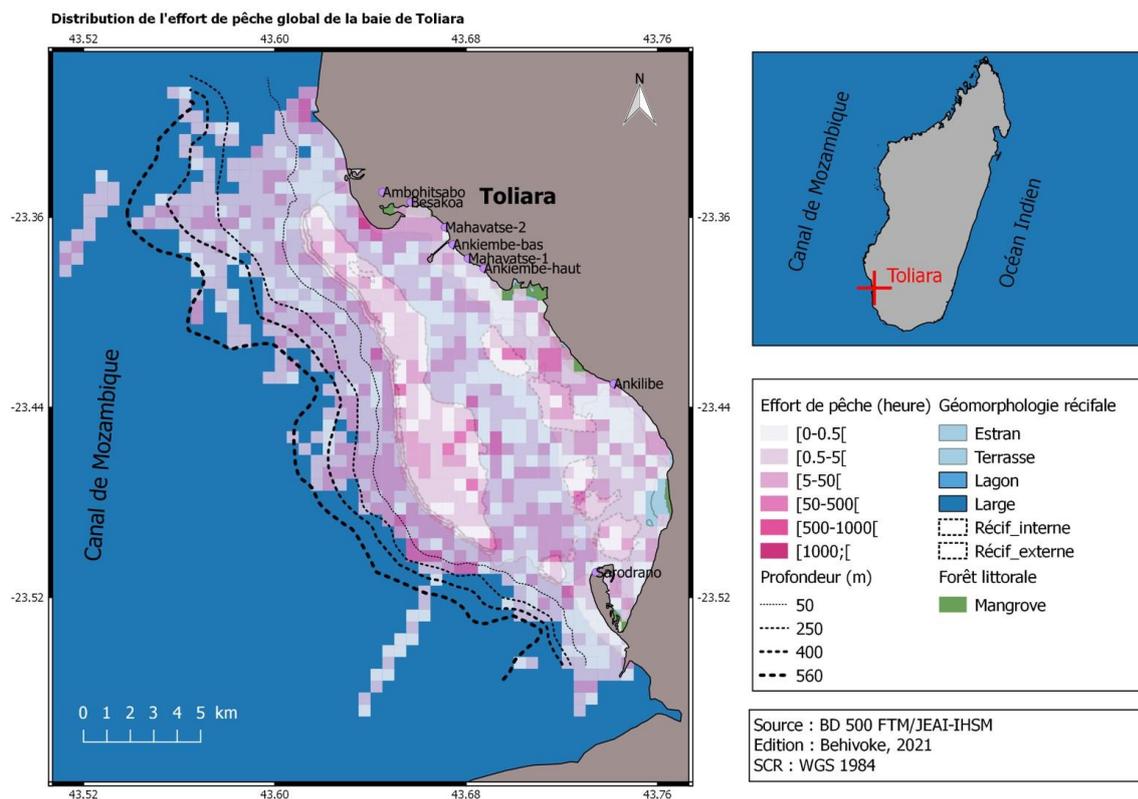


Fig. 31: Distribution de l'effort de pêche global dans la baie de Toliara

Spatialement, la zone ayant une forte intensité de pêche s'éparpille le long de la baie et au-delà de la pente externe du GRT. Cependant, l'absence d'effort de pêche au niveau de la terrasse en face de la mangrove de Belaza attire une attention particulière. Cette zone couvre 2.3 km². Il s'agit de la zone d'élevage de concombre de mer et de culture d'algue où les sociétés Indian Ocean Trepang et Ocean Farmers ont développé le modèle d'aquaculture villageoise. Comme il s'agit d'une zone aquacole, leur périmètre est délimité et évidemment surveillé. Par conséquent, aucune activité de pêche n'est possible dans cette zone.

L'analyse du déplacement des pirogues révèle que les pêcheurs exploitent la haute mer. Ils pêchent au large en pratiquant généralement la ligne ou le filet maillant. Suivant la longitude, le rivage du village d'Ambohitsabo est la plus proche du large du GRT et celui d'Ankilibe est le plus éloigné. Ainsi, les pêcheurs peuvent aller respectivement jusqu'à 9 km et 13 km de ces rivages.

Cette étude a pu confirmer que les pêcheurs des 8 villages de la baie de Toliara exercent leurs activités halieutiques de façon localisée et limitée entre les embouchures du fleuve Fiherenana et Onilahy. C'est-à-dire, les pêcheurs ne se déplacent généralement pas vers la baie de Ranobe (côté nord) ou vers la baie de St Augustin (côté sud).

Pour les 4 zones géomorphologiques analysées, l'effort de pêche est plus important dans la zone récifo-lagonaire que dans la zone au large (Fig. 32).

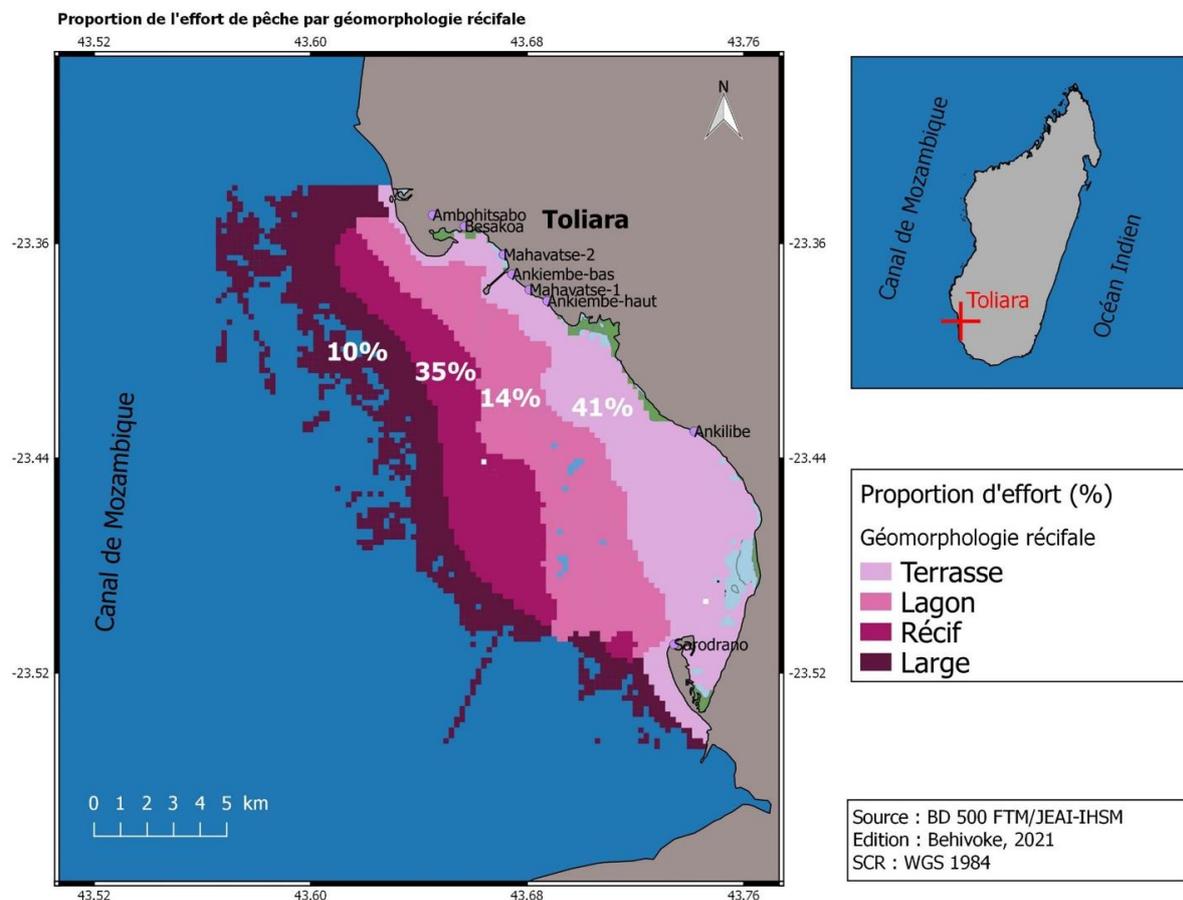


Fig. 32: Proportion de l'effort de pêche par géomorphologie récifale

Par rapport à l'effort global annuel dans la baie, la zone terrasse peu profonde est la plus exploitée avec 109 522 heures (41%), suivie du récif avec 94 716 heures (35%), du lagon avec 38 079 heures (14%) et enfin du large avec 25 924 heures (10%). Suivant la géomorphologie récifale, l'effort de pêche global annuel par se répartit inégalement selon la zone. En effet, la pression de pêche est plus importante dans les zones à faible profondeur que dans les zones profondes. La forte pression de pêche au niveau de la terrasse et du récif est due aux habitudes des pêcheurs à chercher les poissons ciblés dans leurs principaux habitats (récif, herbier).

Au niveau du lagon et au large, la pression de pêche est au contraire faible parce que ces zones sont profondes, ce qui réduit la motivation des pêcheurs à utiliser leurs engins de pêche. Seuls les pêcheurs ayant de forte capacité en plongée en apnée fréquentent habituellement le lagon et le large. De plus, les zones de pêche du large ne sont pas facilement accessibles pour des raisons logistique et climatique. Notons que les pêcheurs contournent la passe sud ou la passe nord pour sortir au large, et

les fausses passes du grand récif (Anjamananja et Ankolatse) sont difficilement accessibles à cause de leur fort hydrodynamisme.

En haute mer, certains pêcheurs ont peur de subir de contrainte de retour au village du fait du changement brusque de l'état de la mer. «Ils affirment qu'actuellement il est difficile de prévoir la météo marine suivant la connaissance traditionnelle même si celle-ci a été transmise ou acquise durant les expériences en mer». Entre autres, la pêche au large nécessite de pirogues robustes et agiles dont la majorité des pêcheurs de la baie ne dispose pas.

2.3.4. Distribution de l'effort de pêche par engin

Dans la baie de Toliara, l'effort de pêche effectif global annuel par engin se répartit relativement autour de 45 000 heures à l'exception du filet maillant qui dépasse 90 000 heures (Fig. 33).

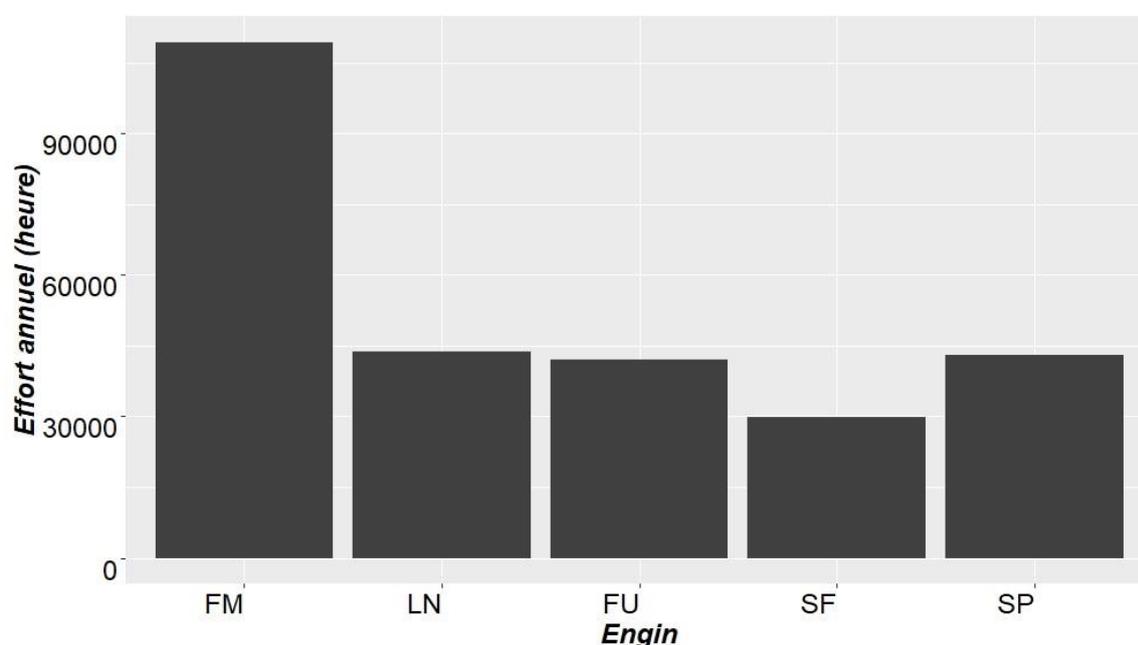


Fig. 33: Effort de pêche total par engin

Généralement il existe une différence significative entre les 5 engins d'après le test de Kruskal-Wallis ($p < 0.05$). Mais, la comparaison par pair de Wilcoxon a montré qu'il n'y a pas de différence significative entre le fusil-harpon et la senne de plage ($p > 0.05$) (Tableau 10).

Tableau 10: Test de comparaison deux à deux entre l'effort de pêche des engins

	FM	LN	FU	SF
LN	1.7e-11	-	-	-
FU	< 2e-16	< 2e-16	-	-
SF	< 2e-16	< 2e-16	< 2e-16	-
SP	< 2e-16	1.1e-05	<u>0.084</u>	< 2e-16

A l'échelle temporelle, durant la période de suivi, la variation intra annuelle a montré une allure relativement variable de l'effort de pêche où on a remarqué les maximums d'activités au mois d'août 2018, novembre 2018 et mars 2019 (Fig. 34).

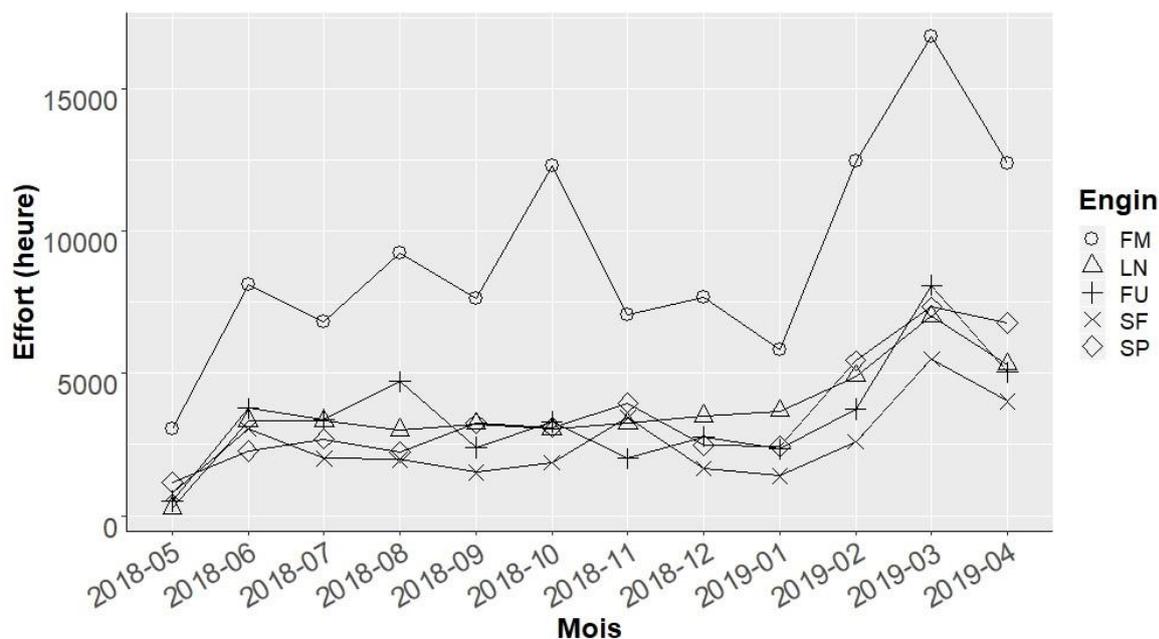


Fig. 34: Variation intra annuelle de l'effort de pêche par engin

Généralement, une baisse relative de l'effort de pêche a été constatée au mois de septembre 2018 et janvier 2019. Cette situation est due à l'affaiblissement du nombre de sorties en mer des pêcheurs à cause des conditions hydrométéorologiques extrêmes (vent violent et forte pluie). Par contre, des pics ont été observés au mois de mars 2019 pour tous les engins.

2.3.4.1. Effort de pêche du filet maillant

Etant donné que le filet maillant est classé l'engin de pêche le plus dominant, son usage est généralement visible dans toute la baie à l'exception de la petite zone terrasse peu profonde en face de la mangrove de Belaza et d'Ankilibe (Fig. 35).

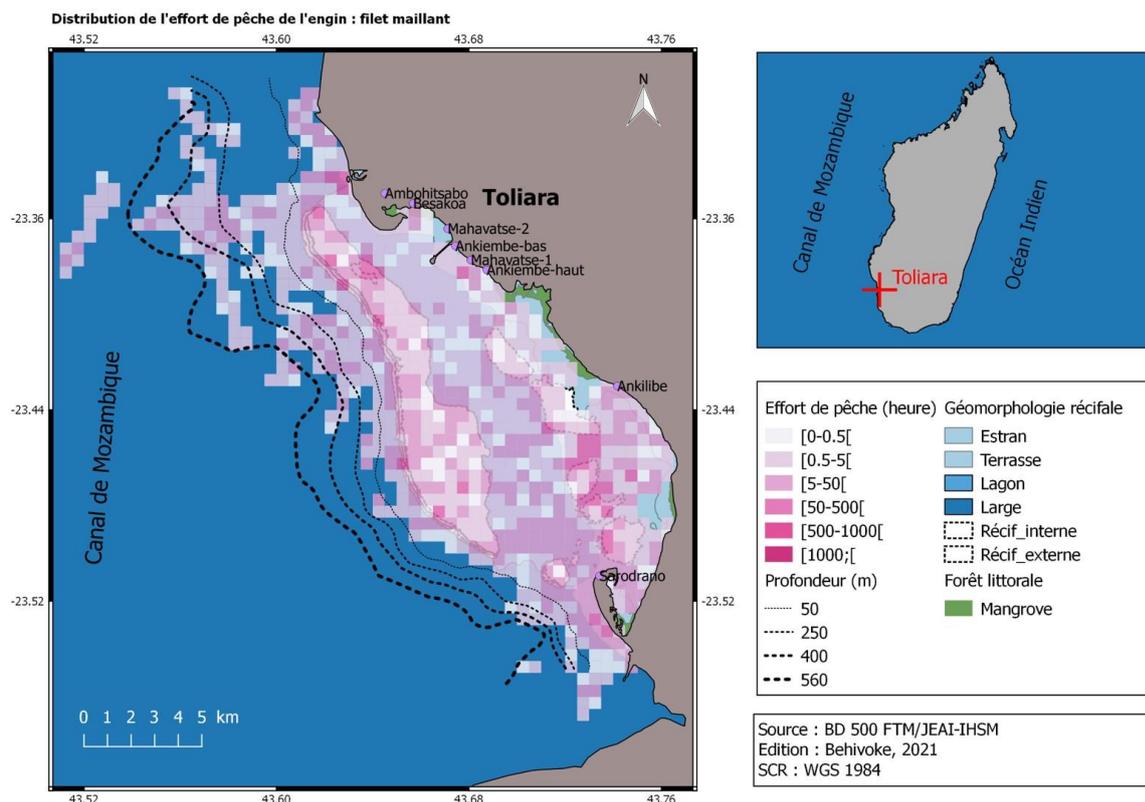


Fig. 35: Distribution de l'effort de pêche du filet maillant

L'effort de pêche élevé se concentre au niveau de la zone de pêche du village de Sarodrano, aux alentours du récif interne de Norinkazo et le long du platier externe du GRT, bien qu'il existe quelques fortes intensités (très isolées) aussi bien au niveau du lagon qu'au large.

L'effort de pêche effectif total correspondant à l'utilisation du filet maillant a été estimé à 109 476 heures, ce qui représente 41% de l'effort global annuel dans la baie de Toliara.

2.3.4.2. Effort de pêche de la ligne à main

Pour la pratique de la pêche à la ligne, la distribution de l'effort a été visualisée dans toutes les zones de la baie avec une faible présence le long de la terrasse peu profonde allant du village de Sarodrano en passant par Ankilibe jusqu'à Ankiembe-haut (Fig. 36).

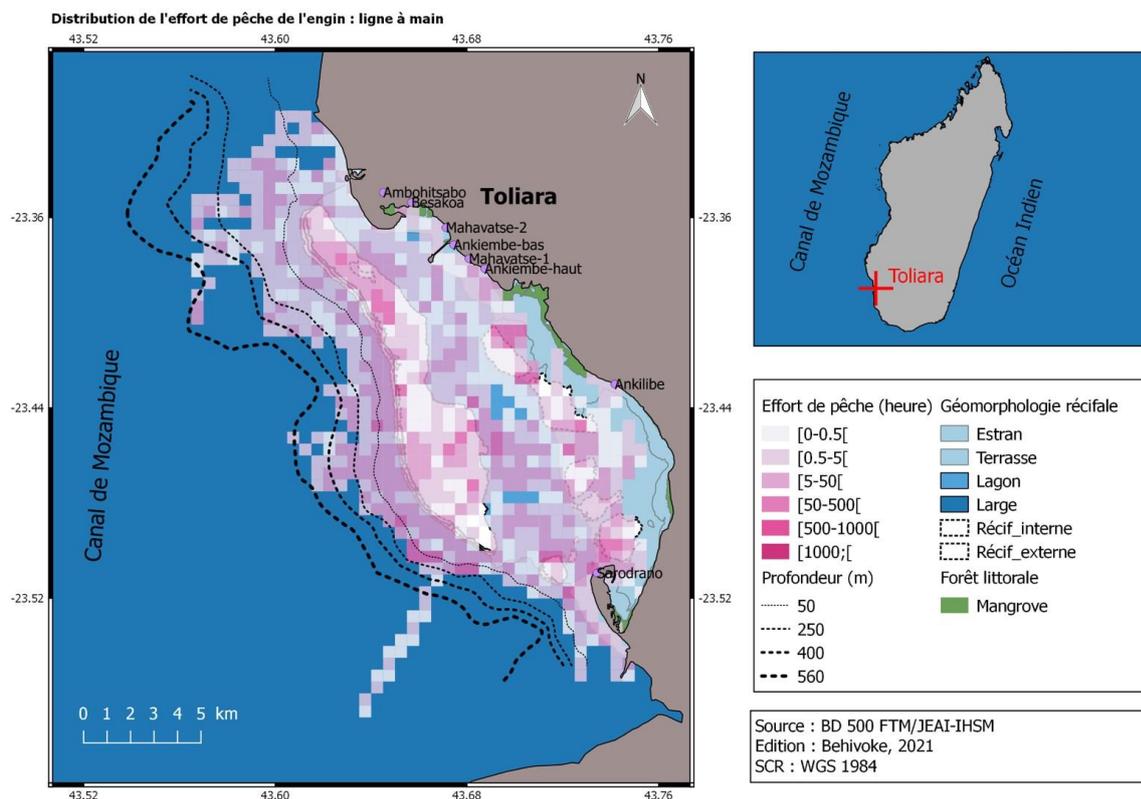


Fig. 36: Distribution de l'effort de pêche de la ligne à main

Spatialement, les fortes intensités de l'effort de pêche ont été localisées dans le lagon notamment dans le chenal entre la formation récifale. Par ailleurs, elles ont été aussi observées dans la zone au large suivant la longueur du GRT.

L'effort de pêche effectif de la ligne à main a été estimé à 43 877 heures, soit 16% de l'effort global annuel.

2.3.4.3. Effort de pêche du fusil-harpon

Les actions de pêche relatives au fusil-harpon sont généralement réparties au niveau du grand récif et du lagon sauf sur la terrasse peu profonde (incluant accessoirement les bancs coralliens et les récifs internes de la baie) (Fig. 37).

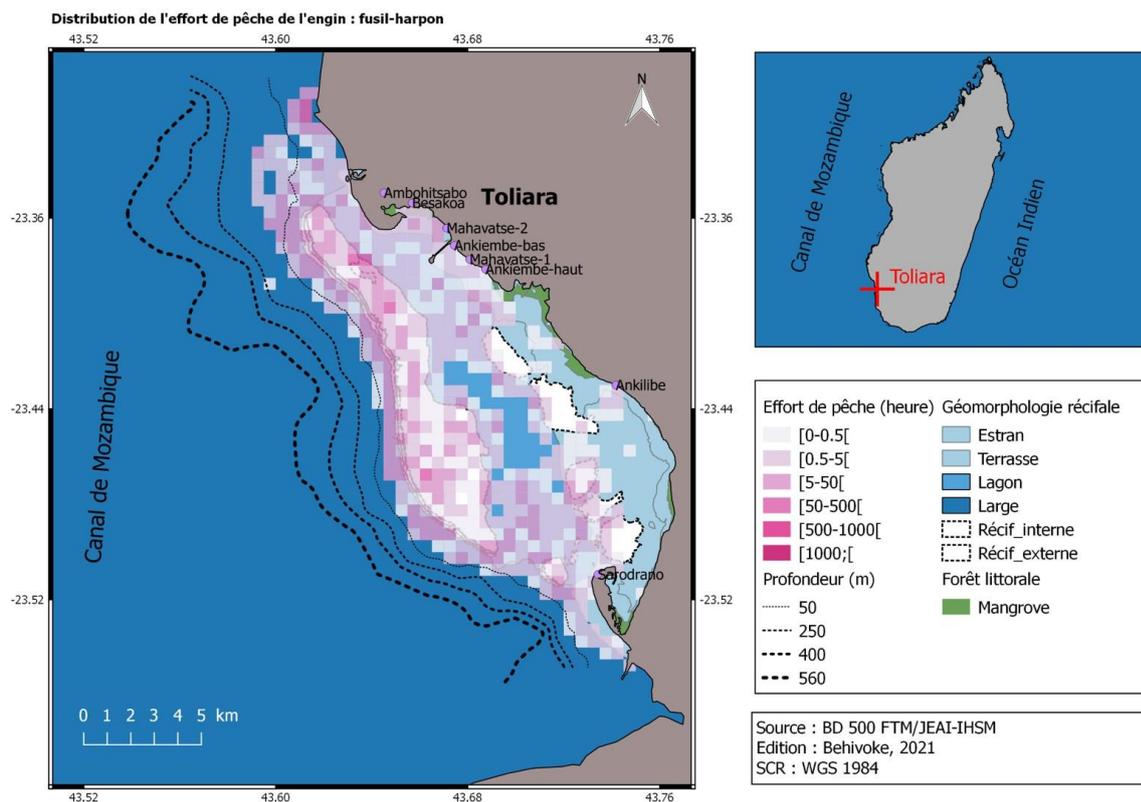


Fig. 37: Distribution de l'effort de pêche du fusil-harpon

Comme pour la distribution de l'effort de pêche des engins précédents (filet maillant et ligne), la faible action de pêche dans la zone peu profonde est due à sa nature géomorphologique de faible profondeur où la pêche en plongée en apnée, l'usage du filet maillant et la pêche à la ligne ne sont pas appropriées techniquement.

Pour le fusil-harpon, l'effort de pêche effectif total a été évalué à 42 108 heures, soit 16% de l'effort global annuel, ce qui est presque au même niveau de l'effort de pêche de la ligne à main.

2.3.4.4. Effort de pêche du chalut à moustiquaire

La pêche au chalut à moustiquaire est vraiment spécifique dans la baie du faite qu'on a la localisé uniquement dans les zones à faible profondeur (Fig. 38).

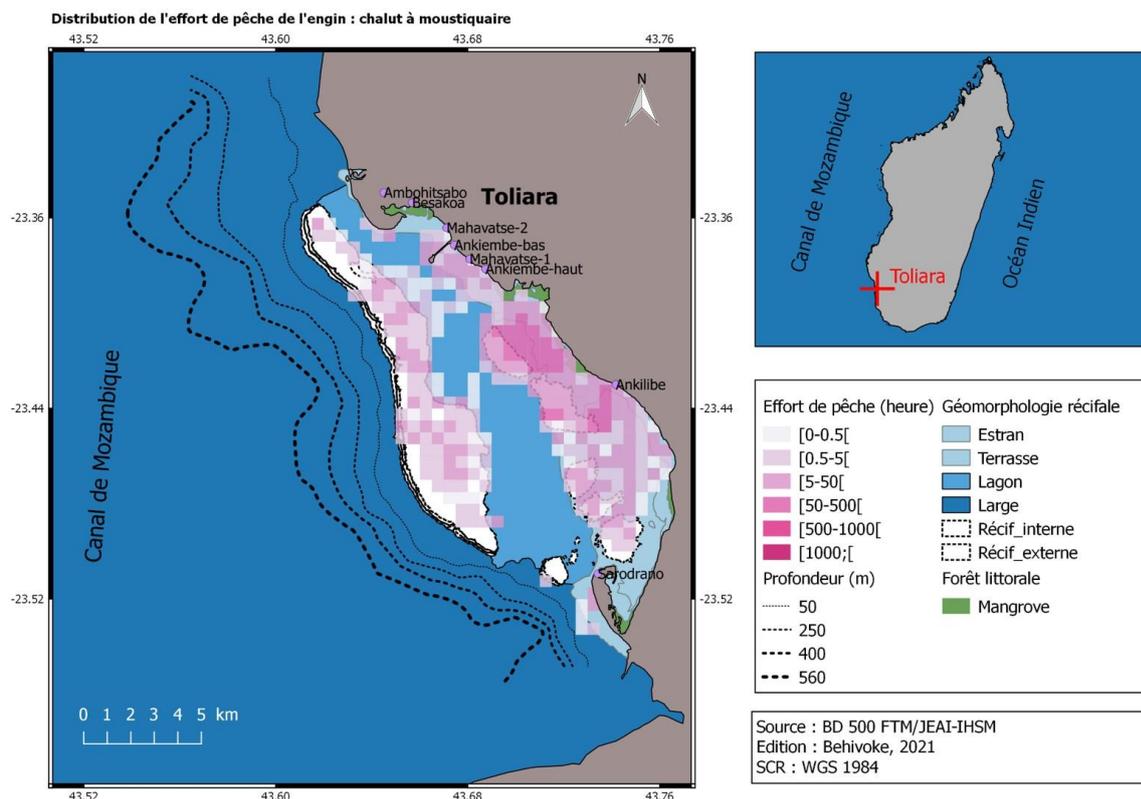


Fig. 38: Distribution de l'effort de pêche du chalut à moustiquaire

Les actions de pêche du chalut à moustiquaire sont observées exclusivement sur la terrasse peu profonde en l'occurrence au niveau du village d'Ankilibe et au niveau du platier interne du GRT où l'effort de pêche est considérablement dense. C'est qui revient à dire que, l'effort de pêche est quasi inexistant dans le lagon et au large. Ainsi, son effort effectif total correspond à la valeur minimale estimée dans la baie, soit 11% de l'effort global annuel équivalent à 29 810 heures.

2.3.4.5. Effort de pêche de la senne de plage

Les activités de pêcheurs pratiquant la senne de plage se situent globalement sur la terrasse au voisinage d'Ankilibe, aux alentours du port et en face de la plage de la batterie où l'effort de pêche est vraiment intense (Fig. 39).

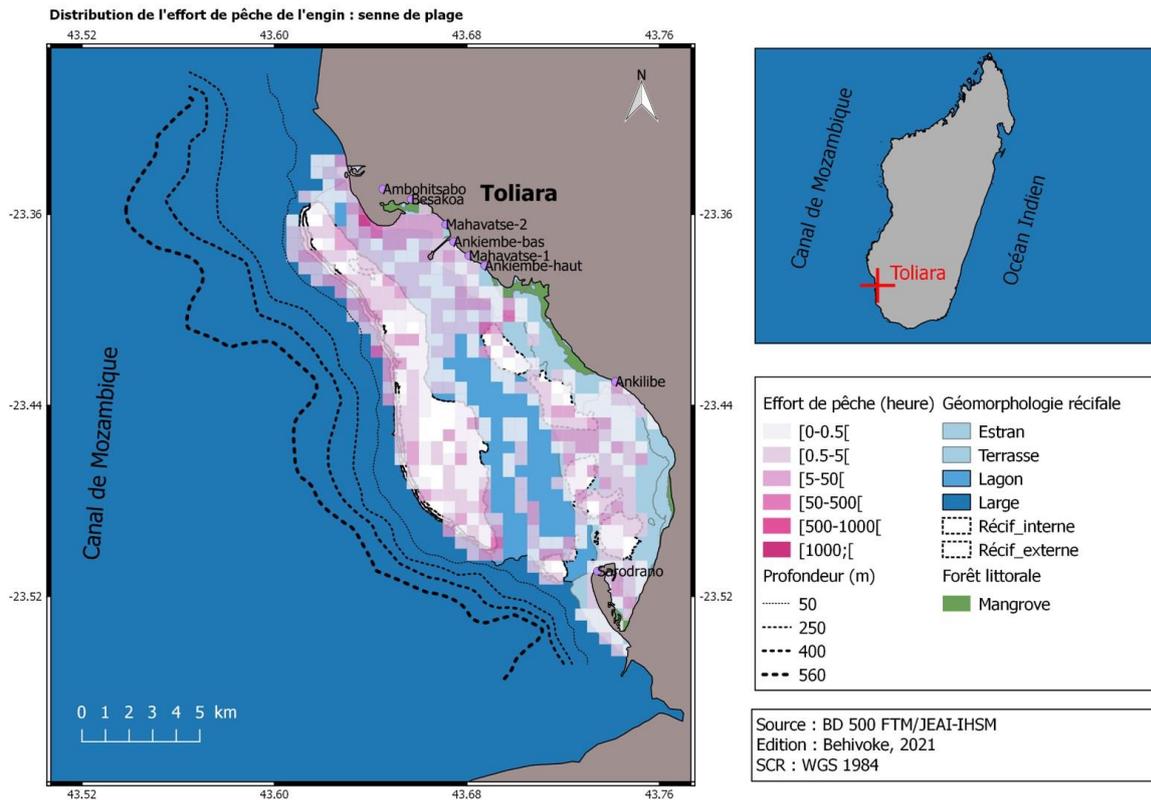


Fig. 39: Distribution de l'effort de pêche de la senne de plage

La partie sud du lagon est généralement exempt d'activité de senne de plage, même si on observe de cas isolés de la pratique de la senne de plage au niveau du GRT.

L'effort de pêche effectif de la senne de plage est estimé à 43 14 heures, soit 16% de l'effort global annuel. Cette proportion est semblable à celle de la pêche à la ligne à main (16%) et au fusil-harpon (16%).

2.3.5. Distribution de l'effort de pêche par village

L'effort de pêche varie d'un village à l'autre. La valeur minimale a été observé à Ambohitsabo et celle maximale à Ankiembe-bas (Fig. 40).

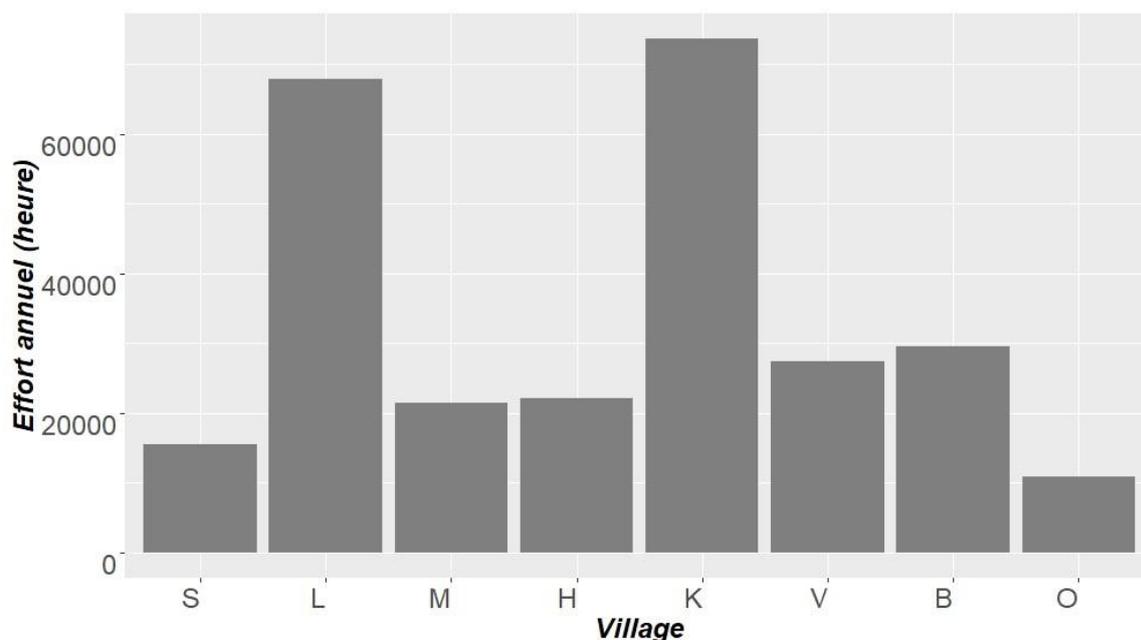


Fig. 40: Effort de pêche total par village

Pour les 8 villages, l'effort de pêche se répartit d'une manière hétérogène. Ankilibe et Ankiembe-bas détiennent respectivement l'effort de pêche le plus élevé, avec un pourcentage correspondant à plus de la moitié (53%) de l'effort global de la baie de Toliara. L'ensemble des autres 6 villages n'en représente que 47%.

Pour la comparaison globale entre les villages, le résultat a révélé une différence significative ($p < 0.05$) selon le test non paramétrique de Kruskal-Wallis. Cependant, selon la comparaison deux à deux de Wilcoxon, le test a montré des différences significatives sauf entre les villages d'Ankiembe-haut et Mahavatse 2 ainsi que de Besakoa où $p > 0.05$ (Tableau 11).

Tableau 11: Test de comparaison deux à deux entre l'effort de pêche des villages

	S	L	M	H	K	V	B
L	< 2e-16	-	-	-	-	-	-
M	< 2e-16	< 2e-16	-	-	-	-	-
H	1.8e-08	1.8e-07	< 2e-16	-	-	-	-
K	1.0000	< 2e-16	< 2e-16	1.1e-14	-	-	-
V	0.0880	< 2e-16	< 2e-16	0.0015	0.0318	-	-
B	1.0000	< 2e-16	< 2e-16	2.2e-09	1.0000	0.2352	-
O	3.0e-06	0.0302	< 2e-16	1.0000	4.6e-08	0.0075	6.3e-06

A l'échelle temporelle, on distingue généralement deux catégories de courbes (Fig. 41) :

- Le 1^{er} appartient aux 6 villages (Sarodrano, Ankiembe-haut, Mahavatse 1, Mahavatse2, Besakoa, Ambohitsabo) dont l'effort de pêche mensuel est relativement en dessous de 5 000 heures, et
- Le 2^{ème} correspond aux 2 villages (Ankilibe et Ankiembe-bas) dont l'effort de pêche dépasse largement les 5 000 heures.

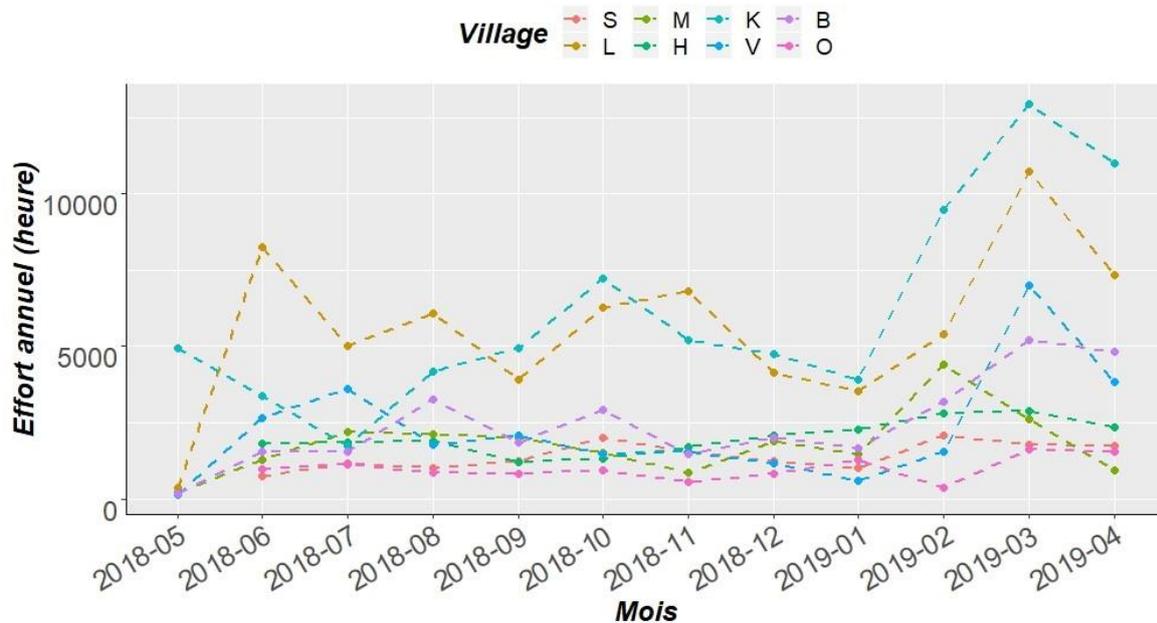


Fig. 41: Variation intra annuelle de l'effort de pêche par village

A partir du début du suivi (mai 2018), l'effort de pêche de ces 8 villages évolue de façon stable jusqu'au mois d'août 2018 où on a constaté une légère augmentation, puis une petite diminution en septembre 2018. Ensuite, à partir du mois d'octobre, l'effort a augmenté et suit un rythme progressif et d'une manière ascendante jusqu'en mois de février et mars 2019 (le pic).

2.3.5.1. Effort de pêche de Sarodrano

Les activités de pêche du village de Sarodrano sont été localisées dans la partie extrême sud de la baie (Fig. 42).

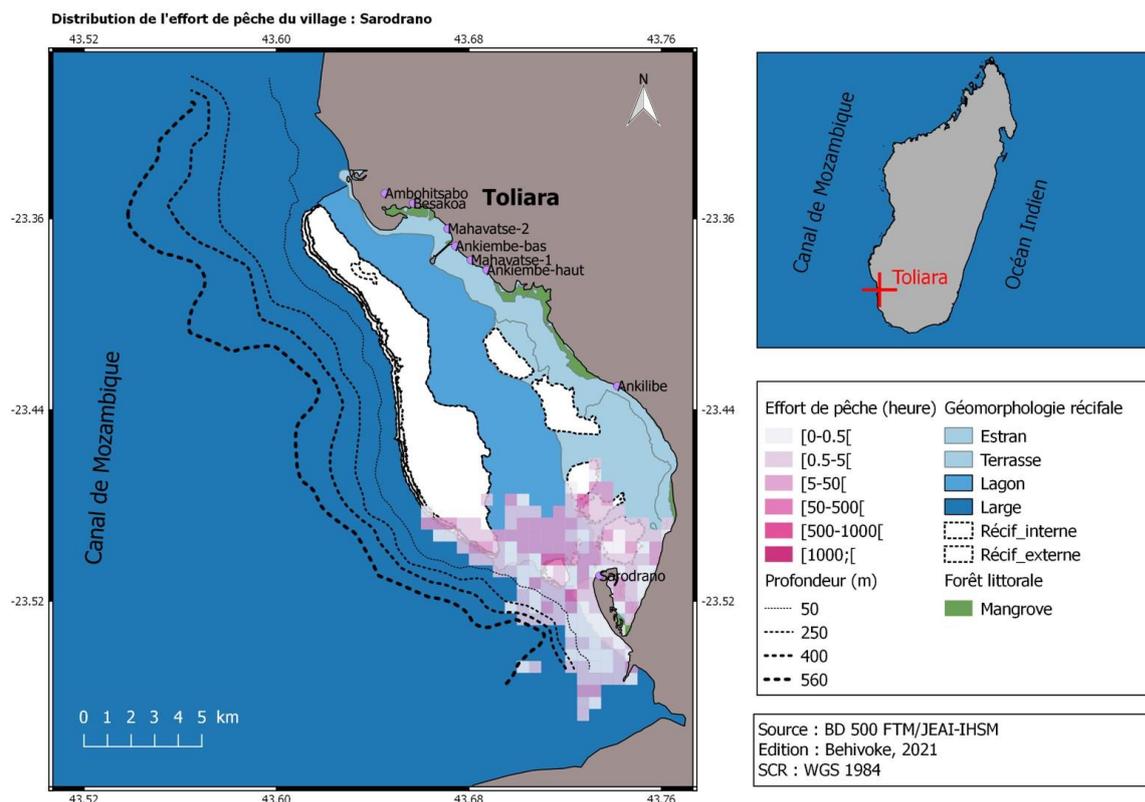


Fig. 42: Distribution de l'effort de pêche du village de Sarodrano

Spécifiquement, la distribution de l'effort de pêche se concentre dans les zones d'exploitation des ressources aux environs du village. D'après cette caractéristique, on peut dire que les pêcheurs de Sarodrano sont sédentaires parce qu'ils ne se déplacent pas au-delà de leurs zones de pêche habituelles qui sont proches de leur village.

La forte intensité de l'effort de pêche a été identifiée aux alentours du récif Nosy Tafara (localement appelé Raikaivo) et dans les espaces lagonaire (chenaux) entre les formations des îlots récifaux.

L'effort de pêche effectif du village a été estimé à 15 574 heures soit 6% de l'effort global annuel dans la baie. Les activités de pêche se sont accrues à partir du mois d'octobre 2018 où l'on a observé une augmentation, puis l'effort continue de façon quasi-stationnaire.

2.3.5.2. Effort de pêche d'Ankilibe

Bien que le village d'Ankilibe soit considéré comme l'une des localités les plus importantes dans la baie, en termes de démographie et de diversité d'engins, l'effort de pêche se répartit d'une manière bien délimitée dans la baie de Toliara (Fig. 43).

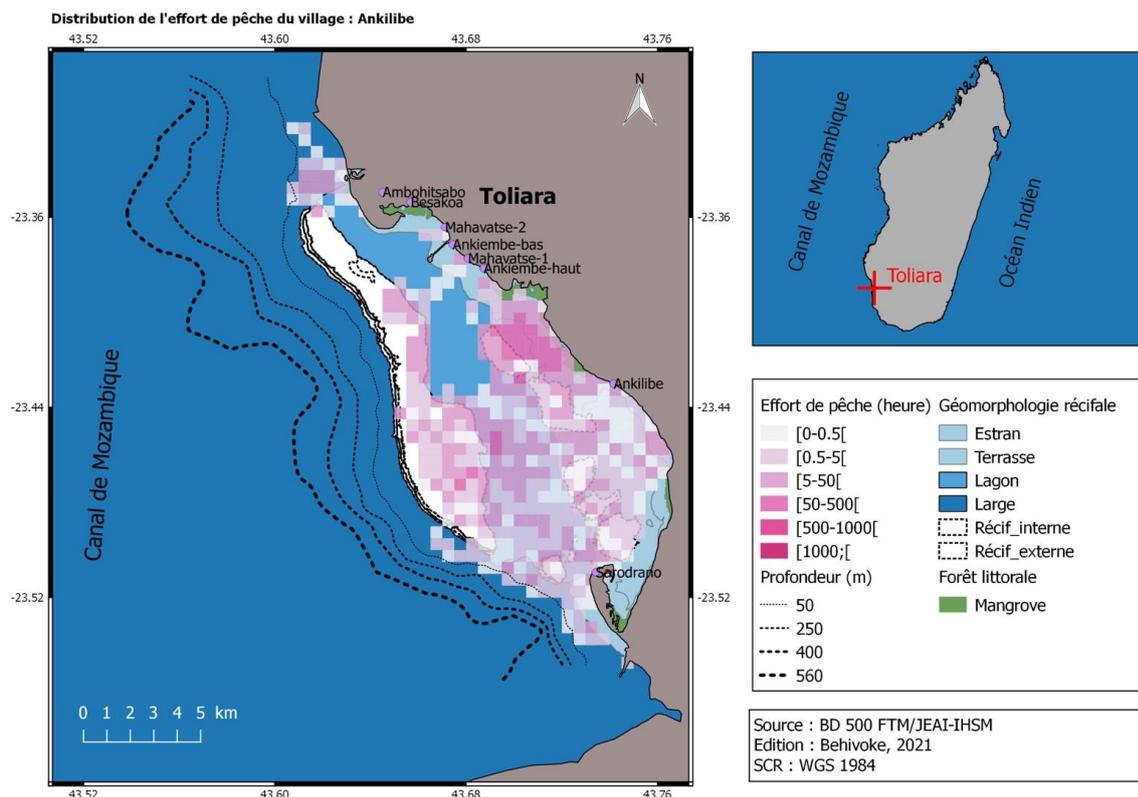


Fig. 43: Distribution de l'effort de pêche du village d'Ankilibe

Les pêcheurs fréquentent généralement la partie sud et une portion de la zone de pêche de l'extrême nord de la baie particulièrement au niveau de l'embouchure du fleuve Fiherenana. Néanmoins, les pêcheurs d'Ankilibe sont majoritairement sédentaires.

L'intensité de l'effort de pêche a été très remarquable sur la terrasse peu profonde notamment au niveau des bancs coralliens de Mareana et d'Ankilibe.

L'effort de pêche effectif du village d'Ankilibe a été évalué à 67 841 heures ce qui représente 25% de l'effort global annuel dans la baie. Sa variation intra annuelle a révélé une allure en dent de scie avec un pic exceptionnel au mois de novembre 2018.

2.3.5.3. Effort de pêche d'Ankiembe-haut

Pour le village d'Ankiembe-haut, les pêches aux poissons récifaux se répartissent aussi bien dans le lagon qu'au large du grand récif où l'effort de pêche a été également très dense (Fig. 44).

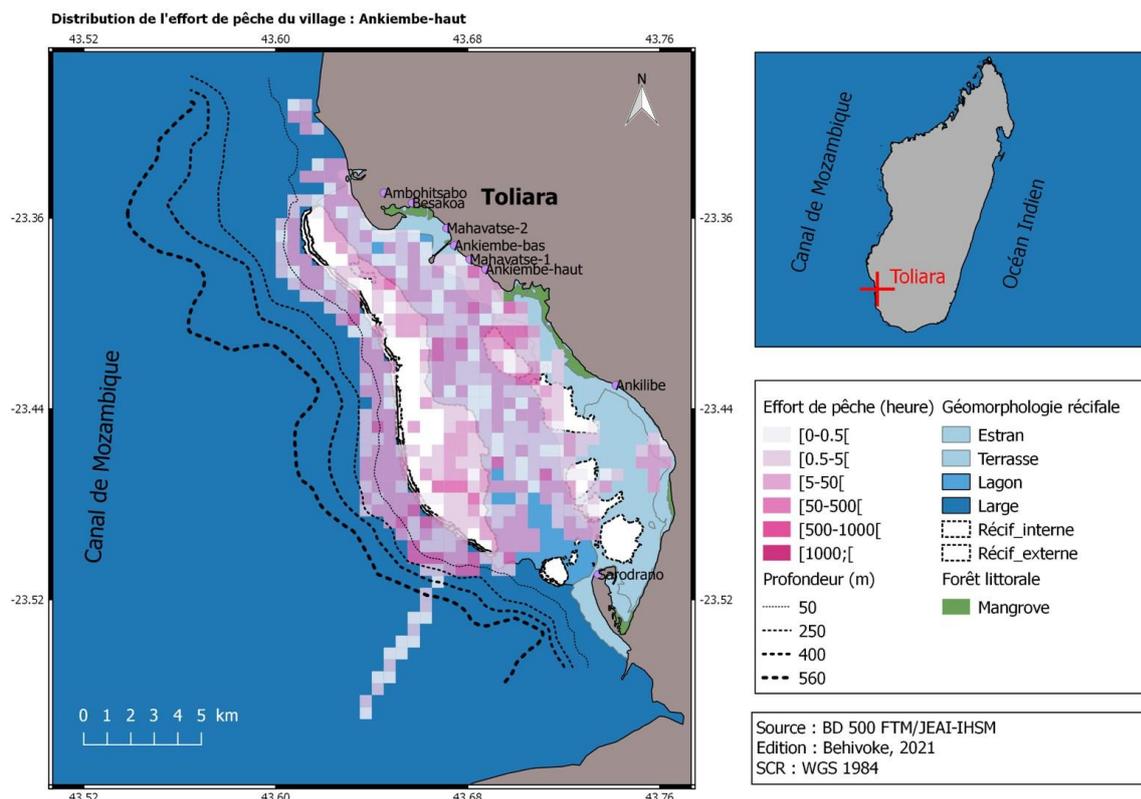


Fig. 44: Distribution de l'effort de pêche du village d'Ankiembe-haut

Les pêcheurs se déplacent habituellement du nord au sud de la baie pour cibler et exploiter les poissons dans la zone. Vu la mobilité de ces pêcheurs à l'intérieur de la baie, ils sont catégorisés comme des exploitants marins ubiquistes.

L'effort de pêche effectif d'Ankiembe-haut représente 22 099 heures soit 8% de l'effort global annuel dans la baie. Au cours de l'année, on a observé un accroissement en décembre 2018 et janvier 2019 si la variation est presque stationnaire.

2.3.5.4. Effort de pêche de Mahavatse 1

La distribution de l'effort de pêche du village de Mahavatse 1 a été observé dans toutes les zones de pêche de la baie sauf dans la zone lagonaire (y compris la terrasse peu profonde) au niveau du village d'Ankilibe jusqu'à Sarodrano (Fig. 45).

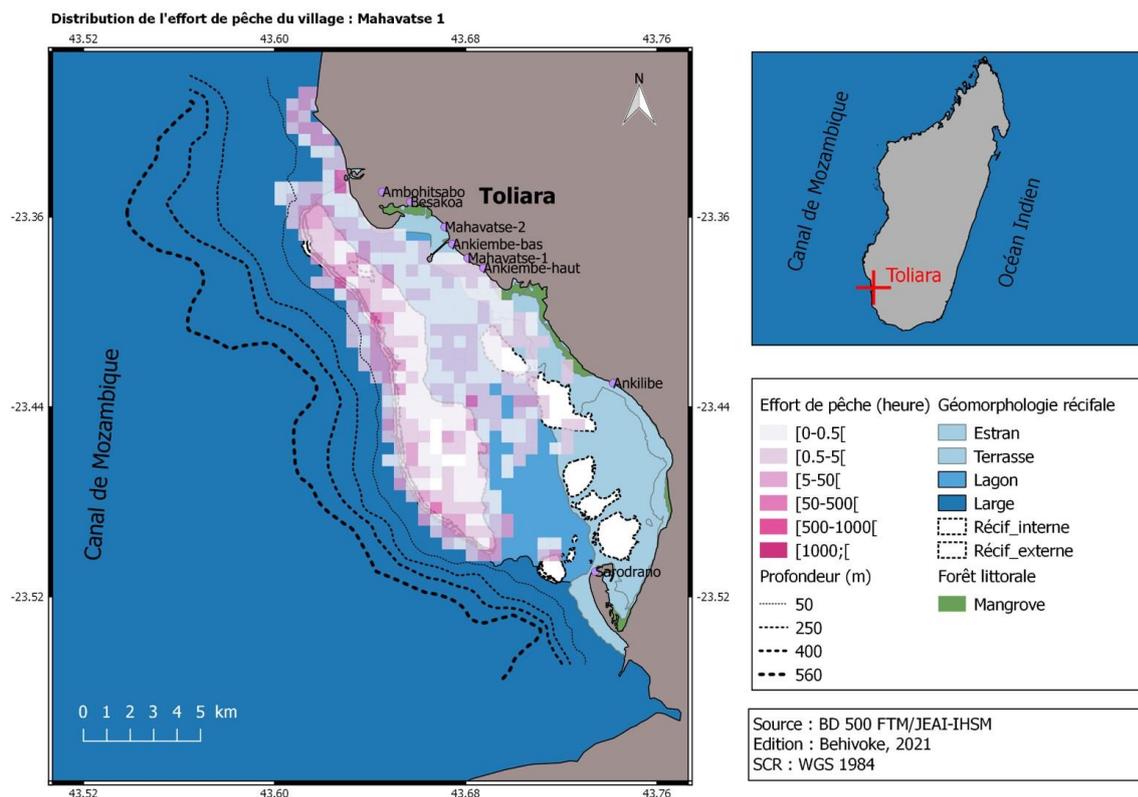


Fig. 45: Distribution de l'effort de pêche du village de Mahavatse 1

Avec l'effort de pêche effectif évalué à 21 444 heures (8% de l'effort global annuel dans la baie), c'est au niveau GRT et du lagon (partie nord) que l'effort de pêche a été très élevé. Une légère augmentation de l'effort de pêche a été constatée à partir du mois d'août 2018 atteignant le maximum d'activité de pêche en février 2019.

Le mouvement des pêcheurs Mahavatse 1 est géographiquement assez large au sein de la baie de Toliara.

2.3.5.5. Effort de pêche d'Ankiembe-bas

Pour le village d'Ankiembe-bas, les activités halieutiques s'exercent dans toute la baie à l'exception de la partie sud du lagon et de la terrasse peu profonde où elles sont relativement moins présentes (Fig. 46). Les mouvements de pêcheurs d'Ankiembe-bas sont étendus. On a localisé des actions de pêche à 5 km au large du front récifal du GRT. Ce sont des pêcheurs ubiquitaires du fait du caractère d'omniprésence des activités halieutiques dans toute la baie.

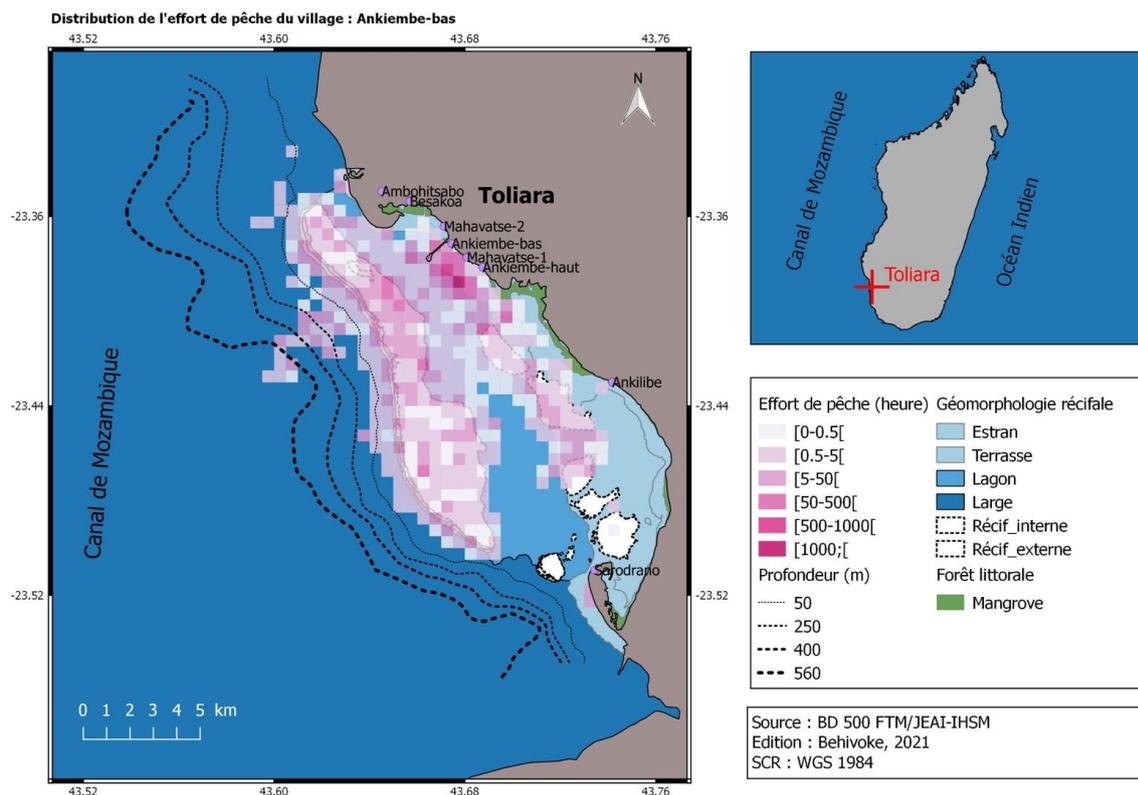


Fig. 46: Distribution de l'effort de pêche du village d'Ankiembe-bas

La forte concentration de l'effort de pêche a été spatialisée au niveau du GRT et aux alentours du Port. Le nombre de pêcheurs à Ankiembe-bas est parmi les plus élevés. Les engins et techniques de pêche utilisés sont très diversifiés. Dans la baie de Toliara, c'est pour le village d'Ankiembe-bas qu'on a évalué l'effort de pêche effectif maximal estimé à 73 627 heures ce qui représente 27% de l'effort global annuel.

Durant la période de suivi, l'effort de pêche a montré une variation ascendante atteignant un pic maximal en mois de mars 2019.

2.3.5.6. Effort de pêche de Mahavatse 2

Dans la baie de Toliara, l'effort de pêche du village de Mahavatse 2 se répartit exclusivement au niveau du grand récif et dans la partie nord du lagon au voisinage du Port (Fig. 47).

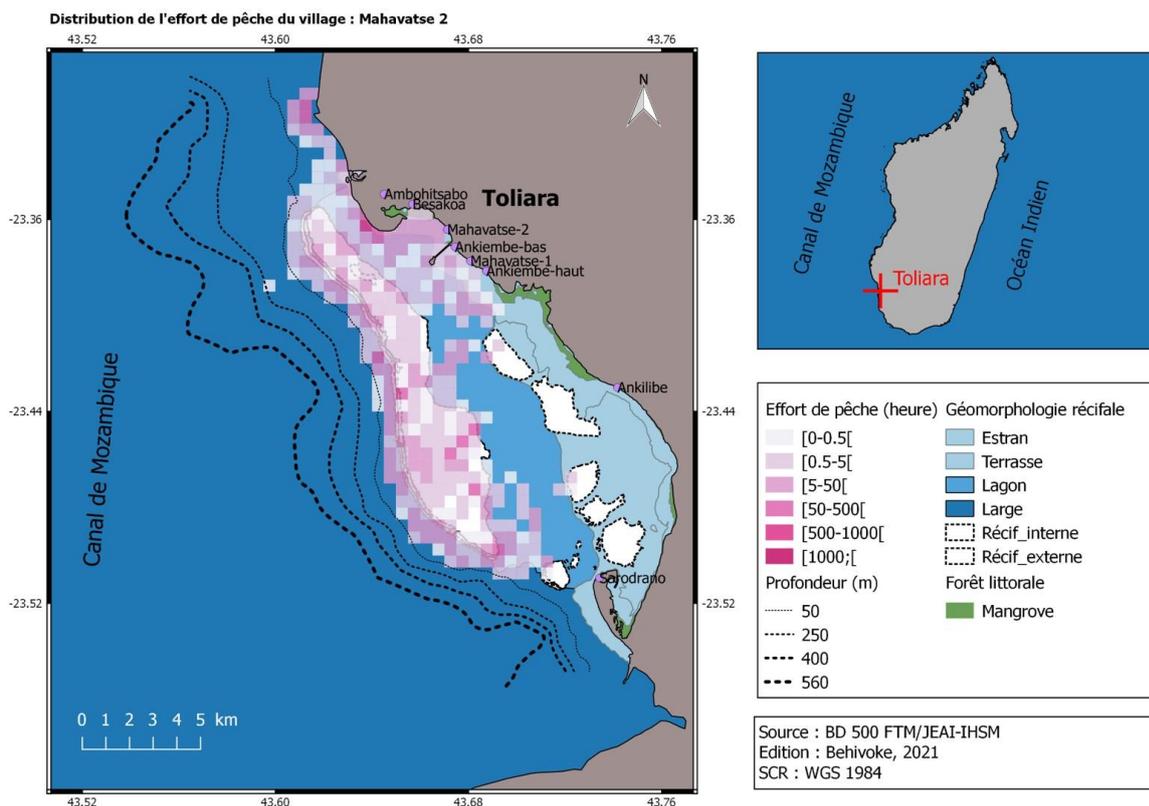


Fig. 47: Distribution de l'effort de pêche du village de Mahavatse 2

D'après la carte, on ne trouve généralement pas d'activités de pêche dans la partie sud du lagon et de la terrasse peu profonde. Bien que considérés comme des pêcheurs ubiquitaires, la forte intensité de l'effort de pêche a été repérée au nord du Port et en face de la pointe d'Anosy (plage de la batterie). Depuis le début, l'effort de pêche a évolué d'une manière stationnaire, suivi d'une baisse au mois de janvier 2018 et puis une hausse jusqu'à atteindre le pic d'activité au mois de mars 2019. L'effort de pêche effectif du village de Mahavatse 2 a été estimé à 27 339 heures, ce qui représente 10% de l'effort global annuel dans la baie de Toliara.

2.3.5.7. Effort de pêche de Besakoa

Pour le village de Besakoa, l'exploitation de poissons récifaux est généralement spatialisée dans la partie nord de la baie et au large du grand récif (Fig. 48). D'après le caractère d'omniprésence dans la partie nord de la baie, les pêcheurs du village de Besakoa sont majoritairement sédentaires. Ce sont les pêcheurs qui fréquentent davantage la zone de pêche au large du GRT où ils peuvent aller jusqu'à 7 km du front récifal.

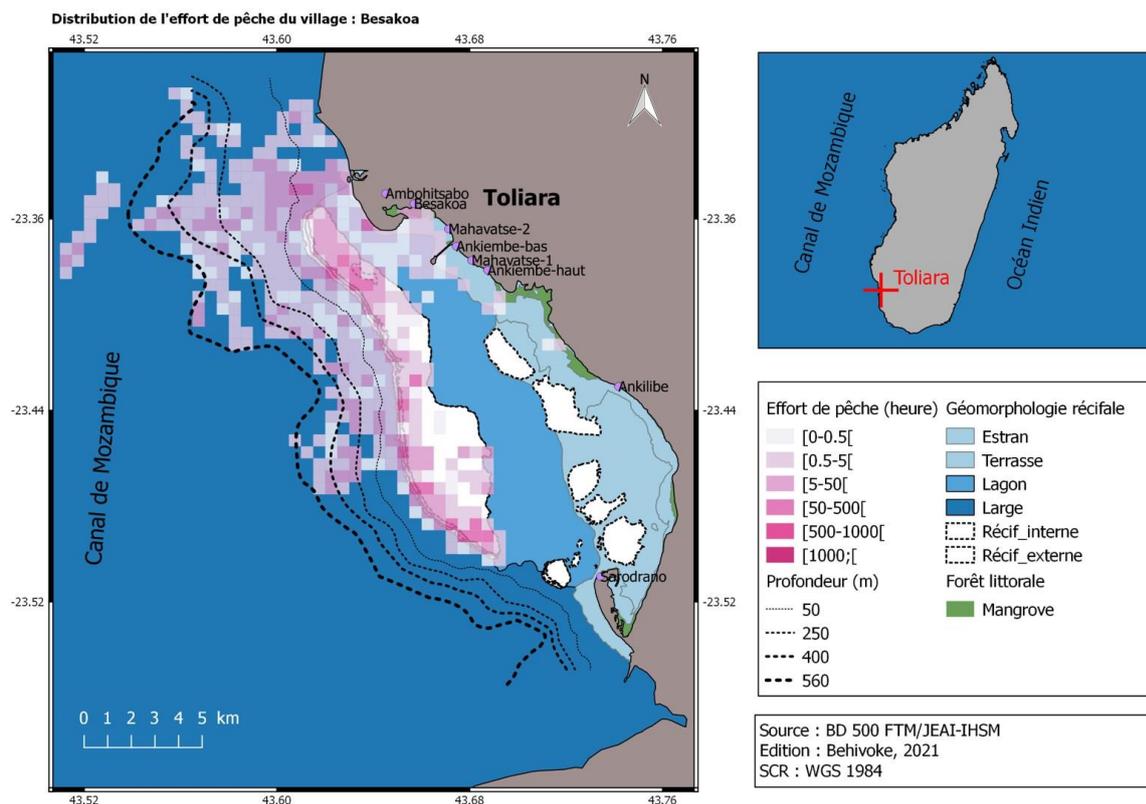


Fig. 48: Distribution de l'effort de pêche du village de Besakoa

Avec l'effort de pêche effectif évalué à 29 627 heures soit 11% de l'effort global annuel dans la baie, c'est tout au long du platier externe du grand récif et au voisinage de sa pointe nord que l'effort de pêche a été très dense.

La variation intra annuelle de l'effort de pêche montre une allure ascendante avec une légère augmentation au mois d'octobre 2018 et un maximum d'activité en mars 2019.

2.3.5.8. Effort de pêche d'Ambohitsabo

Les activités de pêche du village d'Ambohitsabo ont été localisées dans la partie extrême nord de la baie (Fig. 49). En effet, ce sont des pêcheurs sédentaires du fait du faible déplacement en pêche par rapport à leur village.

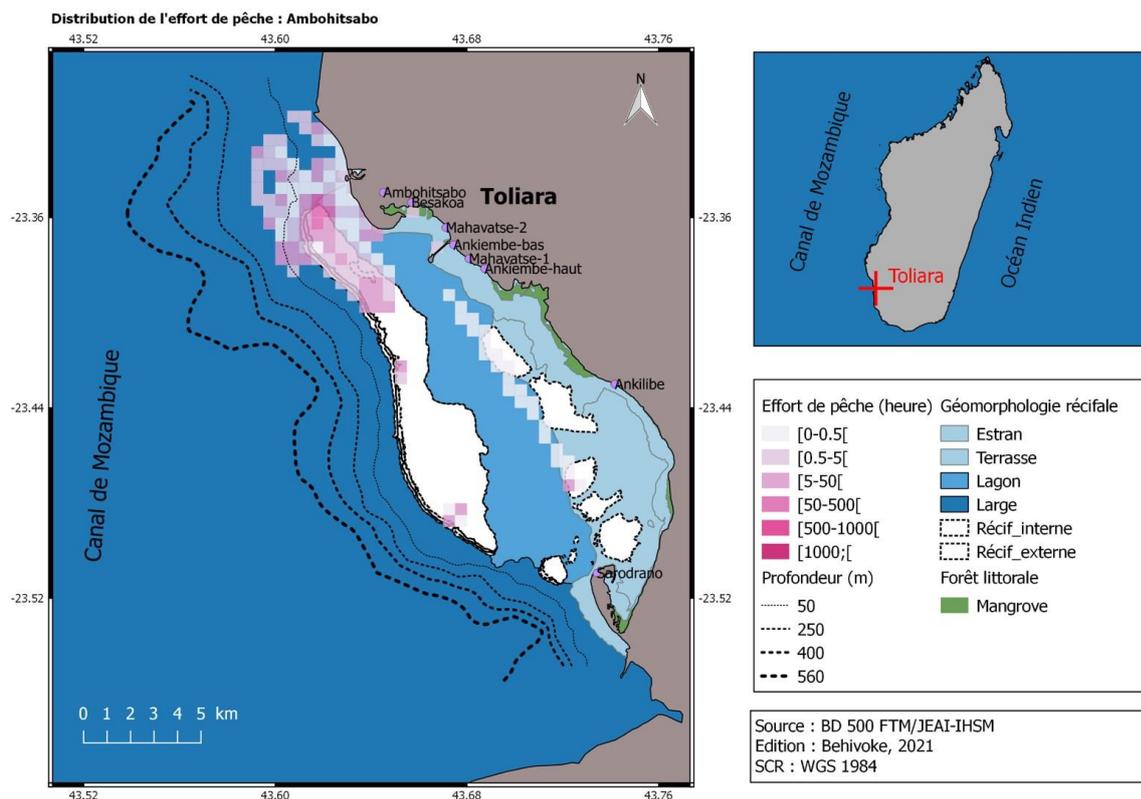


Fig. 49: Distribution de l'effort de pêche du village d'Ambohitsabo

Exclusivement, l'effort de pêche se concentre aux alentours de la pointe nord du GRT et dans les zones de pêche proches du village.

Dans la baie de Toliara, c'est pour le village d'Ambohitsabo qu'on a constaté l'effort de pêche effectif minimal estimé à 10 871 heures soit 4% de l'effort global annuel. L'effort de pêche est presque semblable durant toute l'année, toutefois on a remarqué un maximum d'activité au mois de mars 2019.

2.4. Discussion

L'effort de pêche de l'exploitation de poissons récifaux dans la baie de Toliara a été caractérisé pour savoir avec précision la répartition de la pression de pêche au niveau de l'écosystème suivant les engins utilisés par les pêcheurs.

2.4.1. Evolution de la flottille piroguière et des pêcheurs

Les pêcheurs de la baie de Toliara utilisent globalement la pirogue monoxyle à balancier (avec ou sans voile) pour exercer la pêche dans la zone récifo-lagonaire. Le nombre de la flottille piroguière de la baie de Toliara est passé de 1171 pirogues en 1998 à 1400 pirogues en 2018 ; le nombre de pêcheurs (tous confondus) de 1556 en 1990 à 2600 aujourd'hui (Tableau 9). Cette évolution du nombre de

pirogues et de pêcheurs est due à l'augmentation du nombre de la population que subit le littoral de Toliara. Le phénomène de littoralisation est très remarquable le long de la baie du fait de la croissance démographique. D'une part, la population urbaine de Toliara a augmenté de 34 000 habitants en 1960 à 326 286 habitants en 2018 (Fig. 50), et d'autre part la population rurale de St Augustin est passée de 15 305 en 2006 à 18 019 en 2018 (Tableau 12). Ces données statistiques ont leurs limites, souvent elles sont basées sur des projections, puisque il n'y avait que trois RGPH (1975, 1993 et 2018) à Madagascar.

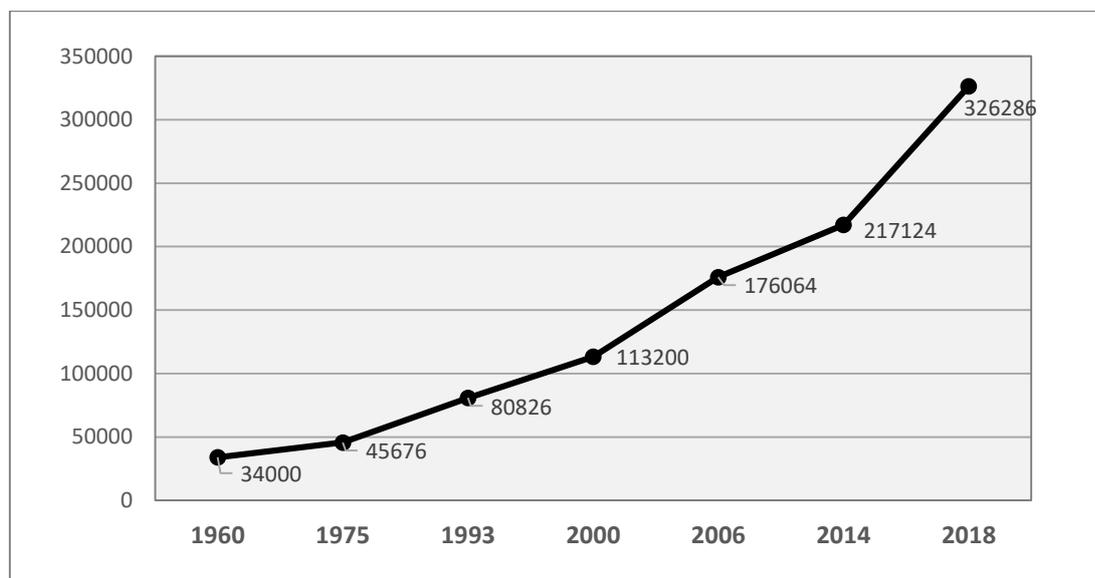


Fig. 50: Evolution de la population de la ville de Toliara

Source : Gendreau, 1972; Fauroux and Koto, 1993; Pascal, 2003; INSTAT, 2015, 2018

Tableau 12: Evolution de la population de la Commune rurale de St Augustin

Village	2006	2018
Ambatobe	417	793
Ambohibory	206	420
Ankerereaky	1500	1747
Ankilibe	2125	3176
Fenoarivo	1000	485
Lavenombato	578	1244
Lovonkampy	639	1152
Manoroka	1000	3167
Saint augustin	3316	984
Sarodrano	1624	1656
Ampasinihita	811	1244
Marobika	226	976
Tanandava	1863	975
Total	15305	18019

Source : PCD, 2006; INSTAT, 2018

Entre 1998 et 2018, la population des 8 villages de la baie de Toliara est passée de 23 916 à 36 143 habitants (Tableau 9). Cette évolution démographique est la conséquence directe de l'exode rural et

de la migration de la population des campagnes vers la zone urbaine ou péri-urbaine comme les cas du nouveau hameau d'Antanandreviky (créé vers l'an 2000 et actuellement compte 407 habitants) et celui de Kondeorejely (créé en 1987 avec 414 habitants en 2020) qui sont rattachés administrativement au village de Sarodrano.

Les paramètres climatiques et hydrodynamiques constituent de véritables obstacles à l'exercice de la pêche en même temps ils rendent le métier de pêcheur particulièrement éprouvant et dangereux (Chaussade, 1999). Ceux-ci rendent ces nouveaux pêcheurs sans compétence dans le domaine (Prieur, 2009) à pratiquer la pêche dans des zones à faible profondeur, à se ruer vers l'usage de la senne de plage ou du chalut à moustiquaire comme les secteurs d'Ankalalo et de Namakia (extension sud du village d'Ankilibe). L'utilisation principale de la senne de plage, sur le littoral de Toliara, par des ethnies reconverties (Masikoro, Tanalana et Mahafaly) en pêcheurs a été également signalée par Mahafina, (2011).

La conversion professionnelle d'agro-éleveur en pêcheurs a été confirmée par Gabrié et al. (2000), Angin (2007) et Mahafina (2011). D'où les villages autochtones en périphérie du canevas urbain, reliés à l'agglomération de Toliara, au bord de la mer sont peu cosmopolites mais abritent majoritairement des Vezo (Houssay-Holzschuch, 1994). De l'autre côté, grâce à l'essor du projet aquacole notamment dans le village de Sarodrano, on a constaté le changement de métier pêcheur en fermier (ou au moins en bi-activité).

L'augmentation des pirogues et des pêcheurs (liée à l'effort de pêche) est due aussi au développement des entreprises de commercialisation des produits halieutiques (frais ou transformés) dans la zone. En effet, l'augmentation de la demande en produits marins a conduit à la multiplication du nombre de pêcheurs et de pirogues à proximité de Toliara ville (Gabrié et al., 2000). Selon la statistique du SRPA Atsimo Andrefana, en 2020, il y avait 173 cartes de mareyage et 25 permis de collecte (de poissons) pour les Districts de Toliara I et II, ce qui revient à dire que les opérateurs halieutiques ont l'objectif de satisfaire les besoins alimentaires d'origine marine de la population qui ne cesse d'augmenter. D'ailleurs, les opérateurs coopèrent avec les pêcheurs pour avoir plus de produits face aux divers concurrents. Ainsi, assiste-t-on à un accroissement incessant du nombre de personnes qui exploitent le milieu marin (McVean et al., 2005).

De 1990 à 2018, le nombre des pêcheurs dans la baie est passé de 1800 à 2600. Cette évolution n'est pas très élevée par rapport aux autres villages de pêcheurs (comme Beheloka, Salary nord, Andavadoaka,...) sous l'effet de la migration inter-littorale. Toliara est l'un des lieux d'origine des pêcheurs migrants (Cripps, 2016). Nombreux auteurs mentionnent que la baie de Toliara a été jugée surexploitée et surpeuplée (e.g. Gabrié et al., 2000; Brenier et al., 2012). Par conséquent, les pêcheurs vont migrer vers la zone encore plus propice à l'exploitation de ressources marines sur le plan économique et socio-culturel. Cette situation a entraîné le déplacement (temporaire ou définitif) des

pêcheurs de la baie vers le sud ou le nord (Veriza et al., 2018), entraînant un équilibre socio-halieuétique dans la baie face à la pression démographique que subit la zone.

La durée de vie moyenne d'une pirogue est de 3 ans (Veloson, 2020). Depuis la difficulté d'approvisionnement de leurs matériaux de construction, les pêcheurs de la baie ont tendance à réparer leurs embarcations que plutôt que d'en acheter et d'autres font recours à l'achat de seconde main (bonne occasion). Cette stratégie d'adaptation affecte directement l'évolution de la flotte piroguière pour laquelle le nombre de pirogue est passé de 1171 à 1400 entre 1998 et 2018.

L'augmentation du nombre de pêcheurs résulte de l'augmentation du nombre d'engins de pêche. Selon les données disponibles, depuis les années 1972, il y existe trois engins dominants répertoriés dans la baie de Toliara à savoir le filet maillant, la ligne et la senne de plage. (McKenna et al. (2005) a affirmé que ces engins sont les plus utilisés par les pêcheurs traditionnels dans le nord-ouest de Madagascar.

En 2018, le filet maillant, la ligne et la senne de plage sont des engins toujours parmi les plus utilisés pour pêcher les poissons en complément avec le fusil-harpon et le chalut à moustiquaire (Tableau 13).

Tableau 13: Evolution du nombre des engins de pêche dans la baie de Toliara

Année	1972					1995					2008					2018				
	FM	LN	FU	SP	CM	FM	LN	FU	SP	CM	FM	LN	FU	SP	CM	FM	LN	FU	SP	CM
Sarodrano	19	6		3		40	26		0							57	15	3	3	2
Ankilibe	10	80		22		85	8		20		111	7	19	108	16	104	21	6	4	108
Ankiembe-haut						7	45		0							28	39	2	1	0
Mahavatse-1	30	18		8		65	66		6							52	11	8	5	0
Ankiembe-bas						1	41		54							89	10	12	70	21
Mahavatse-2						5	23		35							15	17	28	44	0
Besakoa						31	12		0							13	18	49	1	0
Ambohitsabo						0	25		0							0	11	25	0	0
Total	59	104	0	33	0	234	246	0	115	0	111	7	19	108	16	358	142	133	128	131

Source : Collart, 1972 ; Laroche et Ramanarivo, 1995 ; Mahatante, 2008 ; Présente étude, 2018

En général, le nombre des engins de pêche dans la baie a relativement augmenté. En 20 ans, le filet maillant a montré une forte croissance et la ligne a subi une nette diminution. Ce contraste est sans doute dû à la préférence de pêcheurs aux engins de pêche à forte productivité comme le filet maillant par rapport à la ligne. La senne de plage a peu évolué par les impacts de la sensibilisation sur la législation de la pêche aux engins destructeurs. La majorité des pêcheurs utilise le fusil-harpon artisanal. Cet engin est jugé onéreux parce que son usage requiert encore des accessoires difficiles à acquérir (palme, masque), mais son utilisation s'est développée à partir des années 2010. Toutefois, dans les pays du sud-ouest de l'Océan Indien et sur la côte est africaine, les pêcheurs utilisent le plus souvent le filet maillant, la senne, la ligne et le fusil de pêche (Obura et al., 2002; McClanahan et al., 2005).

2.4.2. Intensité de pêche dans la baie de Toliara

La baie de Toliara constitue la zone d'exploitation habituelle des ressources halieutiques des pêcheurs littoraux où ils exercent la pêche de subsistance et commerciale. La pêcherie récifale est l'activité principale, source de revenu non négligeable pour ces exploitants marins.

La mobilité des Vezo est principalement liée à la recherche d'un endroit productif (Veriza et al., 2018). Effectivement, du nord au sud et d'est en ouest, les pêcheurs fréquentent le milieu marin dans le but de capturer le maximum de poissons. L'effort de pêche se répartit de façon plus ou moins inégale selon les engins et les habitudes spatiales de pêcheurs de chaque village.

L'effort de pêche a été cartographié pour savoir la distribution de pression de pêche au sein de la baie. Les résultats de cette étude ont déterminé que la zone est fortement exploitée. Cependant, la spatialisation à fine échelle nous a révélé que les pêcheurs d'Ankilibe et d'Ankiembe-bas font le plus de pression, étant donné que ces villages ont le nombre de pirogues le plus élevé. Géographiquement, l'effort de pêche des pêcheurs semi ou exclusivement sédentaires se concentre aux environs de leurs villages (par exemple ceux de Besakoa et d'Ambohitsabo). Ce constat a été démontré par Angin (2007) que les pêcheurs Vezo ont pour habitude d'avoir des zones de pêches principales à proximité du village à laquelle s'ajoutent de zones secondaires plus éloignées. Pour le cas de pêcheurs sédentaires du sud (Sarodrano et Ankilibe), leurs efforts de pêche se concentrent surtout dans la partie australe de la baie. Se déplacer vers la partie boréale est trop risqué pour eux par crainte de ne pas pouvoir retourner au village, après la pêche, à cause du vent dominant (Tsioka antimo). D'ailleurs, tout retour de pêche se fait automatiquement dans l'après-midi avec la marée montante selon la logique des marées semi-diurnes comme à Madagascar (Henry Chartier and Henry, 1998). L'effort de pêche de ces villages est limité aux environs de leurs zones de pêche entraînant une pression spécifiquement locale. Au contraire, les pêcheurs ubiquitaires augmentent la pression de pêche dans les villages/zones autres que les leurs, à exemple des pêcheurs d'Ankiembe-haut ou de Mahavatse 1.

Le domaine de pêche des Vezo s'étend presque jusqu'à la limite de la plate-forme continentale, tant que l'on perçoit les amers côtiers. Au-delà, l'absence de ces repères visuels empêche les marins Vezo de naviguer (Henry Chartier and Henry, 1998). Les pêcheurs de la baie de Toliara arrivent jusqu'au large du front récifal pour exploiter la mer. Ramahatratra (2014) affirmait que la ligne à main a été pratiquée sur toutes les zones géomorphologiques de la zone, sans précision spatiale. L'analyse trajectométrie de pirogues nous a permis de localiser avec certitude que l'effort de pêche était intense non seulement dans le lagon mais également au large (à plus à de 10 km de la côte).

Auparavant, bien que le fusil-harpon n'ait pas vraiment étudié, la localisation des événements de pêche par le traceur GPS a révélé l'observation de l'effort de pêche important de cet engin au niveau du récif même si d'après les connaissances habituelles, son utilisation est axée dans le lagon. Avec 16%

de l'effort global de la baie, cette valeur n'est pas négligeable en termes de pression pour cet engin classé comme sélectif.

Les pêcheurs Vezo se déplacent avec une pirogue à balancier le long de la côte sud-ouest pour préserver leur liberté mais aussi pour suivre les bancs de poissons (Veriza, 2019). La cartographie à fine échelle a confirmé la conclusion de Laroche and Ramanarivo (1995) et de Cripps (2009) que la senne de plage est généralement pratiquée sur la terrasse peu profonde et le platier (interne) du récif. Autrement dit, ces unités géomorphologiques sont les plus impactées par cet engin jugé destructeur depuis les années 1990. D'ailleurs, actuellement ces zones sont les plus dégradées dans la région. La senne de plage a été utilisée surtout au niveau de la zone côtière (herbiers, platier) avec un taux de fréquentation à 70% Ramahatratra (2014).

La présence de mers poissonneuses à proximité des côtes est un avantage économique et humain incontestable (Chaussade, 1999). Le résultat d'analyse trajectométrique a révélé quantitativement que 90% de l'effort global de la baie se situe dans l'ensemble géomorphologique terrasse-lagon-récif. Cela montre que les ressources halieutiques cibles se trouvent à proximité des côtes. Dans cette situation, les pêcheurs n'ont pas à chercher à investir dans des embarcations suffisamment autonomes pour pêcher loin du rivage (Chaussade, 1999). C'est la raison pour laquelle leur affinité a porté sur les techniques et pirogues traditionnelles pour l'exercice de la petite pêche. Cette étude a bien démontré que la zone du large ne représente que 10% de l'effort global de la baie.

La toponymie des sites de pêche correspond généralement à une délimitation relative et son périmètre peut varier selon le pêcheur. Quoiqu'il en soit, la spatialisation à fine échelle des activités de pêche permettrait d'identifier d'une manière géo-référencée les zones d'importance bioécologique ou halieutique. La zone de fréquentation des pêcheurs a été classifiée avec précision grâce à l'application de la méthode d'identification automatique des événements de pêche des pirogues. Cette méthode a aussi montré que les zones aquacoles ne sont pas fréquentées par les pêcheurs traditionnels. Bien que les champs d'algues attirent diverses espèces marines, les pratiques de pêches dans cette zone ne sont plus possibles. Cela réduit la superficie de zones de pêche exploitable mais contribue tout de même à l'augmentation de revenu familial de pêcheur.

2.5. Conclusion

Le suivi de trajectoire des pirogues a été réalisé à l'échelle de la baie de Toliara où se trouve la pêcherie récifale la plus complexe à Madagascar. Le paramètre halieutique parmi le plus important qui est l'effort de pêche, a été caractérisé spatialement et quantitativement grâce à la méthode de prédiction automatique des événements de pêche en appliquant l'algorithme de Forêt Aléatoire.

En général, l'analyse des mouvements des pirogues évoque le comportement des pêcheurs dont certains sont catégorisés comme sédentaires et d'autres ubiquitaires.

La littoralisation se manifeste dans la zone par les effets de croissance démographique, ce qui entraîne l'évolution de la flottille piroguière et des exploitants marins. Cependant, l'émigration de pêcheurs de la baie et les difficultés d'acquisition de pirogues (coque) neuves pourraient être des facteurs d'équilibre qui influencent le nombre de la flottille piroguière et la pression (locale) de pêche.

Avec près de 270 000 heures d'effort de pêche global effectif, l'utilisation du filet maillant en représente moins de la moitié avec 41%, les 4 autres engins englobent 59%. Ankiembe-bas demeure le village le plus important sur l'aspect social et halieutique dans la baie. Avec Ankilibe, depuis le développement de la pêche au chalut à moustiquaire, ces 2 villages exercent une forte pression au niveau de la terrasse peu profonde.

Les poissons récifaux de la baie de Toliara proviennent de la zone lagonaire (terrasse + lagon) et du récif (90% de fréquentation). Désormais, on peut classer avec certitude que ce sont des poissons récifo-lagunaires. Les pêcheurs exploitent le large. Ils continuent à explorer la zone où certains arrivent même très loin jusqu'à 13 km de la côte même si le rayon d'action des pirogues traditionnelles est limité. Visiblement, les pêcheurs qui ciblent les gros pélagiques dépassent largement cette distance en utilisant leurs filets de grosses mailles ou de leurs hameçons de grandes tailles.

Grâce à cette approche et cette méthode, il est faisable d'estimer et cartographier avec précision l'effort de pêche, à partir d'une grande quantité de données, d'une pêcherie récifale côtière. En effet, on obtient l'effort de pêche effectif et géo-référencé si auparavant on a parlé d'effort nominal et relatif. Ce genre d'information halieutique est crucial dans la démarche d'aménagement de pêcherie (au sens large) et du *Marine Spatial Planning* que les acteurs de développement est en train de promouvoir actuellement.

Chapitre III. CARACTERISATION DE LA PRODUCTION HALIEUTIQUE DANS LA BAIE DE TOLIARA

3.1. Introduction

Les récifs coralliens soutiennent la petite pêche et constituent une source importante de protéines pour les communautés locales de nombreux pays en développement dans le monde (Sadovy and Domeier, 2005). Les pêcheries récifales représentent environ 2 à 5% des captures mondiales (Pauly et al., 2002). Un rendement annuel estimé entre 5 et 15 tonnes de poissons et de fruits de mer par km² et par an peut être récolté sur un récif sain et bien géré (Spalding et al., 2001). Dans les écosystèmes récifaux, les poissons représentent souvent la ressource la plus importante, surtout pour les pays en développement de l'Indo-Pacifique (Letourneur et al., 2000). Les systèmes de pêche doivent être régulièrement évalués afin de comprendre leur état actuel (Dzoga et al., 2020), notamment pour la zone récifale ayant un fort dynamisme social, écologique et économique comme la baie de Toliara.

La baie de Toliara possède le plus grand récif barrière dans l'Océan Indien occidental dont le Grand Récif de Toliara (Andréfouët et al., 2013). Pourtant, il est se dégrade en raison de facteurs de stress anthropiques et climatiques (Vasseur, 1997; Bruggemann et al., 2012). Ces changements d'habitat, associés à la surpêche, ont manifestement un impact négatif sur les 2 000 pêcheurs de la baie de Toliara. En l'absence d'informations à fine échelle sur la composition des captures, l'effort de pêche et les taux de capture, on ne sait toujours pas quels pêcheurs peuvent être les plus touchés par l'épuisement des populations de poissons et quelles stratégies de gestion peuvent assurer la durabilité des pêches (Prince and Hordyk, 2019).

L'étude de la pêcherie par Laroche and Ramanarivo (1995) est à notre connaissance la plus complète disponible dans la baie de Toliara. Collectées en 1989-1990, leurs données témoignent une production totale de 2 300 t/an (soit 12 t/km²/an) et une diversité de captures de poissons de 35 familles. Quelle est la composition des captures de pêche des différents engins ? La pêcherie récifale dans la baie est-elle durable ? Environ trois décennies plus tard, nous réévaluons la durabilité écologique de la pêcherie récifale de la baie par rapport au seuil durable de la production annuelle qui est de 5t/km² (Newton et al., 2007). Depuis plus de 20 ans, la baie de Toliara a subi des changements induits par le développement économique, la croissance démographique et la sédimentation côtière (Bemahafaly, 1997; Ranaivomanana, 2006). Ces facteurs naturelles et humaines ont possiblement fortement impactés les pratiques de pêche dans la zone. En effet, il nous semble primordial de mettre à jour les informations disponibles sur la production halieutique dans la baie de Toliara, et de caractériser son évolution dans le temps et dans l'espace (à l'échelle de la baie) avec la nouvelle technologie disponible de géolocalisation de petites embarcations (traceur GPS).

La collecte d'informations spatiales sur les captures et l'effort de pêche est essentielle pour comprendre les processus spatiaux de la dynamique des populations exploitées et pour gérer les ressources hétérogènes et ses utilisations (Léopold et al., 2014). Comment se repartisse les captures

des poissons dans la baie de Toliara? Suivant l'analyse de trajectométrie de pêcheurs (tel que développé dans le chap.2), il est faisable de caractériser la production halieutique de la pêche récifale de la baie de Toliara en liant les trajectoires avec les données de captures. Dans ce chapitre, mise à part de l'identification de la diversité taxonomique des captures et de la détermination de l'état d'exploitation de la pêche dans la baie, l'objectif étant de spatialiser les captures de pêche dans la baie en fonction du village de pêcheurs, de l'engin utilisé et de la géomorphologie récifale.

3.2. Matériels et Méthodes

Après la spatialisation et l'estimation de l'effort de pêche par l'application du modèle de prédiction (Forêt Aléatoire) des événements de pêche, on utilise les données de trajectoires de pirogues avec les données des captures afin de caractériser la production halieutique dans la baie de Toliara.

Simultanément au suivi des trajectoires des pirogues, un suivi des captures a été effectué. Ce suivi comprend un suivi de la diversité taxonomique d'une part, et du niveau des captures globales individuelles d'autre part.

3.2.1. Suivi taxonomique des captures

Pour chaque village, les débarquements de chaque pirogue équipée d'un traceur GPS ont été échantillonnés tous les deux mois (au cours des 6 périodes), soit un échantillon en mortes eaux et une autre en vives eaux, et pendant une année (Tableau 14).

Tableau 14: Période d'échantillonnage des captures

Année	2018												2019											
	Mai-Juin				Juillet-Août				Septembre-Octobre				Novembre-Décembre				Janvier-Février				Mars-Avril-Mai			
Mois	ME	VE	ME	VE	ME	VE	ME	VE	ME	VE	ME	VE	ME	VE	ME	VE	ME	VE	ME	VE	ME	VE	ME	VE
Marée																								
Ambohitsabo					E																			
Besakoa					E		E																	
Mahavatse 2																								
Ankiembe-bas			E			E																		
Mahavatse 1					E		E																	
Ankiembe-haut					E		E																	
Ankilibe			E			E																		
Sarodrano					E		E																	

	Récupération des données GPS
E	Echantillonnage des captures

Durant chaque jour de suivi sur le terrain, pour chaque pirogue, un échantillon a été prélevé au hasard pour quatre classes de poids de poissons de la capture totale (gros > 250 g, moyen 150 à 249 g, petit 51 à 149 g, très petit < 50 g) en utilisant la fiche de suivi des captures des débarquements (Annexe 4). Suivant nos observations préliminaires, ces classes de poids sont relativement équivalentes à des classes de taille suivantes : gros > 15 cm, moyen 9 à 14 cm, petit 5 à 8 cm, et très petit < 4 cm. A partir de la capture totale (dans le panier/sac du pêcheur), on a pris au hasard (à la main pour les catégories

« gros », « moyen » et « petit » ; et avec une assiette la catégorie « très petit ou bébé ») les échantillons par catégorie de taille, en pesant approximativement 3 kg, 2 kg, 1 kg et 1,5 kg de poids brut respectivement à partir de la capture totale. Pour les captures du chalut à moustiquaire, cet échantillonnage permettra d'estimer le poids des poissons de la catégorie de taille « très petit » parmi les autres prises (invertébrés,...). Ensuite, les échantillons ont été placés sous glace dans des sacs plastiques fermés suivant la codification de l'échantillon (Fig. 51).

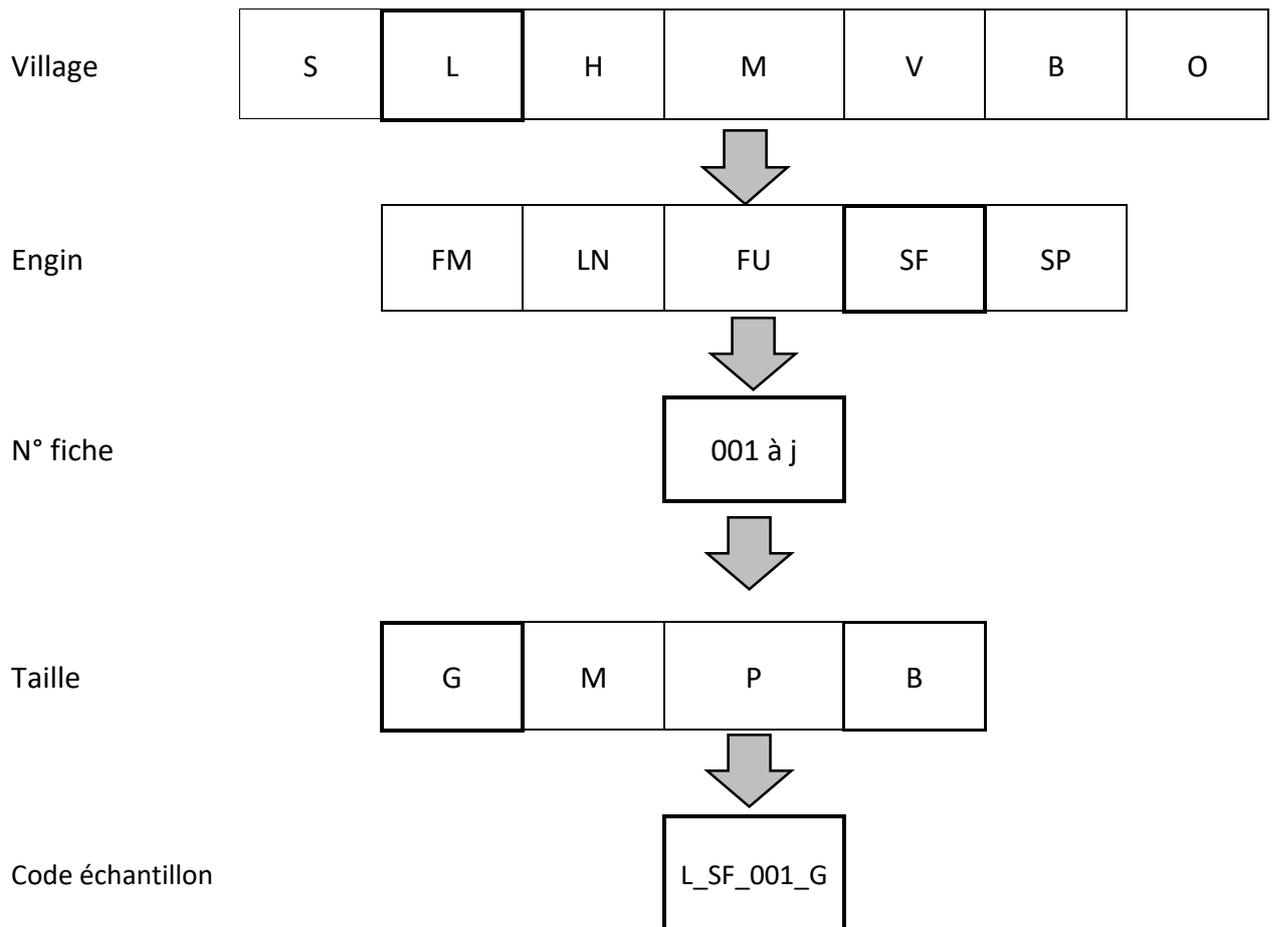


Fig. 51: Codification de l'échantillon des captures

Le code échantillon est composé du code village, code engin, numéro fiche de suivi des captures et le code taille, par exemple : L_SF_001_G (échantillon de la fiche de suivi n°1, de catégorie gros, issue de la senne de fond venant du village d'Ankilibe).

Le jour même, arrivé au laboratoire de l'IH.SM, les différents morphospecies de chaque échantillon ont été séparés et identifiés au niveau famille. L'identification de taxon de la diversité des captures a été réalisée à l'aide de guide d'identification de poissons marins de l'Océan Indien (Fisher et Bianchi, 1984 ; Taquet et Diringer, 2012 ; Ponton et al., 2015). A l'aide d'un dispositif de prise de photo Annexe

5), les individus de chaque morphospécies ont été photographiés ensemble à l'aide d'un appareil photo (Olympus TG-860) en gardant le même paramétrage (positionnement, zoom,...). En effet, une base de données photos des poissons capturés a été constituée à de fin de vérification ou d'études ultérieures.

3.2.2. Suivi des captures globales par sortie

Afin de considérer la variabilité temporelle de la fréquence des sorties en mer et du niveau des captures individuelles, les données du suivi des captures aux débarquements ont été complétées par un suivi participatif (12 mois). Autrement dit, les pêcheurs disposant d'un traceur GPS effectuent eux-mêmes un suivi journalier de leurs captures globales par sortie en indiquant le lieu de pêche et le poids de leurs captures de poissons récifaux (et les autres ressources comme les céphalopodes ou crustacés), à l'aide de la balance individuelle qui ont été distribuée (précision effective ± 0.5 kg). La fiche du suivi participatif est présentée en Annexe 6.

Afin d'assurer la qualité des données participatives dans chaque village, les pêcheurs ont été accompagnés par des assistants locaux préalablement formés aux techniques de mesures et aux objectifs de l'étude.

Les données des captures ont été numérisées sous MS Access afin de faciliter leurs saisies et leurs manipulations. Ensuite, après vérification, le fichier Access (BDD captures) a été également importé dans la base de donnée centrale Postgres en utilisant un script R. Par conséquent, ce téléchargement de données des captures permettra de procéder l'analyse en relation avec les données de trajectoires.

3.2.3. Analyse de données des captures

La caractérisation de la production a été procédée par la liaison de données GPS avec les données du suivi participatif. Par ailleurs, une analyse de la composition des captures des pêches ont été réalisés.

3.2.3.1. *Composition et abondance des captures*

La composition et l'abondance constituent des indicateurs sensibles pour la prédiction des captures de la pêche (Stephenson et al., 2016 in Jaonalison, 2019) et pour l'évaluation de l'état de ressources (Ramahatratra, 2014). Ces deux paramètres permettent de connaître la composition (pourcentage de famille) des captures caractéristiques pour chaque engin de pêche, ainsi que leurs proportions par rapport aux captures totales. Les échantillons des captures issues du suivi taxonomique nous a permis d'analyser ces indicateurs.

Connaître la composition taxonomique des captures étudiées permet de mettre à jour les informations sur la diversité de poisson et de le comparer par rapport aux études antérieures réalisée dans la dans la baie. Ainsi, l'indice de diversité de Shannon-Weiner (H') a été utilisé pour calculer l'indice de diversité

de taxon par engin. Cette indice est donné par la formule recommandé par différents auteurs dont (Gray et al., 1992). Pour la présente étude, le taxon a été identifié au niveau famille.

Par ailleurs, l'abondance des captures globales et par engin ont été calculé afin de savoir le taxon le plus pêche dans la zone. On a calculé l'abondance totale et l'abondance relative (Zaime and Gautier, 1989). Dans notre cas, l'abondance relative a été donnée par le rapport du nombre des individus de famille prise en considération au nombre total des individus de toutes familles confondus.

3.2.3.2. *Spatialisation et quantification de la production*

La caractérisation de l'étendue spatiale des pêcheries côtières est importante pour une gestion efficace des ressources marines (Navarrete Forero et al., 2017). Dans la baie de Toliara, les pêcheurs exploitent les ressources récifales dans l'objectif de capturer le maximum des prises durant l'année quelques soit la saison. Ainsi, selon les savoirs locaux du terroir marin et les engins utilisés par le pêcheur dans les villages, les zones de pêche convoitées (considéré poissonneuse) et délaissées (jugé pauvre) sont souvent disparates. La connaissance de la disparité des zones halieutiquement productive (et vis-versa) est un élément essentiel pour la bio-écologie et la socio-économie de la pêche récifale.

En plus de l'estimation de l'effort de pêche, les cartes de distribution spatiale sont pertinentes dans le cas de la liaison entre les activités des bateaux de pêche géoréférencés et les débarquements (Burgos et al., 2013). En effet, pour fournir une indication quantitative et spatiale des captures dans la baie de Toliara, les analyses ont été accompagnées de la cartographie (Postgres/Postgis) par la relation de la base de données de trajectoires GPS des pirogues avec les données des captures. Ceci permet de ressortir avec précision les zones de distribution des captures par village, par engin, selon géomorphologie récifale et suivant le temps.

Pour estimer la production halieutique, les données des captures du suivi journalier ont été extrapolées pour l'ensemble de flottille piroguière dans la baie, en fonction de strate, qui peut caractériser les activités de pêche dans la zone. Le taux d'extrapolation est l'inverse du taux d'échantillonnage (dont celui-ci est le rapport du nombre des pirogues suivi par le nombre des pirogues inventoriés). Ainsi, avec l'unité en kilogramme, la production par strate a estimé par le produit de la somme des captures des pirogues suivis et le taux d'extrapolation.

Ces résultats ont été aussi cartographiés sous le logiciel QGIS pour spatialiser la production halieutique en utilisant la même grille carrée de 555m x 555m.

3.3. Résultats

3.3.1. Diversité et abondance des captures

Les captures sont composées des 75 familles de poissons (Fig. 52) et leurs listes sont énumérées en Annexe 7. Les dix premiers familles dominantes sont : Labridae, Siganidae, Gobiidae, Lethrinidae, Blenniidae, Scaridae, Pomacentridae, Mullidae, Apogonidae et Acanthuridae dont leurs photos respectives sont montrées en Annexe 8.

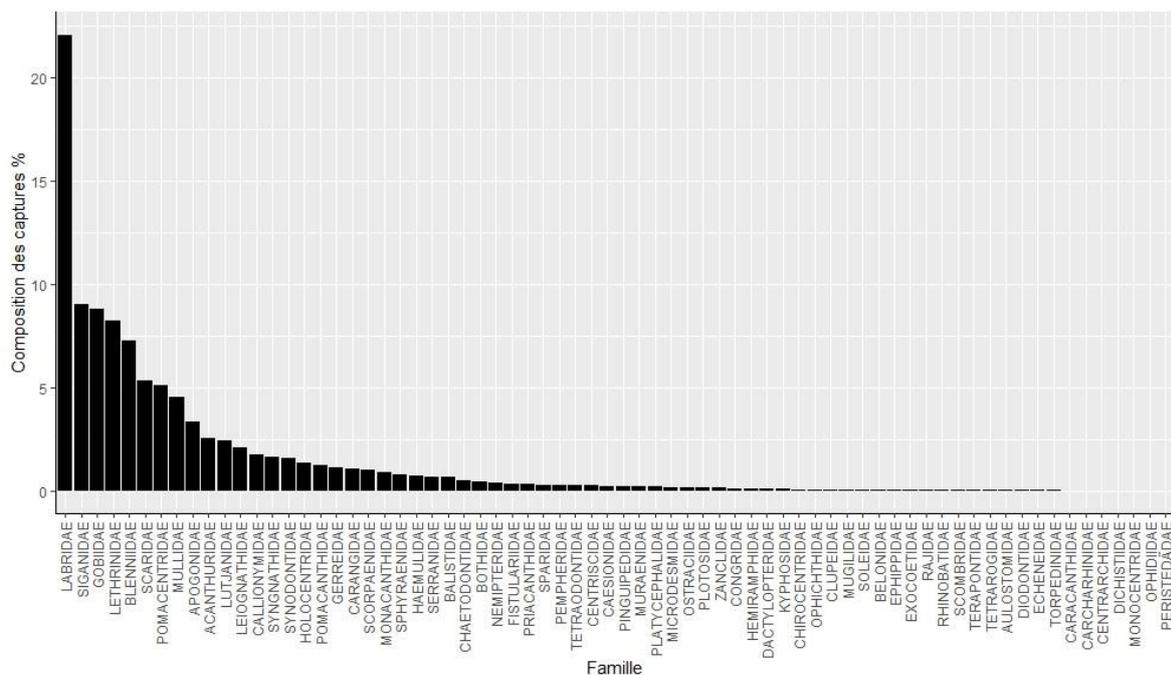


Fig. 52: Diversité et abondance des captures dans la baie

Du point de vue quantitatif, les Labridae sont les plus abondantes avec 22.05% de la composition des captures de la baie de Toliara.

Pour bien représenter la composition des taxons des captures selon les engins de pêche, on n'a pris que les 10 premières familles les plus dominantes et les restantes ont été classées dans les autres familles (Fig. 53).

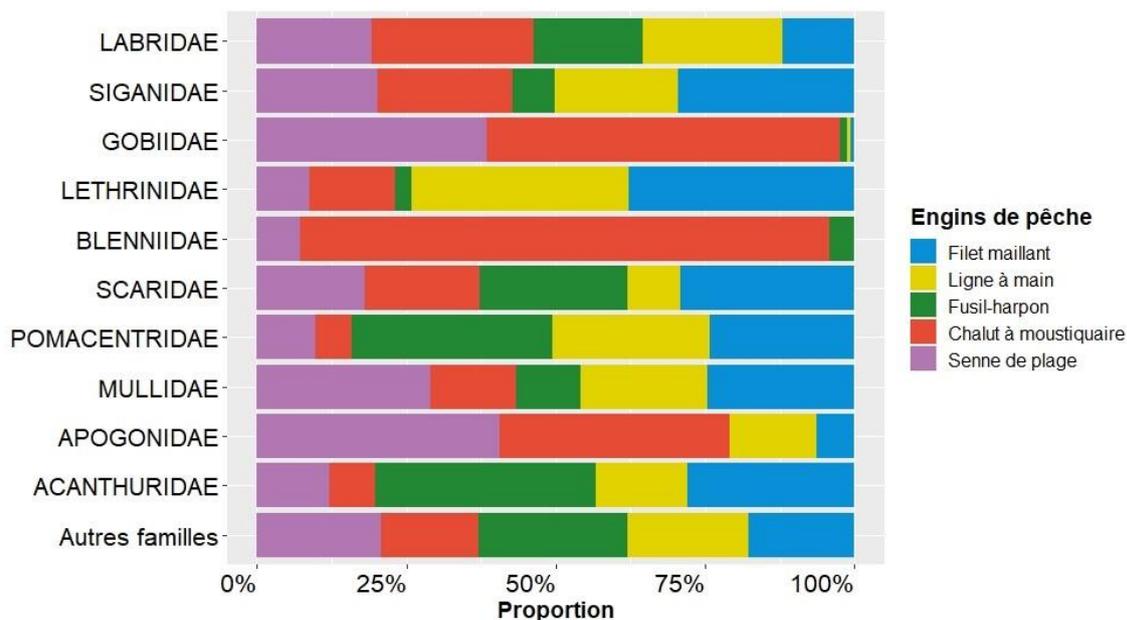


Fig. 53: Répartition des familles capturées en fonction des engins de pêche

La plupart de ces familles a été prise par ces 5 engins. Cependant, les Gobiidae et Blenniidae ont été observé communément dans le chalut à moustiquaire et dans la senne de plage parce que ce sont de poissons d’herbiers où l’effort de pêche de ces deux engins est important au niveau de la terrasse peu profonde (leurs zones écologiques).

La diversité de captures varie d’un engin à l’autre (Tableau 15).

Tableau 15: Indice de diversité des captures par engin

Engin	Nombre d’individu	Proportion totale (en %)	Indice de diversité (H')
Filet maillant	5015	20,36	2,82
Ligne à main	2243	9,1	2,71
Fusil-harpon	761	3,09	2,69
Chalut à moustiquaire	14062	57,08	2,41
Senne de plage	2556	10,37	2,61

D’après ce résultat, on peut dire que les captures du filet maillant sont les plus diversifiées ($H'=2.82$), tandis que celles du chalut à moustiquaire la moins diversifiées ($H'=2.41$).

L’abondance des captures est très variable selon les engins utilisés (Tableau 15). Les captures du chalut à moustiquaire sont les plus abondantes ce qui représentent plus de la moitié (57.08%) de la proportion totale des captures, par contre le fusil-harpon 3.09% qui sont les moins abondantes.

Pour mettre en évidence la diversité des captures, leurs compositions par engin sont détaillées ci-après en mettant en exergue la valeur dépassant le 10% de la proportion.

Pour le filet maillant, on a identifié 54 familles (Fig. 54).

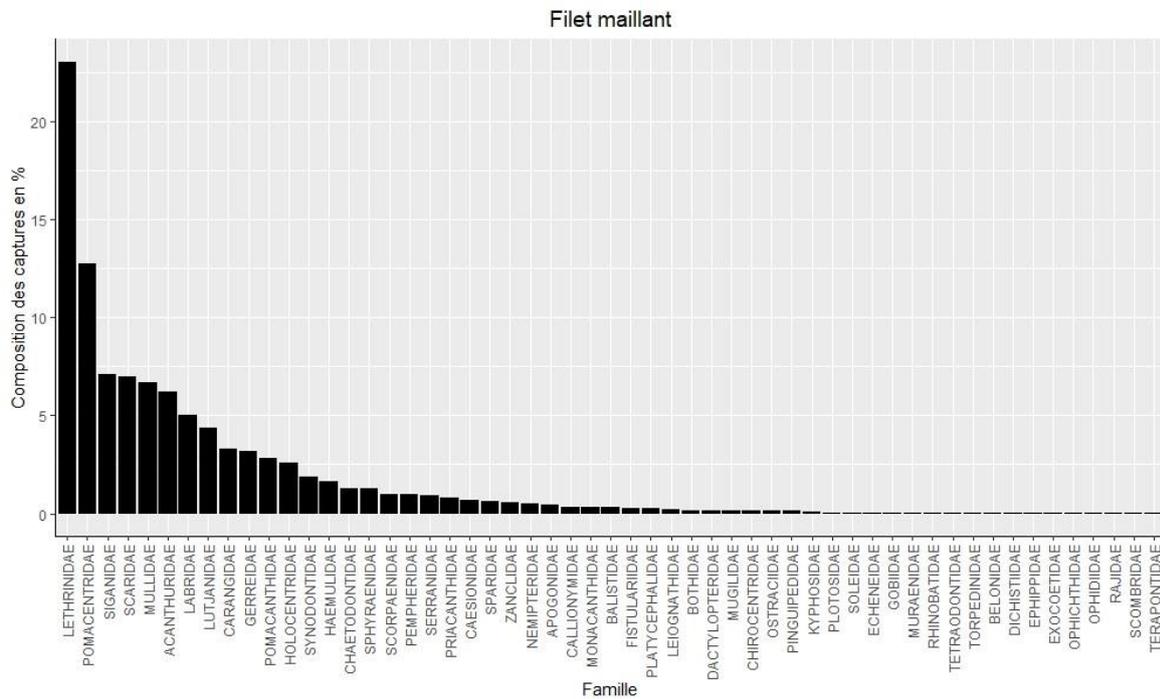


Fig. 54: Diversité et abondance des captures du filet maillant

Il y existe deux familles dépassant le seuil de 10% à savoir les Lethrinidae (23.05%) qui est la plus dominante et les Pomacentridae (12.74%).

Les captures de la ligne à main ont été composées des 48 familles de poissons (Fig. 55).

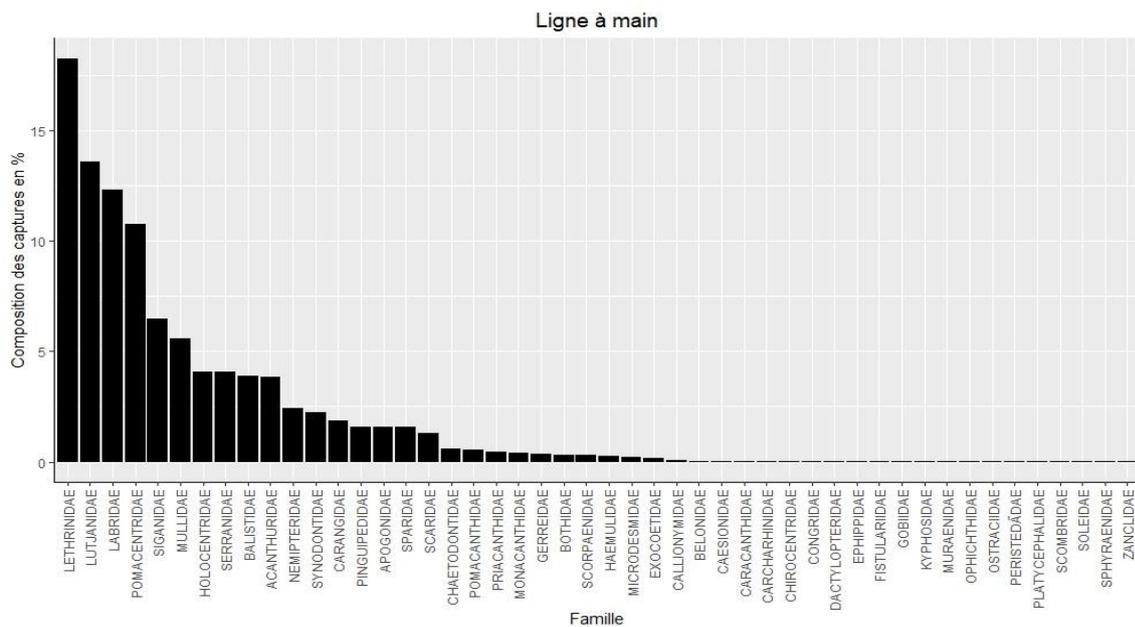


Fig. 55: Diversité et abondance des captures de la ligne à main

Quelques familles sont prédominantes dans les captures de la ligne tels que : les Lethrinidae (18.28%), les Lutjanidae (13.60%), les Labridae (12.30%) et les Pomacentridae (10.79%).

Les principales familles de poissons capturées par le fusil-harpon sont dominées par les Pomacentridae (28.12%) et les Labridae (11.04%), bien qu'elles soient composées par 38 familles (Fig. 56).

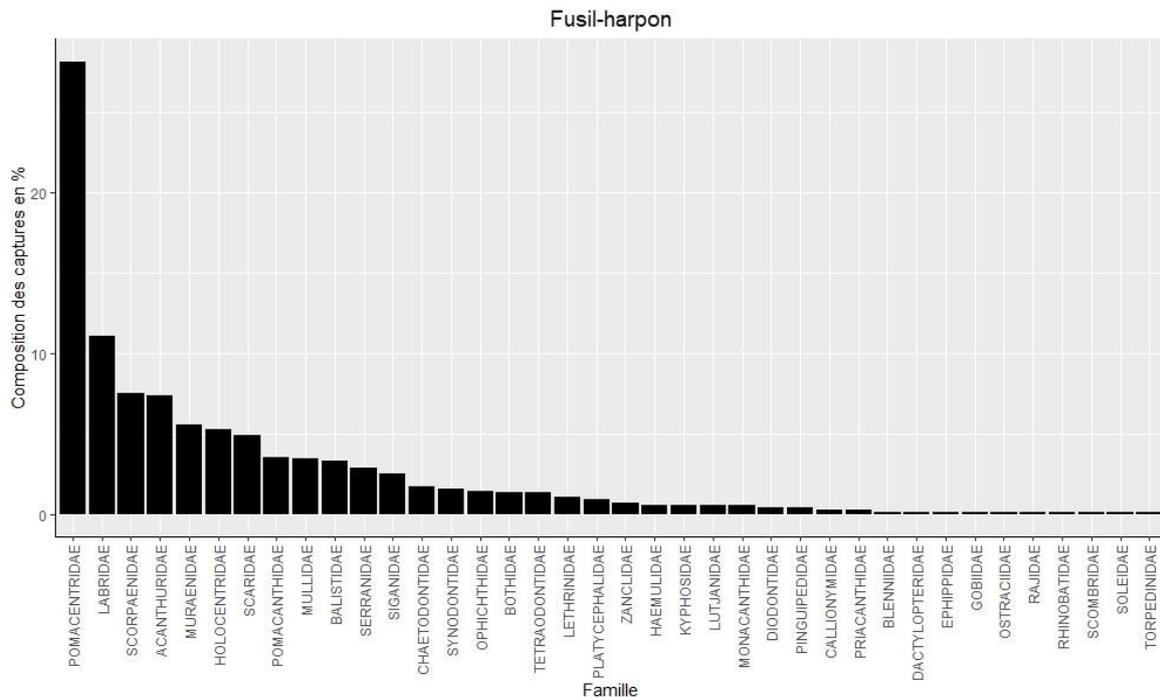


Fig. 56: Diversité et abondance des captures du fusil-harpon

Considéré comme de l'engin sélectif, la présence de la famille de Scorpaenidae (7.49%) et Balistidae (3.29%) témoignent que les pêcheurs commencent à cibler de poissons à faible valeur marchande. Ces captures ne sont pas destinées pour la vente mais plutôt pour la consommation.

Pour le chalut à moustiquaire, 50 familles ont été identifiés dans la composition taxonomique de se capture (Fig. 57).

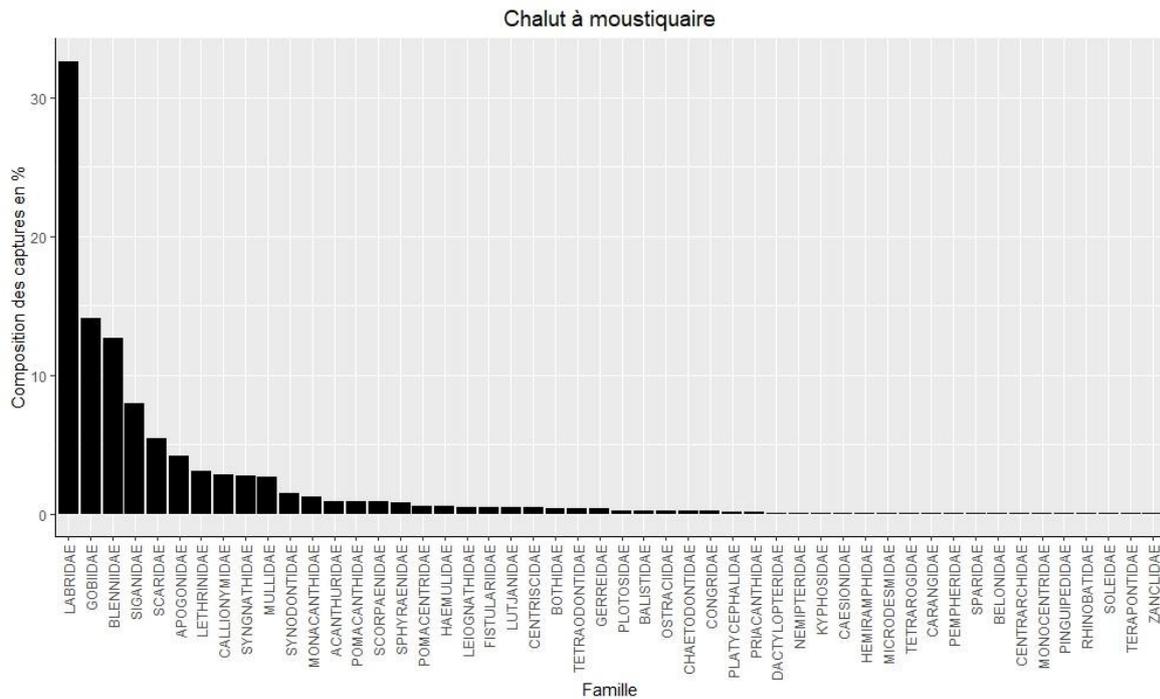


Fig. 57: Diversité et abondance des captures du chalut à moustiquaire

Les familles dominantes sont les Labridae (32.61%), les Gobiidae (14.08%) et les Blenniidae (12.6%) qui sont généralement de poissons des zones des herbiers.

Les captures de la senne de plage ont été composées des 46 familles de poissons (Fig. 58).

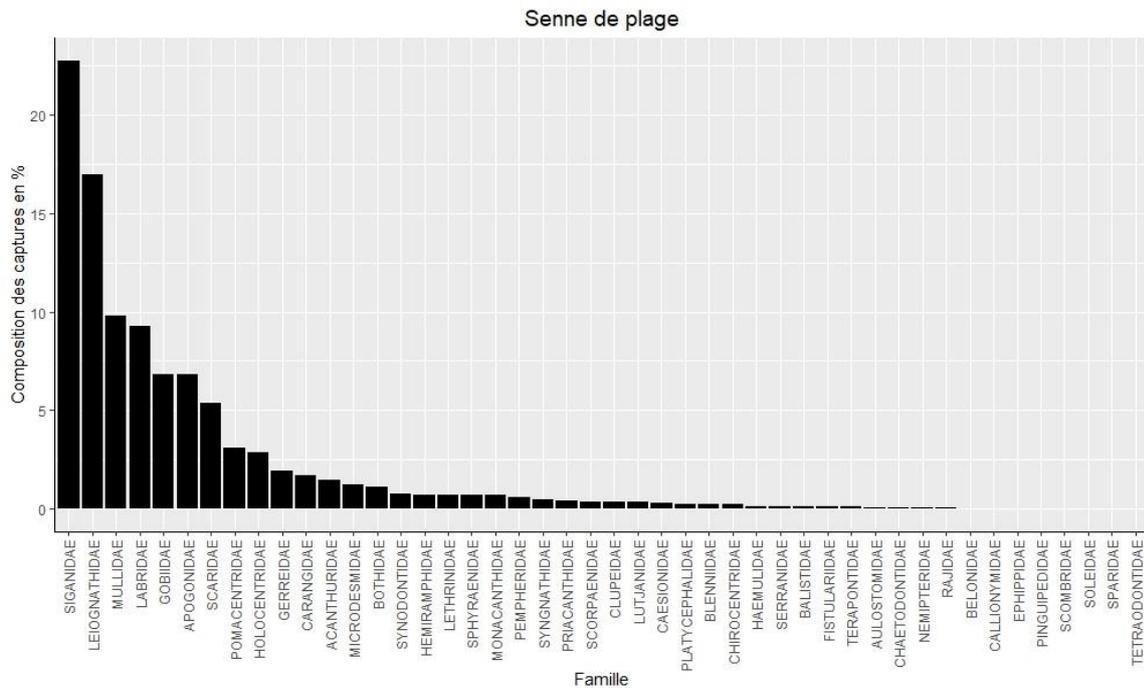


Fig. 58: Diversité et abondance des captures de la senne de plage

D'après cette figure, il y existe deux familles dépassant le seuil de 10% à savoir les Siganidae (22.73%) qui est la plus dominante et les Leiognathidae (16.94%). Toutefois, la présence des Mullidae 9.78% n'est pas négligeable.

3.3.2. Distribution de la production dans la baie

La baie de Toliara est une véritable zone de production en poissons récifo-lagonaires avec des fortes productivités qui s'éparpillent au sein de la zone (Fig. 59).

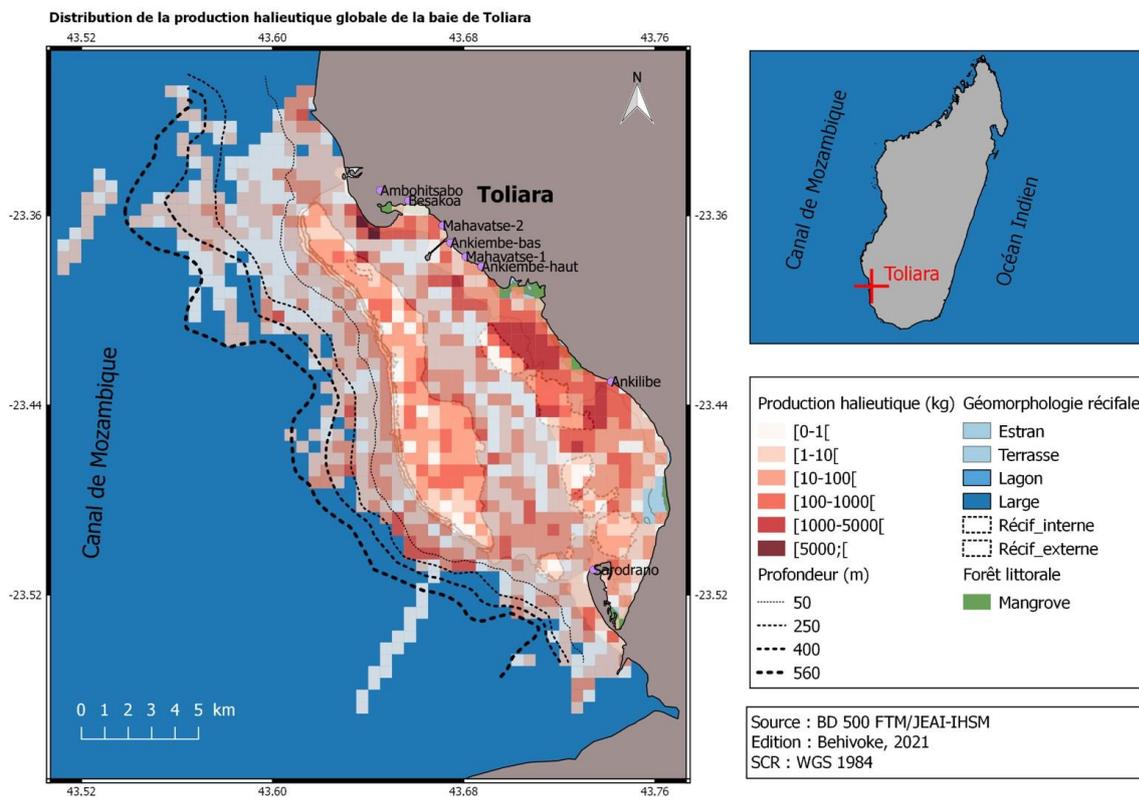


Fig. 59: Distribution de la production halieutique dans la baie de Toliara

La production annuelle de la baie de Toliara a été estimée à 1 040 kg soit un rendement de 6.6 tonnes/an/km².

En fonction de la géomorphologie récifale, la production est très remarquable au niveau de la terrasse peu profonde et au récif par rapport au niveau du lagon et au large (Fig. 60).

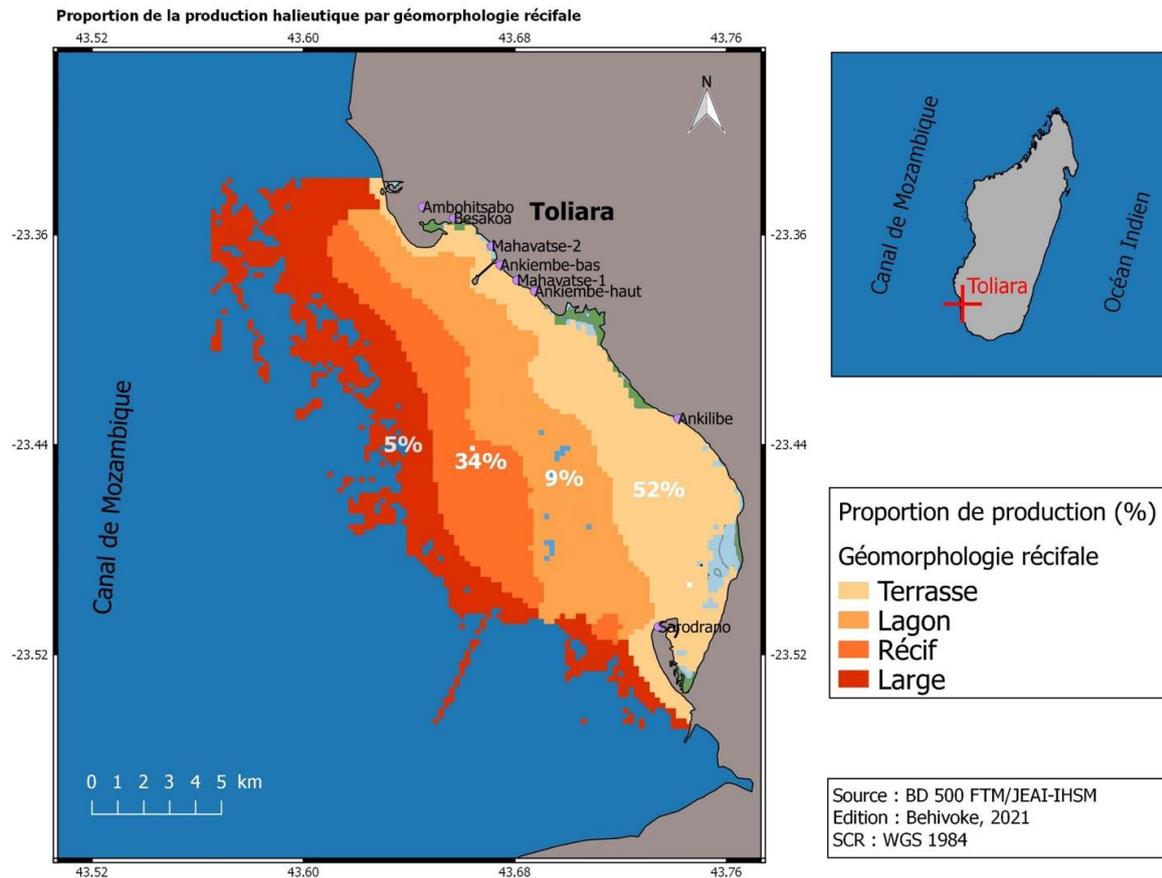


Fig. 60: Proportion de la production halieutique par géomorphologie récifale

Par rapport à la production annuelle totale, la terrasse est la plus productive (52%) soit 535 922 kg, suivi du récif (34%) soit 354 748 kg, du lagon (9%) soit 97 744 kg et enfin la zone au large (5%) soit 51 755 kg. Ces niveaux de production sont respectivement relatifs à l'effort de pêche que subit chaque zone (Fig. 32).

3.3.3. Distribution de la production par engin

Spatialement, la production halieutique dans la baie de Toliara se répartit en fonction de l'engin de pêche utilisé (Fig. 61).

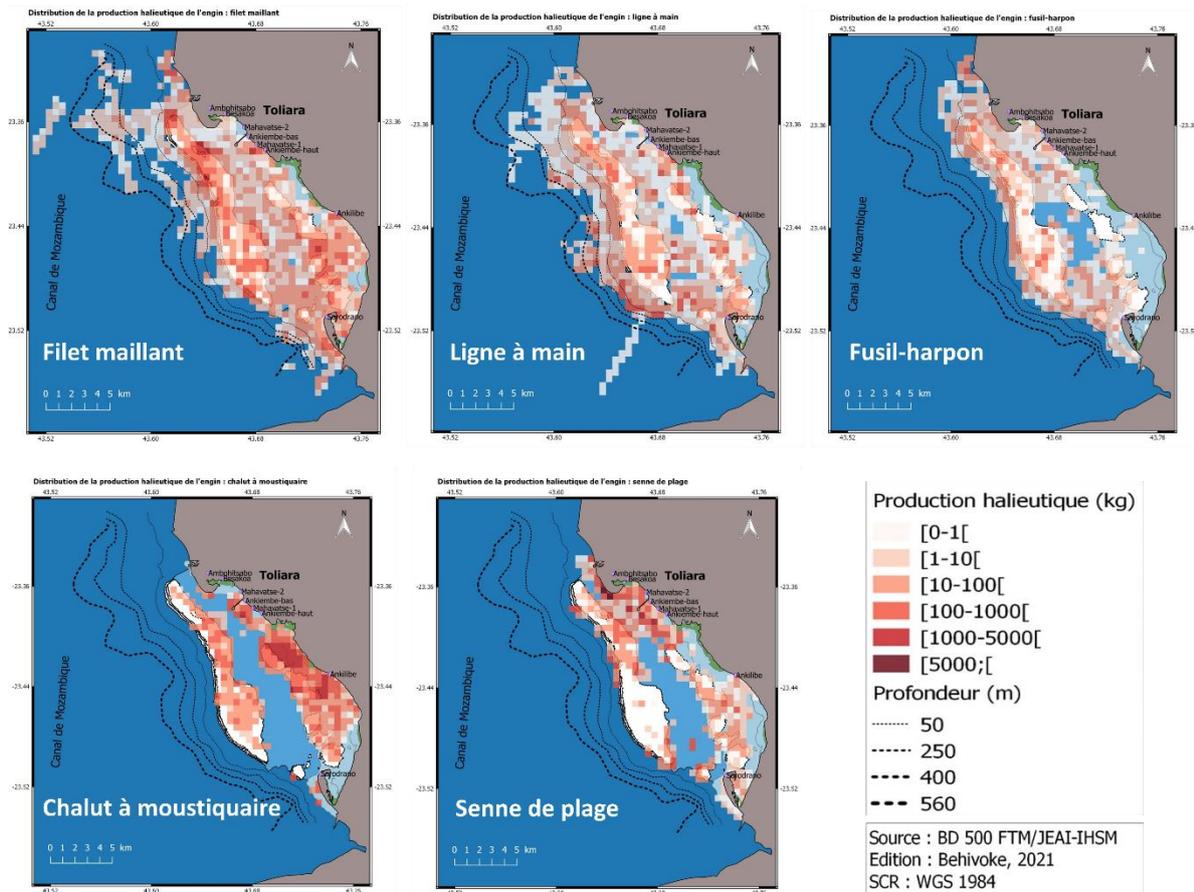


Fig. 61: Distribution de la production halieutique par engin

Un zoom cartographique de chaque carte est présenté en Annexe 10 pour bien observer la différence de pixel.

A l'échelle de la baie, on a remarqué que filet maillant, ligne à main et fusil-harpon disposent une surface de production très étendue par rapport au chalut à moustiquaire et à la senne de plage qui ont une surface de production très limitée. Cependant ces derniers assurent plus de la moitié de la production globale avec une valeur respective de 474 631 kg et 201 917 kg soit une proportion totale 65%. Le filet maillant tient un part non négligeable à hauteur de 23% avec une valeur avoisinant le 250 000 kg. Les deux autres engins ligne à main et fusil-harpon assurent respectivement 6% et 5% et leurs productions sont en-dessous de la barre de 75 000 kg (Fig. 62).

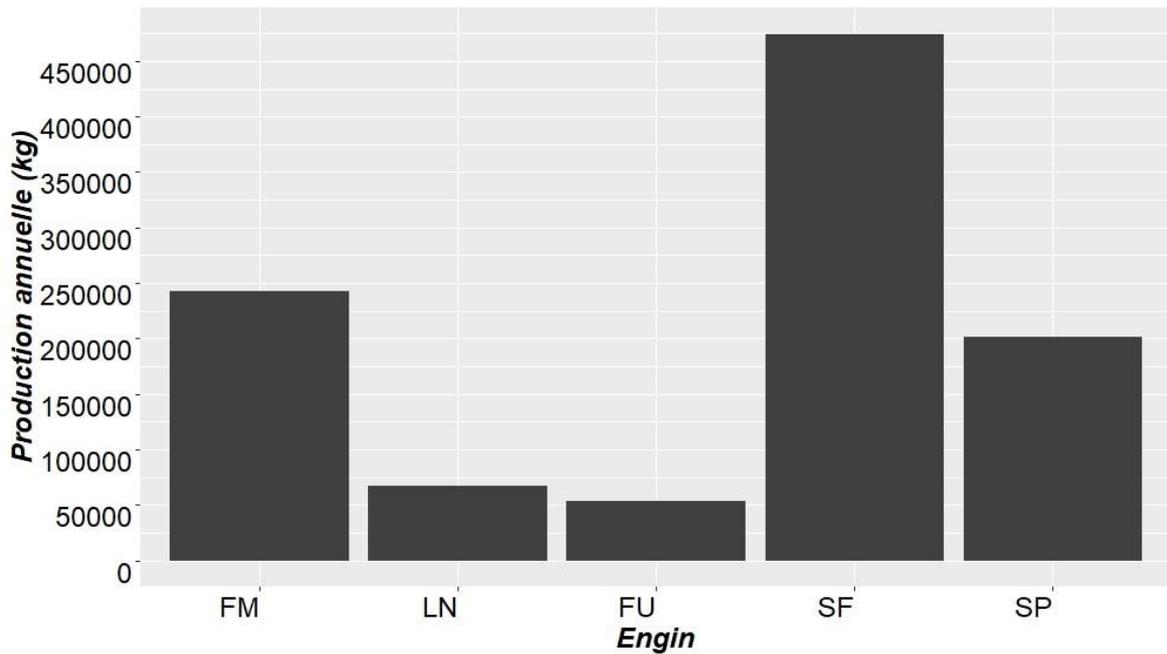


Fig. 62: Production halieutique totale par engin

Généralement il existe une différence significative entre les 5 engins d'après le test de Kruskal-Wallis ($p < 0.05$) ainsi que d'après la comparaison par paires de Wilcoxon (Tableau 17).

Tableau 16: Test de comparaison deux à deux entre la production des engins

	FM	LN	FU	SF
LN	$< 2e-16$	-	-	-
FU	$< 2e-16$	$3.6e-07$	-	-
SF	$< 2e-16$	$< 2e-16$	$< 2e-16$	-
SP	$9.0e-10$	$< 2e-16$	$< 2e-16$	$< 2e-16$

À l'échelle temporelle, durant la période de suivi, la variation intra-annuelle a montré une allure en dent de scie de la production à l'exception de la production de la ligne à main et du fusil-harpon ayant une évolution quasi-constante (Fig. 63).

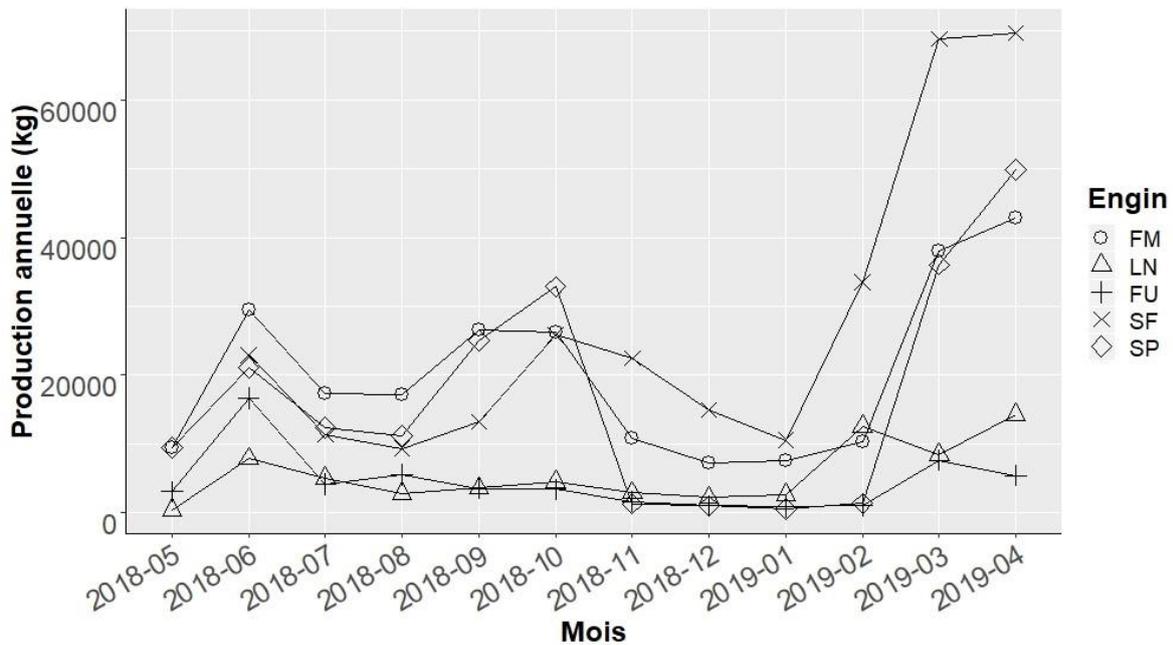


Fig. 63: Variation intra annuelle de la production halieutique par engin

Généralement, une légère augmentation de la production a été observé en mois d’octobre 2018, puis une diminution jusqu’en janvier 2019. Or, elle a augmenté à partir du février 2019 où on a constaté des pics de production en mois de mars et avril 2019. Bien que cela ait liée à l’effort de pêche, cette situation pourrait être due vraisemblablement à l’abondance des ressources en poissons récifaux suivant leurs cycles biologiques après la période de recrutement de juvéniles.

3.3.4. Distribution de la production par village

A l’échelle de la baie de Toliara, la production halieutique se reparti en fonction du village (Fig. 64). Des zooms cartographiques sont présentés en Annexe 11.

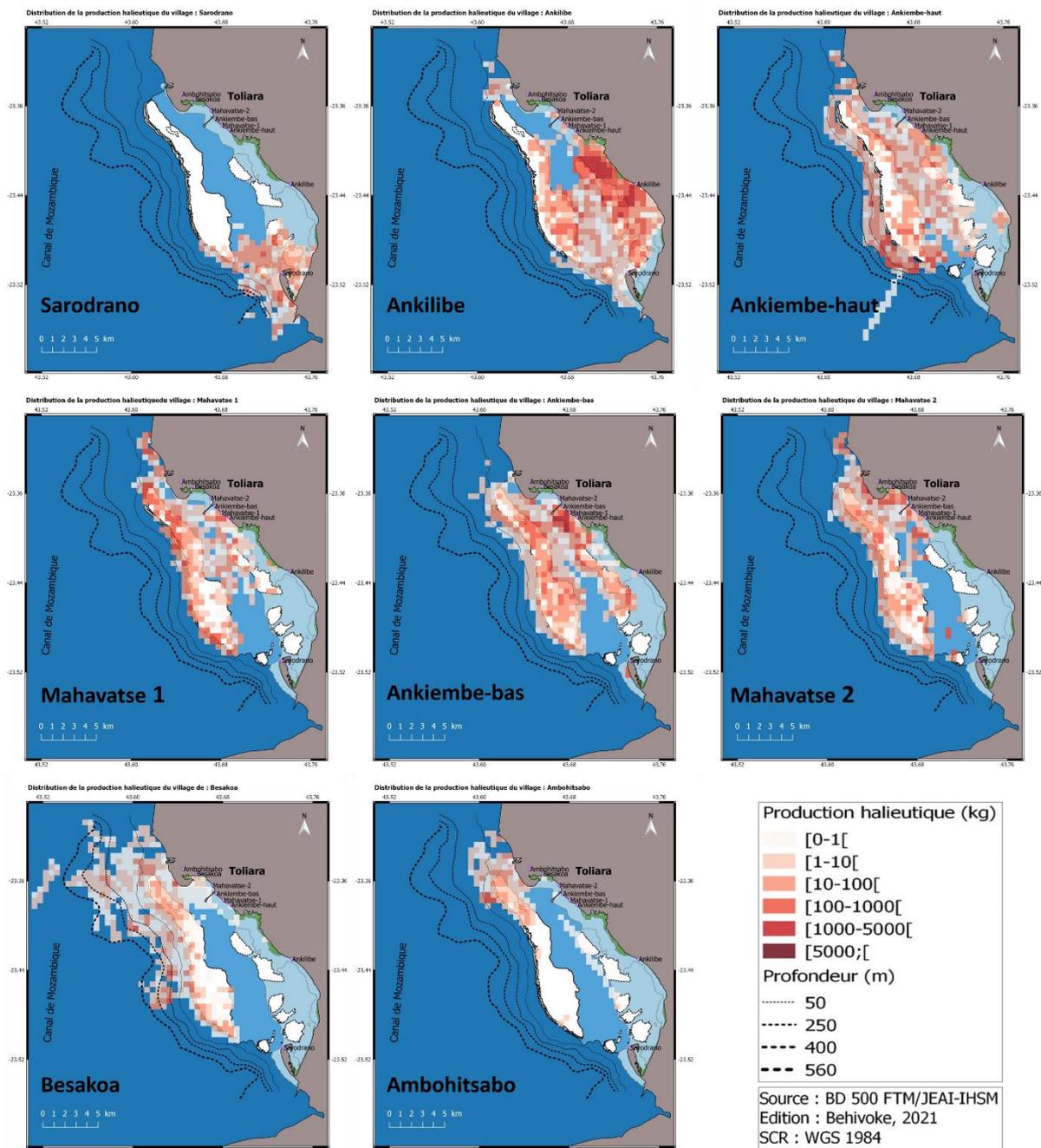


Fig. 64: Distribution halieutique par village de la baie de Toliara

Le village d'Ambohitsabo possède une faible surface de production ($XX \text{ km}^2$) ; tandis que celui d'Ankiembe-haut dispose la surface de production la plus élevée ($XX \text{ km}^2$) alors qu'il en assure que 4% de la production en poissons récifaux. Le village de Besakoa et d'Ambohitsabo ont respectivement la production minimale de 1% et 2%.

Seul le village d'Ankilibe assure 53% (556 131 kg) de la production. La part du village d'Ankiembe-bas n'est pas négligeable avec 202 427 kg soit 19%. Les six autres villages ont une valeur en dessous de 100 000 kg et représente 27% (Fig. 65).

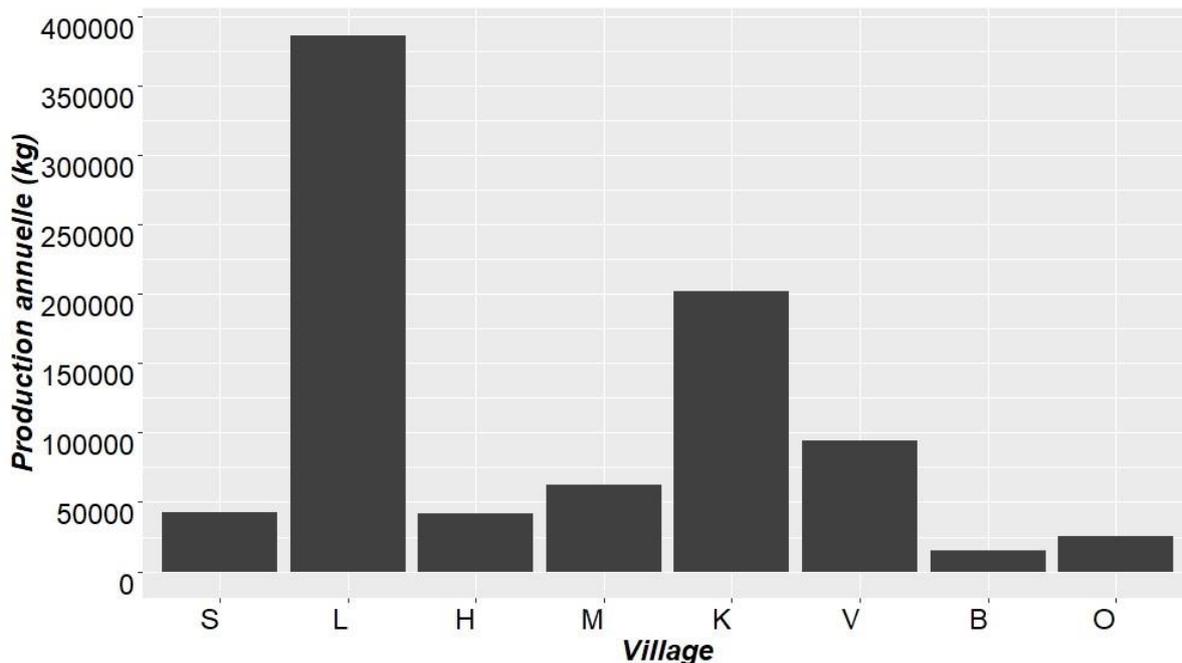


Fig. 65: Production totale par village

Généralement il existe une différence significative entre les 8 villages engins d'après le test de Kruskal-Wallis ($p < 0.05$). Mais la comparaison par pair de Wilcoxon a montré qu'il n'y a pas de différence significative entre certains villages comme le montre le (Tableau 17) où les valeurs sont soulignées.

Tableau 17: Test de comparaison deux à deux entre la production des villages

	S	L	H	M	K	V	B
L	2.5e-08	-	-	-	-	-	-
H	< 2e-16	< 2e-16	-	-	-	-	-
M	<u>0.73313</u>	4.1e-07	6.9e-15	-	-	-	-
K	<u>0.00095</u>	< 2e-16	5.7e-12	<u>0.08346</u>	-	-	-
V	<u>0.00058</u>	< 2e-16	5.3e-08	<u>0.05080</u>	<u>0.73313</u>	-	-
B	< 2e-16	< 2e-16	< 2e-16	< 2e-16	< 2e-16	< 2e-16	-
O	1.2e-05	< 2e-16	0.02665	0.00336	<u>0.26887</u>	<u>0.42717</u>	< 2e-16

A l'échelle temporelle, la variation intra annuelle a montré une allure de production presque stationnaire pour tous les villages sauf pour les cas du village d'Ankilibe et d'Ankiembe-bas qui sont très variables (Fig. 66).

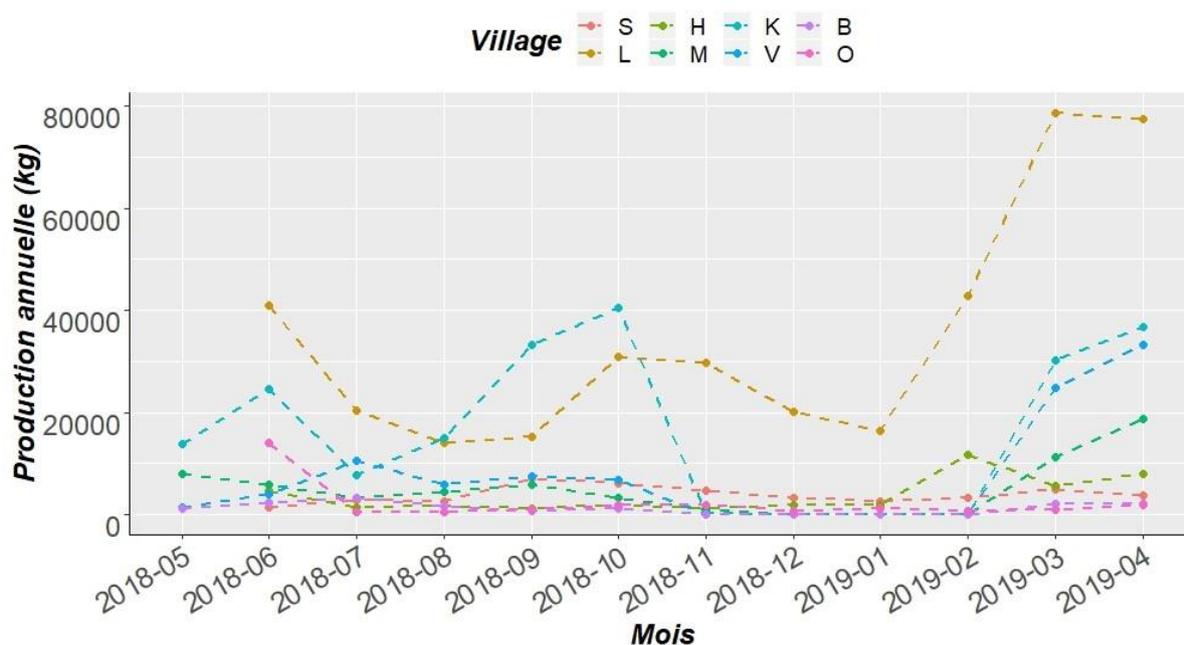


Fig. 66: Variation intra annuelle de la production par village

La présence des pics pour les villages d'Ankilibe et d'Ankiembe-bas dépassent la barre de 20 000 kg atteignant des pics en septembre-octobre 2018 et mars-avril 2019 pourrait s'expliquer par la spécificité des paramètres écologique et environnementaux dans leurs zones de pêche. Toutefois, la diminution de production en saison chaude (novembre 2018-janvier 2019) et leur augmentation en début saison fraîche sont est très surprenante par rapport à la connaissance habituelle. Les changements globaux que la baie de Toliara a subis depuis ces dernières décennies auraient des impacts sur la disponibilité de ressources en poissons récifaux dont ceux-ci dépendent de l'écosystème menacés par des pressions anthropiques et naturelles.

3.4. Discussion

L'exploitation des ressources halieutiques dans la baie de Toliara s'effectue par une pêche multi-engins entrainant une multitude des captures. Le suivi des trajectoires de pirogues couplé avec le suivi des captures permet de ressortir la dynamique de l'exploitation récifale à l'heure actuelle.

3.4.1. Diversité des captures de pêche

La plupart de pêcheurs ciblent différentes catégories de poissons suivant leurs habitats. Cette étude a montré la diversité de la composition des captures par le filet maillant, la ligne, le fusil-harpon, le chalut à moustiquaire et la senne de plage dans la baie de Toliara (sud-ouest de Madagascar).

Le filet maillant rapporte beaucoup plus de familles que les autres engins de pêche. Actuellement, on en dénombre 75 familles de poissons dans la zone. C'est-à-dire, la diversité a presque doublé si on se réfère aux résultats de Laroche and Ramanarivo (1995) qui avait identifié 35 familles. En effet, il existe 42 familles de poissons qui sont nouvellement cibles de pêcheurs pour la vente ou destiné pour l'autoconsommation. Ce sont majoritairement des poissons à faible valeur commerciale (Annexe 9) dont les plus remarquables parmi les dix premiers familles les plus dominants dans la baie sont : les Labridae, Gobidae, Blenniidae, Apongonidae et Pomacentridae (généralement des familles de poissons issues du chalut à moustiquaire et de la senne de plage). L'augmentation de la diversité de captures témoigne la pression de pêche que subissent les zones et les ressources récifales. Ainsi, on peut dire que la pratique de filet à moustiquaire un indicateur de pression de l'écosystème récifale. D'ailleurs, Laroche et al. (1997) confirmait que à cause de l'augmentation ininterrompue de l'effort de pêche, les pêcheurs utilisent de filets de petite maille. En fait, la forte croissance démographique augmente la demande en poissons de récif pour le besoin alimentaire de la population rurale et urbaine. Entres autres, nombreux auteurs avaient également mentionné la diversité des poissons dans la baie de Toliara, mais d'une manière ponctuelle et combiné avec d'autres groupes de poissons (Rakotoarinivo, 1998; Brenier, 2009; Mahafina, 2011), mais nous aimerions relever celui de Ramahatratra (2014) qui avait recensé 71 familles de poissons dont les captures ont été dominé par les Clupeidae et les Hemiramphidae. La composition des captures au niveau de la pêcherie tropicale devrait comporter des espèces démersales du récif corallien et des espèces en relation avec les herbiers de phanérogames marines (Gell et Whittington, 2002) , bien qu'il soit possible de capturer des espèces pélagiques telles que les sardines par la senne et les espèces de la famille des Hemiramphidae par le filet maillant (McClanahan and Mangi, 2004) ce qui est confirmé par la présente étude.

La perte de la biodiversité est habituellement due à la dégradation irréversible de l'écosystème. Pourtant la baie de Toliara est une zone potentielle d'approvisionnement en post-larves et de recrutement en juvéniles de la zone (Mahafina, 2011; Jaonalison, 2019) malgré son état critique (Ranaivomanana, 2006; Bruggemann et al., 2012). Cependant, la situation actuelle montre les techniques et les engins de pêche sont de moins en moins sélectifs, et que la quasi-totalité des captures de poissons est valorisable quel que soit sa taille (ex : Apongonidae ou poisson cardinal) ou sa dangerosité (ex : Scorpaenidae ou poisson pierre) ou sa forme (ex : Ostraciidae ou poisson coffre). D'où l'importance de la diversité des poissons dans les captures récifales.

3.4.2. Statut d'exploitation des ressources récifales

Dans le sud-ouest de Madagascar, la baie de Toliara est l'une des zones par excellence pour l'exploitation de poissons récifaux, proche de l'agglomération urbaine. Elle offre une zone récifo-lagonaire propice à la pêche côtière dans la zone. Les pêcheurs utilisent leurs engins de pêche dans le

but de capturer le maximum de produits qui sont destinés pour le marché intérieur et pour l'exportation. A part l'autoconsommation, en moyenne 80% des produits de la pêche sont destinés à la vente (Behivoke, 2009).

Dans l'Océan Indien et Pacifique, un récif bien sain et bien géré peut produire de 5 à 10 tonnes de poissons par km² par an (Spalding et al., 2001). Selon les résultats de l'estimation de la production halieutique, le rendement de la pêche dans la baie de Toliara correspond à 6.6 tonnes/an/km². Cet indicateur permettrait d'exprimer que la zone demeure productive même si l'état du récif est dégradé (Andréfouët et al., 2013) et que l'application de règles de gestion de ressources marines est presque faible.

A l'échelle mondiale, le rendement de la pêcherie récifale varie de 0,2 à 40 tonnes/an/km² avec un rendement maximal durable (multi-espèces) estimé à de 5 tonnes/an/km² (Newton et al., 2007). En effet, le rendement de de pêche de la baie de Toliara dépasse le seuil de durabilité où les ressources sont en surexploitation. Les ressources pourraient-être surexploitées ou épuisées si l'effort de pêche actuel (lié au nombre de pêcheur) persiste et s'accroît. D'ailleurs, Meadows et al. (1972)avançaient que les ressources naturelles seront épuisées si les croissances démographiques et économiques ne s'arrêtent pas. De même, selon la théorie de la «tragédie de l'accès libre», en l'absence de régulation, si une population croissante d'utilisateurs exploite une ressource finie, la part de chacun est vouée à se réduire pour finalement disparaître ainsi que la ressource.

A l'échelle temporelle, la production halieutique de la baie de Toliara a évolué aussi bien quantitativement que qualitativement (composition des captures). Ainsi, elle a diminuée par rapport aux précédents résultats où le rendement a été estimé à 12 tonnes/an/km² (Laroche and Ramanarivo, 1995), et à 14 tonnes/an/km² (Brenier et al., 2013). Cette diminution de production pourrait-être due à l'utilisation des engins et techniques de pêche destructrices le filet à petite maille et la senne de plage (Laroche et al., 1997) auquel s'ajoute le chalut à moustiquaire qui s'est développé depuis ces dernières années ainsi que la dégradation continue des habitats récifaux sans action de restauration à grande échelle.

3.5. Conclusion

Le suivi de trajectoires de pirogues a été réalisé en parallèle avec le suivi de captures. Le couplage de ces deux méthodes nous a permis de décrire les caractéristiques de la production halieutique dans la baie de Toliara. La production halieutique se répartit inégalement dans la baie de Toliara. Les résultats de de cette étude montre que les villages d'Ankilibe et d'Ankiembe-bas assurent la majorité de la production à hauteur de 73%. Les engins chalut à moustiquaire et le filet maillant sont les plus performants en termes de production du faite qu'ils sont responsables de 69% de la production globale dans la zone.

Avec 1040 tonnes de production annuelle, on peut classer que la baie de Toliara est une « garde à manger » de protéines animales d'origines marine pour la population de Toliara et ses environs.

Les captures de pêche dans la baie sont très diversifiées avec 75 familles recensées. Par rapport aux deux décennies, bon nombre de poissons sont devenus comestibles aussi bien pour l'autoconsommation que pour la vente. L'utilisation accentuée de la moustiquaire en tant que élément constitutif (poche) de filet (chalut ou senne) engendre que les captures actuelles se basent plutôt pour la quantité que la qualité.

La production halieutique par village ou par engin ne dépend pas de la surface de production exploitée par les pêcheurs.

L'étude de trajectoire associée aux données de captures nous a permis de cartographier à haute précision la distribution de la production halieutique au milieu récifal qui est une information utile dans la gestion des pêcheries à petite échelle.

DISCUSSION GENERALE

Cette thèse a pour objectif général de diagnostiquer les caractéristiques spatio-temporelles de la petite pêche à Madagascar, en particulier la pêcherie récifale de la baie de Toliara dans le sud-ouest de Madagascar. L'étude a été focalisée sur la pêche aux poissons récifaux par les pirogues traditionnelles à voile dans le but de comparer les résultats antérieurs la diversité et taux de capture ainsi que les engins (il y a près de 30 ans), et de mettre à jour les connaissances actuelles face aux changements socio-environnementaux que le littoral de la baie de Toliara a subi. Nous avons adopté une approche innovante par l'utilisation de traceurs GPS mobiles sur les pirogues pour le suivi (enregistrement) de leurs trajets. Nous avons analysé les données des trajectoires, étudié leurs comportements et déplacements avec les données de captures y associées. La thèse a pu définir des méthodes d'analyses de trajectoires des pirogues traditionnelles à voile en identifiant les événements de pêche d'une manière statistique et automatique, d'estimer quantitativement et spatialement l'effort de pêche effectif et la production halieutique correspondante. Les principaux points de discussion générale sont abordés ici par rapport au contexte mondial de la petite pêche.

Développement de la méthode de suivi halieutique

Contraintes techniques

La recherche sur la méthode d'analyse statistique sur la petite pêche est en plein essor par l'utilisation des équipements permettant d'enregistrer le mouvement des petites embarcations comme le traceur GPS (Galotto-Tebar et al., 2019; Cardiec et al., 2020; Behivoke et al., 2021). Les GPS ont été déployés aux pêcheurs d'une manière tournante pendant une année. L'absence d'électricité dans les villages a été un défi logistique majeur pour le chargement de la batterie du GPS et pour la prise photo des échantillons de poissons pour étudier la composition taxonomique des captures. Ceci s'ajoute à une ingéniosité en informatique où les données GPS et celles des captures sont stockées dans un serveur en ligne afin de faciliter son accès et sa manipulation (à distance) par une connexion internet. Ce système de gestion de base de données est un atout pour le stockage et la gestion de données et est valorisable pour un système d'information halieutique qui pourrait être utile pour la recherche, l'administration de pêche ou le gestionnaire d'aire marine protégée.

Pour une réplique de la méthode de suivi dans une autre zone, quelques principales précautions ci-après devraient-être prises en compte :

- Assurer l'intégration sociale de l'équipe et du programme de suivi afin d'éviter tout malentendu (par exemple certains pêcheurs pensent que le GPS contient une caméra pour espionner leur vie privée, une bombe qui peut exploser à tout moment, un échosondeur qui détecte des bancs de poissons et un appareil générateur de mauvais temps). Une séance

d'information sur la modalité de suivi est nécessaire en montrant le contenu d'un boîtier de GPS.

- Tester le protocole de suivi et d'échantillonnage de captures, en utilisant des fiches traduites en dialecte local et une balance portative (suspendue et à aiguille).
- Impliquer les pêcheurs dans le processus de suivi. Un assistant local villageois est nécessaire pour d'assurer la supervision des pirogues équipées de GPS et la remontée des informations vers le laboratoire en cas de nécessité.
- Appuyer l'équipe de chercheurs par des assistants laboratoires qui sont d'une aide précieuse dans l'étude taxonomique de captures et dans la photographie des échantillons de poissons. Un appareil photo étanche, un dispositif de prise d'image efficace et une espace de travail adéquate sont nécessaires pour la manipulation des échantillons. Bien qu'il existe de document d'identification de taxons de poissons, il est aussi indispensable d'utiliser un guide pratique issu de la compilation des taxons généralement observés dans la zone.

A titre de suggestions, il semble nécessaire d'essayer le suivi de trajectoires de pirogues à l'aide de GPS alimenté par un système de panneau solaire ou d'utiliser des batteries de plus grande capacité afin d'améliorer l'autonomie de la batterie du GPS. Cela pourrait optimiser les coûts de la logistique et assurer l'alimentation continue du GPS jusqu'au moment de leur récupération.

La méthode d'analyse automatique des opérations de pêche : une tendance mondiale ?

La valorisation de la technologie d'information et de communication est très convoitée au profit des embarcations de petite pêche depuis ces derniers temps. L'étude des mouvements des pêcheurs permet de comprendre leurs stratégies spatiales. Des recherches très récentes montrent l'adaptabilité de différents équipements d'enregistrements d'activités de pêche à bord pour collecter les trajectoires de bateaux (Mendo et al., 2019; Cardiec et al., 2020; Behivoke et al., 2021; Tasseti et al., 2022).

La méthode d'analyse développée (dans le chapitre I) a permis de prédire les événements de pêche de la pêcherie récifale multi-engins et multi-spécifiques. Grâce à ce modèle de prédiction, on a pu estimer l'effort de pêche effectif (en heure) et cartographier d'une manière géo-référencée la zone de pêche des pêcheurs. Quoiqu'il en soit, l'analyse automatique par la technique d'apprentissage a été vraiment complexe du fait de la création des co-variables utilisées dans l'algorithme de Random Forest. Cependant, l'analyse utilisant le filtre de vitesse pourrait être une alternative.

Les caractères de semi-nomadisme des pêcheurs Vezo nous a permis de focaliser les "pêcheurs résidents au village" pour être équipés de GPS. Les GPS ont été déployés en fonction des pêcheurs/engins cible de suivi. Ainsi, lors d'une sortie en mer, en cas de changement brusque des conditions hydrodynamiques ou d'identification de bancs de poissons pélagiques, certains pêcheurs

changent de techniques. Cette situation pourrait entraîner une confusion de comportement de trajectoires car le GPS n'enregistre que les trajectoires d'une pirogue codifiée au préalable.

La codification des pêcheurs et des engins ne tiennent pas compte de la variété de techniques de pêche. Par exemple, le filet maillant, l'engin le plus pratiqué dans la zone contient aux moins deux variétés de techniques (encerclant et barrage), ce qui revient à dire qu'il est difficile de distinguer les caractéristiques spécifiques de ces deux techniques alors que leurs opérations de pêche sont couramment différentes. Ce genre de détail aurait sans doute des effets sur le processus de modélisation statistique utilisé.

Dynamique spatio-temporelle de la pêcherie récifale

Evolution de pressions de pêche dans la baie de Toliara

La compréhension des engins de pêche les moins ou les plus utilisés (spatialement et quantitativement) est un apport scientifique majeur à la gestion d'une pêcherie récifale complexe dans la zone Indo-Pacifique, comme dans la baie de Toliara au sud-ouest de Madagascar, étant donné que l'effort de pêche est considéré comme un moyen privilégié de gérer l'activité halieutique (Gascuel, 1993). Le filet maillant (41% de proportion d'effort global) exerce beaucoup de pression dans la baie de Toliara, étant donné que c'est l'engin le plus important en nombre. La pratique de cet engin entraîne de fortes intensités d'effort de pêche aussi bien dans la zone lagonaire que récifale. Cette tendance n'a pas changé depuis plus de 20 ans, Laroche and Ramanarivo (1995) ayant rapporté que ces zones ont été exploitées surtout par le filet maillant et aussi d'autres engins (ligne à main et senne de plage). La baie de Toliara est pleinement exploitée dont les pêcheurs ubiquitaires d'Ankilibe et d'Ankiembibas sont les responsables de 53 des pressions de pêche. D'après les trajectoires des pirogues, les pêcheurs arrivent jusqu'à 13 km du rivage pour exploiter la zone au large du grand récif, mais leurs activités ne dépassent généralement pas au-delà de l'embouchure du fleuve Fiherenana au nord et celui de l'Onilahy au sud.

A l'échelle spatiale, la zone lagonaire notamment la terrasse peu profonde est la plus exploitée par rapport au grand récif. C'est une zone à faible profondeur où se concentre la pratique du chalut à moustiquaire accentuée par les pêcheurs immigrants. L'effet de la migration sur le littoral est très palpable au sud du village d'Ankilibe où se sont développés les deux hameaux (Kondeorejely et Antanandreviky) qui pourraient devenir des villages administrativement indépendants (naissance de nouveau Fokontany comme collectivité territoriale) selon la tendance démographique et socio-économique. Les effets de la migration sur la pêche est comparable à ce qui se passe dans la baie de Ranobe où le développement de la senne de plage était et jusqu'à présent une problématique majeure (Davies et al., 2009; Randrianambinintsoa, 2016), le nombre de pirogues et de pêcheurs augmentant

au fil du temps. D'ailleurs, l'existence de pirogues superposées et suspendues au niveau des sites débarquement témoigne la saturation de l'espace pour les pêcheurs.

La spatialisation et la quantification de l'effort de pêche est l'un des principaux indicateurs pour expliquer la pression de pêche dans une zone. D'autres études montrent que la pêche aux poissons pélagiques et la pêche à pied exercent aussi des pressions non négligeables sur l'écosystème récifal (Salimo, 1997; Rakotoarinivo, 1998; Brenier, 2009). Pour ce cas d'études de la baie de Toliara, la pression de pêche dont traite cette thèse s'est limitée à la pression de pêche piroguière des poissons récifaux.

Développement du chalut à moustiquaire

Le développement d'engins de pêche non sélectifs a été constaté dans la baie de Toliara comme le cas du chalut à moustiquaire. D'après les pêcheurs, son apparition avait commencé vers les années 1990, en parallèle avec l'arrivée des personnes venant de la zone d'Onilahy et qui se sont installées à Ankilibe. Son utilisation a été recensée officiellement à Ankilibe par Mahatante (2008) au nombre de 16 et actuellement de 108, et ce nombre a augmenté de 7 fois plus il y a dix ans. Le chalut à moustiquaire est très pratiqué avec 82% de sa proportion d'utilisation à l'échelle de la baie

Comme la senne de plage, le chalut à moustiquaire est-il un engin non règlementaire ? Dans l'article 17 du Code de la pêche et de l'aquaculture (Loi n°2015-053 du 02/12/15), il est mentionné que : " Il est interdit : d'utiliser tout engin, méthode et technique de pêche ou dispositif destructif et non sélectif". Malgré cette interdiction, l'usage du chalut à moustiquaire continue parce que la petite pêche récifale est une pêche surtout de subsistance, de revenus et de protéines pour les ménages locaux (Barnes-Mauthe et al., 2013). Cette pêche au filet à moustiquaire se répand et se développe aussi dans d'autres régions de l'Océan Indien (Bush et al., 2017; Short et al., 2018).

Le fait que le chalut à moustiquaire capture une importante proportion de juvéniles de poissons récifaux semble justifier que cet engin soit potentiellement destructif, bien que les captures du chalut à moustiquaire ne soient pas tous des juvéniles (Raharinaivo et al., 2020). Il y existe des espèces de poissons déjà adultes même si leurs tailles sont petites comme les *Stethojulis* sp (Labridae), *Oplopomus* sp (Gobiidae) et *Petroscirtes* sp (Blenniidae). Ainsi, faire interdire ou disparaître le chalut à moustiquaire aurait un avantage écologique au niveau de l'habitat. Néanmoins cela engendrerait une perte socio-économique aux pêcheurs. Promulgué un texte règlementaire est un défi majeur par l'administration étatique et le vide juridique nécessite une révision de texte règlementaire. Malgré cela, il est toujours nécessaire de faire la concertation avec les communautés en s'appuyant sur des données scientifiques pour avoir l'équilibre dans le respect du concept du développement durable. D'où l'importance de la recherche participative en impliquant les acteurs clés de la filière concernée.

La plupart des pêcheurs concordent à dire que l'utilisation des engins de pêche destructeurs sont les principales raisons de la diminution de ressources (Mahatante, 2008). Par exemple, la senne de plage capture une grande partie de diversité floristique et faunistique comme les poissons juvéniles, les crustacés, les céphalopodes, les algues et même des coraux (Tovondrainy, 2004). Même dans ou à proximité d'une aire marine protégée où la co-gestion (communautaire et étatique) est bien appliquée, la persistance du mauvais temps durant laquelle la mer est inaccessible oblige certains pêcheurs à pratiquer la senne de plage pour leurs survies (Behivoke, 2011). Le déploiement de ces engins destructifs persiste toujours du fait de l'importance de la petite pêche pour la subsistance et le revenu (Raharinaivo, 2018). D'après ce constat, la baie de Toliara subit ce qu'on appelle "Malthusian overfishing" ou la "surpêche malthusienne" défini par Pauly (1993) comme une situation dans laquelle les petits pêcheurs des pays en développement se livrent à une "destruction massive des ressources" dans le but de maintenir leurs revenus.

Augmentation de la diversité des captures de poissons récifaux

La diversité au niveau de la famille permet d'avancer des analyses comparatives. Au total 75 familles de poissons ont été identifiées contre 35 familles que (Laroche and Ramanarivo, 1995) avaient avancé. Un très large éventail de familles est exploité dans la zone même les poissons ayant un intérêt plutôt bioécologique qu'économique comme les Apogonidae, Blenniidae, Congridae, Diodontidae, Pempheridae, Plotosidae, Scorpaenidae, Tetraodontidae, Torpedinidae,... dont la liste exhaustive est détaillée dans l'Annexe 9.

La caractérisation de la diversité des captures des pêcheries récifo-lagonaires constitue une autre difficulté récurrente en milieu corallien. Elle est due à la grande diversité des poissons capturés (Dalzell and Adams, 1996), et donc à leur identification. En particulier, la zone entre Madagascar et les côtes est africaines est considérée comme un « hotspot » de biodiversité marine (McClanahan et al., 2015). Zemplak et al. (2009) estiment par exemple que plus de 300 espèces identifiées et présentes aussi bien sur les côtes sud-africaines qu'en Australie, correspondent en réalité à deux espèces différentes pour chaque espèce. A Madagascar le nombre d'espèces de poissons marins est estimé à 1798 (Fricke et al., 2018). Beaucoup de ces espèces sont exploitées, notamment au stade juvénile. En conséquence, les captures des pêcheurs sont le plus souvent très difficiles à identifier jusqu'à l'espèce à partir des clés d'identification traditionnelle (e.g., Fischer et Bianchi 1984). D'où la nécessité de l'approche moléculaire qui est capable d'identifier les espèces à différents stades de développement, mais aussi de distinguer des espèces qui sont similaires morphologiquement (Bingpeng et al., 2018).

La conséquence de la dégradation de l'écosystème corallien très exploité pourrait résulter d'une diminution de la diversité marine sur tout le littoral sud-ouest de Madagascar (Vasseur, 1997 ; Gough, 2009 ; Harris et al., 2010). Les indices de diversité sont censés être de bons indicateurs des effets de la

pêche. Toutefois, l'utilisation de la diversité, notamment le nombre de taxons, comme indicateur d'exploitation pose quelques difficultés. La diversité est estimée à partir d'un échantillon dont la taille dépend de l'effort d'échantillonnage. Plusieurs études ont établi un lien positif entre la taille de l'échantillon et la diversité estimée d'un milieu (Lidgard, 2000 ; Petry et al. 2003 ; Bady et al. 2005).

Baisse de la production halieutique de poissons récifaux

Bien que la production halieutique de la baie de Toliara ait diminué de 45% par rapport aux années précédentes (Laroche and Ramananarivo, 1995), elle reste toujours dans l'intervalle de la capacité de production récifale (5 à 10 t/an/km²) que Spalding et al. (2001) avait avancé, vu que le rendement estimé est de 6.6 tonnes/an/km². Les études antérieures affirmaient que la baie de Toliara est soumise à la surexploitation par la pêche (Laroche and Ramananarivo, 1995; Brenier, 2009; Mahafina, 2011). La baisse de la production confirme bien la surexploitation continue de la pêcherie dont la tendance est problématique. Si depuis les années 1990, la zone était en surpêche, à l'heure actuelle on aurait pu s'attendre à une baisse encore plus drastique du fait de l'augmentation de pression de pêche durant ces trois décennies. Mais, la baie de Toliara demeure productive et continue à approvisionner en poissons à un niveau soutenu la ville de Toliara et ses périphéries. Cette situation paradoxale pourrait s'expliquer par une forte potentialité de colonisation ichtyologique et de repeuplement du récif dans la baie de Toliara (Mahafina, 2011) et une importante colonisation en poste-larves malgré la dégradation des habitats récifaux depuis les années 1990 (Harris, 2010; Bruggemann et al., 2012). Cette hypothèse peut être soutenue par l'idée de la résistance de la pêcherie récifale face à la dégradation de récifs et à la pêche intensive. Les récifs sains ont la plus grande biomasse en poissons récifaux mais ne sont pas nécessairement les plus productifs. Ainsi, les récifs coralliens caractérisés par des coraux morts, relativement complexes et dégradés, pourraient servir de lieux de pêche efficaces et précieux à court ou moyen terme (Rogers et al., 2017). En outre, contrairement à ce que l'on croit généralement, les modèles de gestion de pêcherie non réglementés, non sélectifs et adaptatifs à petite échelle pourraient être globalement plus productifs que l'exploitation de quelques espèces cibles, bien que cette hypothèse fasse l'objet de débats (Kolding and van Zwieten, 2011).

Enjeux de la gestion durable de la pêcherie récifale

Dans la baie de Toliara, le déplacement des pêcheurs pourrait augmenter la pression de pêche que subit déjà la zone (Harris, 2010), et les juvéniles deviennent l'objet de capture (Ramahatratra, 2014; Raharinaivo, 2018). A titre d'exemple, les activités du chalut à moustiquaire ont montré une forte intensité de l'effort de pêche au niveau du banc corallien de *Mareana*. Effectivement, cette zone (incluant les toponymes de *Beakio* et *Befay foty*) a été décrite par Jaonalison (2019) comme une zone de recrutement importante pour les poissons dans le lagon.

La durabilité des moyens de subsistance des pêcheurs dépend en grande partie de la protection des zones d'herbiers (Syukur et al., 2016) qui accueillent une forte proportion des espèces de poissons provenant des habitats dont les récifs coralliens (Honda et al., 2013). Nombreux auteurs mentionnent les effets positifs (effet réserve) de la mise en protection d'une zone. Mais, l'efficacité de la mise en place d'une réserve marine (temporaire ou permanente) dépend de l'acceptabilité des pêcheurs qui devraient avoir des gains écologiques et des bénéfices socio-économiques de l'aménagement spatial/temporel. Cette proposition a été déjà discutée dans la thèse de Mahafina (2011). Une autre proposition est le développement de l'aquaculture villageoise de l'espèce *Siganus sutor* (marguerite) comme activité génératrice de revenus pour les petits pêcheurs, car les juvéniles sont facilement accessibles dans les herbiers (Syukur et al., 2016). Une étude expérimentale a été réalisée par Ravelohasina (2017) et Jaonalison (2019) en donnant des résultats prometteurs. Actuellement, l'expérience est en cours dans le cadre de projets de recherche.

Des mesures de gestion sont nécessaires face à l'augmentation de la pression liée à la pêche récifale qui utilise des engins destructifs comme le chalut à moustiquaire ou la senne de plage. La gestion communautaire des ressources marines pourrait être une piste envisageable. Cependant, son efficacité dépend de la motivation de la communauté locale de base. D'après l'étude réalisée par Vollandrae (2019) la longueur des chaluts à moustiquaires utilisés à Ankiembe ($56,1 \text{ m} \pm 9 \text{ m}$) sont ainsi beaucoup plus grands que ceux utilisés à Ankilibe ($24,4 \text{ m} \pm 13,7 \text{ m}$). La réglementation de la dimension du filet pourrait donc être une autre option, mais cela perturbe la liberté du pêcheur d'avoir des engins plus performants donc plus productifs à un moment donné (mais pas à plus long terme). Le degré de dépendance de la communauté littorale aux activités de pêche est très haut (Ranaivomanana, 2006). Cela revient à dire que la limitation de l'accès libre compromettra le rôle de la pêche à petite échelle en tant que source d'assurance, notamment pour les plus pauvres et les moins favorisés (Kolding and van Zwieten, 2011).

Face à la pression grandissante dans la baie, il n'existe pas de plan de conservation ou de gestion, alors que la zone a été désignée comme prioritaire dans le Programme National GIZC et la réserve de biosphère marine de l'UNESCO. Cependant, selon le Décret 2015-808 du 05/05/15, la Nouvelle Aire Protégée de la baie de Ranobe (incluant la baie de Toliara) a été classée par le Gouvernement Malagasy dans le Système d'Aire Protégée à Madagascar. Mais, jusqu'à présent son mode de gouvernance reste à déterminer avec les parties prenantes. Cette approche est beaucoup plus difficile à mettre en œuvre à une échelle appropriée dans les régions urbaines comme la baie de Toliara où la pression démographique et la pression de pêche sont très élevées et où les habitats sont fortement dégradés (Brenier et al., 2012). Dès lors, les aires marines protégées ne parviennent pas à arrêter l'exploitation forcée des ressources halieutiques, qui dégrade des écosystèmes marins exceptionnels, bouleverse

les populations locales, entraîne divers conflits, et réduit ainsi les possibilités d'arrangements entre pêcheurs (Grenier, 2017).

Une récente recherche (Newton et al., 2007) démontre que plus de la moitié (55%) des 49 pays insulaires exploitent leur pêcherie récifale d'une manière non durable par rapport à leurs états d'exploitation. Face à la croissance démographique, les pressions de pêche sur les récifs augmentent d'une manière alarmante. A l'échelle mondiale, la zone récifale utilisée pour les pêcheries dépasse la superficie effective disponible. La projection montre qu'un surplus de 196.000 km² en surface récifale sera nécessaire en 2050 (Newton, 2007). Sur le littoral sud-ouest de Madagascar, l'augmentation du nombre de pêcheurs liée à la croissance démographique contribue à l'augmentation de la pression de pêche. Ce constat accentue les menaces sur les récifs coralliens et la surexploitation des ressources marines (SCOR-Boston, 1998). Cependant, la bio-capacité de l'écosystème récifal devrait être constante sans aménagement du littoral comme la création de zones récifales artificielles. Les aménagements en récifs artificiels pourraient constituer une réponse possible aux nombreux problèmes concernant les ressources vivantes côtières, comme la surpêche et la dégradation des écosystèmes et des habitats (Charbonnel, 2007). Différents modèles de récifs artificiels ont été expérimentés et développés dans la région à savoir le *Vato Mahavelo* (Reef Doctor, 2016), le *Fishes Banking ecotechnology*[®] (Behivoke, 2018) et Autonomous Reef Monitoring Structures ou ARMS (IH.SM, 2021). Une recherche basée sur les effets des récifs artificiels sur les captures des poissons récifaux s'impose afin d'approfondir les mesures d'aménagement et de gestion.

Étant donné qu'il est possible d'avoir une pêche durable dans un écosystème et un environnement dégradés, il incombe au public et aux gestionnaires de regarder au-delà des mécanismes d'extraction de la biomasse pour s'intéresser aux questions plus larges de l'écologie et de la diversité de l'environnement de pêche (ISRS, 2004). Ce constat est globalement contradictoire par rapport à la connaissance commune pour laquelle la durabilité de la pêcherie est liée à la santé de l'écosystème. Voilà pourquoi l'étude pluridisciplinaire, axée sur la comparaison de productivité issue d'un écosystème en bonne santé et dégradée, est primordiale notamment dans le secteur de la pêcherie récifale.

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

Dans ce travail, nous avons analysé la faisabilité technique, sociale, logistique et scientifique de l'utilisation des traceurs GPS mobiles pour l'étude trajectométrique des pirogues à voile de la pêche récifale de la baie de Toliara. Le traceur GPS a été utilisé pour caractériser dans le temps et dans l'espace les activités de pêche. Selon les types d'engins, des trajectoires de références ont été utiles pour la modélisation d'algorithme d'apprentissage permettant d'identifier automatiquement les opérations de pêche. L'algorithme de Forêt Aléatoire a pu détecter avec une grande précision et fiabilité les « événements pêche » et « événements non-pêche » des cinq engins dominants de la baie de Toliara (filet maillant, ligne à main, fusil-harpon, chalut à moustiquaire et senne de plage,). Grâce à cette méthode, on a pu cartographier et estimer avec précision la distribution et la quantité en heure de l'effort de pêche qui est un indicateur de pression (chapitre I). A l'issue de ce travail, il faudrait diversifier aussi les méthodes d'analyses. Le modèle de prédiction basé sur le filtre de vitesse devrait être approfondi pour avoir une prédiction aussi précise que celle du modèle de Forêt Aléatoire, étant donné que le seuil de vitesse (de la pirogue) est un bon prédicteur des événements de pêche sauf pour certains engins (senne de plage et chalut à moustiquaire) tout en étant plus simple d'utilisation pour le traitement des données GPS.

Le modèle de Forêt Aléatoire a été appliqué sur le jeu de données collectées pendant un an sur une centaine d'embarcations de pêche récifale entre le mois de mai 2018 et avril 2019. La caractérisation spatio-temporelle des activités de pêche montre que 90% de l'effort de pêche sont focalisés géomorphologiquement au niveau du récif et du lagon. Avec 268 241 heures d'effort effectif global, le filet maillant est l'engin responsable de 41% d'effort de pêche au sein de la baie, les 59% sont pour les autres engins qui se répartissent entre 11% à 16%. La pression de pêche est accentuée par la pression démographique que subit le littoral, matérialisée par l'accroissement du nombre des engins de pêche dont le plus remarquable est le chalut à moustiquaire qui est un engin moins sélectif (chapitre II). Malgré la pression de pêche et malgré son statut juridique comme composante géo-spatiale de l'aire protégée de la Baie de Ranobe, aucun plan d'aménagement et de gestion des ressources marines n'a existé pour la baie de Toliara. D'où l'importance de la recherche par la capitalisation de bonnes pratiques en matière de gestion des ressources naturelles marines.

En reliant les données de trajectoires avec les données de captures journalières, on a pu estimer que la production annuelle de la baie de Toliara est de 1 040 tonnes soit un rendement 6.6 tonnes/an/km² qui est au-dessus du seuil de durabilité selon la référence mondiale. Face aux menaces d'origines naturelles et anthropiques que subit la zone, le complexe recifo-lagonaire de Toliara est une véritable « banque de poissons » pour les pêcheurs qui dépendent de l'exploitation de ces ressources

halieutiques. La baie demeure productive mais l'exploitation de ressource récifale n'est pas durable du fait de la pratique de pêche destructive (ciblant les poissons juvéniles) et du développement des engins moins sélectifs, une situation qui a entraîné la diminution de 45% de la production en poissons récifaux depuis 30 ans d'après nos estimations.

L'augmentation de la diversité de captures indique que les ressources de la zone sont pleinement exploitées (chapitre II). Bon nombre de poissons sont désormais consommés alors qu'ils ne l'étaient auparavant vers les années 1980. Ainsi, pour mieux connaître cette évolution, une étude de la diversité des captures jusqu'au niveau espèce est à suggérer pour estimer la diversité spécifique des captures dans le but d'une meilleure gestion des espèces exploitées et d'avoir aussi une distribution par espèce au niveau spatial. Pour compléter la connaissance sur la durabilité de l'exploitation, une analyse de la structure en taille des captures globales a été réalisée (en parallèle avec cette étude) et en cours de publication (Ranaivomanana et al., in prep.). Une analyse sur l'indicateur d'abondance (type CPUE) est par ailleurs nécessaire afin de localiser dans l'espace et dans le temps l'abondance des ressources. Vu la diversité des engins mentionnée dans ce travail, un protocole de la standardisation de l'effort de pêche est inévitable. L'indice d'abondance est essentiel pour savoir la distribution spatiale d'abondance des ressources.

Dans une vision de gestion durable de la petite pêche, la distribution précise de l'effort de pêche et de la production halieutique des poissons récifaux (par famille taxonomique) est une connaissance inédite apportée par ce travail de thèse et un élément indispensable à la planification et à l'aménagement de l'espace marine, qui pourrait être répliqué dans d'autres zones récifales.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Alvard, M., Carlson, D., McGaffey, E., 2015. Using a Partial Sum Method and GPS Tracking Data to Identify Area Restricted Search by Artisanal Fishers at Moored Fish Aggregating Devices in the Commonwealth of Dominica. *PLoS ONE* 10, e0115552. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0115552>
- Andréfouët, S., 2012. Mozambique Channel Coral Reef Habitat Mapping. Report to Collecte Localisation Satellites. Earth Observation for Development- IRD. 57 p.
- Andréfouët, S., Guillaume, M.M.M., Delval, A., Rasoamanendrika, F.M.A., Blanchot, J., Bruggemann, J.H., 2013. Fifty years of changes in reef flat habitats of the Grand Récif of Toliara (SW Madagascar) and the impact of gleaning. *Coral Reefs* 32, 757–768. <https://doi.org/10.1007/s00338-013-1026-0>
- Angin, B., 2007. Modification des techniques et pratiques de pêche Vezo en réponse aux perturbations du Grand récif de Tuléar. Mémoire MST AMVDR - Université de Rennes 1. 52 p.
- Barnes-Mauthe, M., Oleson, K.L.L., Zafindrasilivonona, B., 2013. The total economic value of small-scale fisheries with a characterization of post-landing trends: An application in Madagascar with global relevance. *Fisheries Research* 147, 175–185. <https://doi.org/10.1016/j.fishres.2013.05.011>
- Begossi, A., 2001. Mapping spots: fishing areas or territories among islanders of the Atlantic Forest (Brazil). *Regional Environmental Change* 2, 1–12. <https://doi.org/10.1007/s101130100022>
- Behivoke, F., 2011. Témoignages climatiques dans le village de Beheloka - sud ouest de Madagascar. Rapport Climate Witness -WWF. 52 p.
- Behivoke, F., 2009. Etude socio-économique des villages de pêcheurs de la Baie de Ranobe (sud ouest de Madagascar). Rapport d'études. 43 p.
- Behivoke, F., Etienne, M.-P., Guitton, J., Randriatsara, R.M., Ranaivoson, E., Leopold, M., 2021. Estimating fishing effort in small-scale fisheries using GPS tracking data and random forests. *Ecological Indicators* 7.
- Brenier, A., 2009. Pertinence des approches participative pour le suivi écosystémique des pêcheries récifales (Thèse en Sciences de l'Environnement.). Université de Paris VI.
- Brenier, A., Ferraris, J., Mahafina, J., 2012. Participatory assessment of the Toliara Bay reef fishery, southwest Madagascar. *Madagascar Conservation & Development* 6, pp 60-67. <https://doi.org/10.4314/mcd.v6i2.4>
- Brenier, A., Mahafina, J., Galzin, R., Ferraris, J., 2013. Approches participatives : une solution pour le suivi des pêcheries récifales ? *Natures Sciences Sociétés* 21, 293–306. <https://doi.org/10.1051/nss/2013109>
- Bruggemann, J.H., Rodier, M., Guillaume, M.M.M., Andréfouët, S., Arfi, R., Cinner, J.E., Pichon, M., Ramahatratra, F., Rasoamanendrika, F., Zinke, J., McClanahan, T.R., 2012. Wicked Social-Ecological Problems Forcing Unprecedented Change on the Latitudinal Margins of Coral Reefs: the Case of Southwest Madagascar. *Ecology and Society* 17. <https://doi.org/10.5751/ES-05300-170447>
- Burgos, C., Gil, J., del Olmo, L.A., 2013. The Spanish blackspot seabream (*Pagellus bogaraveo*) fishery in the Strait of Gibraltar: spatial distribution and fishing effort derived from a small-scale GPRS/GSM based fisheries vessel monitoring system. *Aquatic Living Resources* 26, 399–407. <https://doi.org/10.1051/alr/2013068>

Burke, L., Reynter, K., Spalding, M., Perry, A., 2012. Récifs Coralliens en Péril Revisité - Synthèse à l'intention des décideurs. World Resources Institute 58.

Bush, E.R., Short, R.E., Milner-Gulland, E.J., Lennox, K., Samoilys, M., Hill, N., 2017. Mosquito Net Use in an Artisanal East African Fishery. *CONSERVATION LETTERS* 10, 451–459. <https://doi.org/10.1111/conl.12286>

Calenge, C., 2006. The package “adehabitat” for the R software: A tool for the analysis of space and habitat use by animals. *Ecological Modelling* 197, 516–519. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2006.03.017>

Cardiac, F., Bertrand, S., Witt, M.J., Metcalfe, K., Godley, B.J., McClellan, C., Vilela, R., Parnell, R.J., le Loc'h, F., 2020. “Too Big To Ignore”: A feasibility analysis of detecting fishing events in Gabonese small-scale fisheries. *PLoS ONE* 15, e0234091. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0234091>

Chang, S.-K., 2011. Application of a vessel monitoring system to advance sustainable fisheries management—Benefits received in Taiwan. *Marine Policy* 35, 116–121. <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2010.08.009>

Charbonnel, E., 2007. Les récifs artificiels aux secours des poissons. *Futura Sciences Dossier*. 26 p.

Chaussade, J., 1999. Structuration et formes d'aménagement des activités halieutiques (Structuration and development forms of the halieutic activities). *bagf* 76, 303–317. <https://doi.org/10.3406/bagf.1999.2119>

Close, C.H., Brent Hall, G., 2006. A GIS-based protocol for the collection and use of local knowledge in fisheries management planning. *Journal of Environmental Management* 78, 341–352. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2005.04.027>

Connell, J.H., 1978. Diversity in Tropical Rain Forests and Coral Reefs. *Science* 199, 1302–1310. <https://doi.org/10.1126/science.199.4335.1302>

Cripps, G., 2009. Understanding migration amongst the traditional fishers of West Madagascar. *Blue Ventures Conservation Report for ReCoMaP* 176.

Dalzell, P., Adams, T.J.H., 1996. Sustainability and management of reef fisheries in the Pacific Islands. 8th International Coral Reef Symposium, Panama City 17.

Davies, T.E., Beanjara, N., Tregenza, T., 2009. A socio-economic perspective on gear-based management in an artisanal fishery in south-west Madagascar. *Fisheries Management and Ecology* 16, 279–289. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2400.2009.00665.x>

Daw, T.M., 2008. Spatial distribution of effort by artisanal fishers: Exploring economic factors affecting the lobster fisheries of the Corn Islands, Nicaragua. *Fisheries Research* 90, 17–25. <https://doi.org/10.1016/j.fishres.2007.09.027>

De Souza, E.N., Boerder, K., Matwin, S., Worm, B., 2016. Improving Fishing Pattern Detection from Satellite AIS Using Data Mining and Machine Learning. *PLoS ONE* 11, e0158248. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0158248>

Dzoga, M., Simatele, D., Munga, C., 2020. Characterisation of artisanal catches in selected fishing areas of the Lower Tana Delta and Malindi-Ungwana Bay, Kenya. *West Ind. Oc. J Mar. Sci.* 19, 45–53. <https://doi.org/10.4314/wiojms.v19i1.4>

- Etienne, M.-P., 2020. Methodological brief for performing random forest analysis and cross validation of boat tracking data with R. *DataSuds*, V2. <https://doi.org/10.23708/IBZJGD>
- FAO (Ed.), 2018a. *The state of world fisheries and aquaculture, Meeting the sustainable development goals*. Rome.
- FAO, 2018b. *Improving our knowledge on small-scale fisheries: data needs and methodologies*. FOOD & AGRICULTURE ORG, S.I.
- FAO, 1995. *Code de conduite pour une pêche responsable. Population (French Edition)* 46 p. <https://doi.org/10.2307/1523706>
- Fauroux, E., Koto, B., 1993. Les migrations mahafales dans le processus de ruralisation de la ville de Toliara (Madagascar). *Cahier Sciences Humaines* 547–564.
- Ferraris, J., Cayré, P., 2003. Les Pêcheries Récifales dans le Pacifique Sud : d'une gestion intuitive vers une gestion écosystémique raisonnée. *Océanis* 29:397-414.
- Fricke, R., Mahafina, J., Behivoke, F., Jaonalison, H., Léopold, M., 2018. Annotated checklist of the fishes of Madagascar, southwestern Indian Ocean, with 158 new records 432.
- Gabrié, C., Vasseur, P., Randriamiarana, H., Mahafina, J., Mara, E., 2000. *The coral reefs of Madagascar* 34 p.
- Galotto-Tebar, M.M., Pomares-Padilla, A., Czerwinski, I.A., Gutiérrez-Estrada, J.C., 2019. Using mobile device's sensors to identify fishing activity. *J Mar Sci Technol*. <https://doi.org/10.1007/s00773-019-00694-5>
- Gascuel, D., 1993. Efforts et puissances de pêche : redéfinition des concepts et exemple d'application. Premier Forum Halieumétrique, Rennes, 29/06 au 01/07/1993 Session 2 : Relations Efforts, Mortalités, Captures 23.
- Gendreau, F., 1972. La croissance urbaine en Afrique noire et à Madagascar. *Colloques Internationaux du CNRS* 20.
- Gill, D.A., Oxenford, H.A., Turner, R.A., Schuhmann, P.W., 2019. Making the most of data-poor fisheries: Low cost mapping of small island fisheries to inform policy. *Marine Policy* 101, 198–207. <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2017.10.040>
- Gloaguen, P., Mahévas, S., Rivot, E., Woillez, M., Guitton, J., Vermard, Y., Etienne, M.P., 2015. An autoregressive model to describe fishing vessel movement and activity: An autoregressive model to describe fishing vessel movement and activity. *Environmetrics* 26, 17–28. <https://doi.org/10.1002/env.2319>
- Gray, J.S., McIntyre, A.D., Stirn, J., 1992. Manuel des méthodes de recherche sur l'environnement aquatique. Onzième partie. Evaluation biologique de la pollution marine, eu égard en particulier au benthos. *FAO Document technique sur les pêches*, N° 324, 53.
- Grenier, C., 2017. Pêcheurs des Galapagos et de Madagascar entre patrimonialisation et ouverture géographique : quels arrangements ? *Bulletin de l'Association de géographes français* 94, 192–210. <https://doi.org/10.4000/bagf.1255>
- Grenier, C., 2013. Genre de vie Vezo , pêche « traditionnelle » et mondialisation sur le littoral sud-ouest de Madagascar. *Annales de géographie* 693, 549. <https://doi.org/10.3917/ag.693.0549>

- Guillemot, N., Léopold, M., Cuif, M., Chabanet, P., 2009. Characterization and management of informal fisheries confronted with socio-economic changes in New Caledonia (South Pacific). *Fisheries Research* 98, 51–61. <https://doi.org/10.1016/j.fishres.2009.03.013>
- Harley, S.J., Myers, R.A., Dunn, A., 2001. Is catch-per-unit-effort proportional to abundance? *58*, 13.
- Harmelin-Vivien, M., 1979a. Ichtyofaune des récifs coralliens de Toliara (Madagascar) : écologie et relations trophiques (Thèse en Sciences). Université d'Aix-Marseille II.
- Harmelin-Vivien, M., 1979b. Liste des poissons récoltés dans les récifs coralliens de la région de Toliara.
- Harris, A., 2010. Analysis of recovery patterns of Indian Ocean coral reefs through examination of scleractinian communities and populations. Thesis at Department of Biological Sciences (University of Warwick) 274.
- Henry Chartier, C., Henry, P., 1998. Pratique et perception des espaces aquatiques chez les Vezo de Belo-sur-mer (côte ouest de Madagascar). *caoum* 51, 255–276. <https://doi.org/10.3406/caoum.1998.3694>
- Houssay-Holzschuch, M., 1994. La cité sans la ville :Tuléar, Sud-Ouest de Madagascar. *Géographie et Cultures* 26.
- INSTAT, 2018. Recensement général de la population et de l'habitation (RGPH-3) 98 p.
- INSTAT, 2015. Projection de la population de District de Toliara I, Région Atsimo Andrefana.
- ISRS, 2004. Sustainable fisheries management in coral reef ecosystems. Briefing Paper 4, International Society for Reef Studies 14.
- Jaonalison, H., 2019. Les premiers stades de vie des poissons dans le SO de Madagascar : éléments pour une meilleure connaissance de la biodiversité et une meilleure gestion des ressources exploitées (Thèse de doctorat en Océanologie appliquée de l'IH.SM et en Biologie des populations de l'Université de La Réunion).
- Jennings, S., Polunin, N., 1996. Impacts of Fishing on Tropical Reef Ecosystems. *Ambio* 25, 44–49.
- Johnson, A.E., Cinner, J.E., Hardt, M.J., Jacquet, J., McClanahan, T.R., Sanchirico, J.N., 2013. Trends, current understanding and future research priorities for artisanal coral reef fisheries research. *Fish Fish* 14, 281–292. <https://doi.org/10.1111/j.1467-2979.2012.00468.x>
- Joo, R., 2013. A behavioral ecology of fishermen: hidden stories from trajectory data in the Northern Humboldt Current System. Thèse de doctorat (spécialité : Ecosystèmes) de l'Université de Montpellier 2 308.
- Joo, R., Bertrand, S., Tam, J., Fablet, R., 2013. Hidden Markov models: the best models for forager movements? *PLoS One* 8, e71246.
- Jugant, S., 2012. Importance des récifs coralliens pour les poissons récifaux : exemple des Demoiselles (Pomacentridae), dans l'archipel des Maldives (Thèse de doctorat (vétérinaire)). Université de Paul-Sabatier de Toulouse.
- Kolding, J., Béné, C., Bavinck, M., 2014. Small-scale fisheries: Importance, vulnerability and deficient knowledge, in: Garcia, S.M., Rice, J., Charles, A. (Eds.), *Governance of Marine Fisheries and Biodiversity Conservation*. John Wiley & Sons, Ltd., Chichester, UK, pp. 317–331. <https://doi.org/10.1002/9781118392607.ch22>

- Kolding, J., van Zwieten, P.A.M., 2011. The Tragedy of Our Legacy: How do Global Management Discourses Affect Small Scale Fisheries in the South? *Forum for Development Studies* 38, 267–297. <https://doi.org/10.1080/08039410.2011.577798>
- Kuhn, M., Wing, J., Weston, S., Williams, A., Keefer, C., Engelhardt, A., Cooper, T., Mayer, Z., Kenkel, B., Benesty, M., Lescarbeau, R., Ziem, A., Scrucca, L., Tang, Y., Candan, C., Hunt, T., R Core Team, 2018. Package ‘caret’: Classification and Regression Training. R Package Version 6.0-81. 224p.
- Laloë, F., 1985. Etude de la précision des estimations de captures et prises par unité d’effort obtenues à l’aide du système d’enquête de la section “pêche artisanale” du CRODT au Sénégal 38 p.
- Laroche, J., Ramanarivo, N., 1995. A preliminary survey of the artisanal fishery on coral reefs of the Tulear Region (southwest Madagascar). *Coral Reefs* 14, 193–200. <https://doi.org/10.1007/s003380050016>
- Laroche, J., Razanoelisoa, J., Fauroux, E., Rabenevanana, M.W., 1997. The reef fisheries surrounding the south-west coastal cities of Madagascar. *Fisheries Management and Ecology* 4, 285–299. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2400.1997.00051.x>
- Laurec, A., Le Guen, J.-C.L., 1981. Dynamique des populations marines exploitées. Centre National pour l’Exploitation des Océans, Concepts et Modèles Tome 1, 120.
- Le Guyader, D., Ray, C., Brosset, D., 2016. Caractérisation spatio-temporelle de l’activité de pêche à la drague en rade de Brest par analyse de données AIS 5 p.
- Le Guyader, D., Ray, C., Gourmelon, F., Brosset, D. (Eds.), 2017. Identifying small-scale fishing zone in France using AIS data 12 p. <https://doi.org/10.4324/9781315271446>
- Lecaillon, G., Dufour, Lefant, P., 2000. Les pêcheries dans les récifs coralliens. *Océanis* 26:543-569.
- Lee, J., South, A.B., Jennings, S., 2010. Developing reliable, repeatable, and accessible methods to provide high-resolution estimates of fishing-effort distributions from vessel monitoring system (VMS) data. *ICES Journal of Marine Science* 67, 1260–1271. <https://doi.org/10.1093/icesjms/fsq010>
- Léopold, M., Guillemot, N., Rocklin, D., Chen, C., 2014. A framework for mapping small-scale coastal fisheries using fishers’ knowledge. *ICES Journal of Marine Science* 71, 1781–1792. <https://doi.org/10.1093/icesjms/fst204>
- Letourneur, Y., Labrosse, P., Kulbicki, M., 2000. Distribution spatiale des stocks de poissons récifaux démersaux d’intérêt commercial et effort de pêche en Province Nord de Nouvelle-Calédonie (Pacifique occidental). *Oceanologica Acta* 12.
- Mahafina, J., 2011. Perception et comportement des pêcheurs pour une gestion durable de la biodiversité et de la pêche récifale : application au niveau des réserves marines temporaires du Sud Ouest de Madagascar (Thèse de doctorat en Océanologie appliquée de l’IH.SM et en Biologie marine). Université de Toliara et de l’Université de La Réunion.
- Mahatante, T.P., 2008. Activités et propositions d’aménagement de la pêche traditionnelle aux poissons dans le village d’Ankilibe (sud-ouest de Madagascar). Mémoire de fin d’études MaST/ML-IH.SM- Université de Toliara. 60 p.
- McClanahan, T., Maina, J., Davies, J., 2005. Perceptions of resource users and managers towards fisheries management options in Kenyan coral reefs. *Fisheries Manage* 12, 105–112. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2400.2004.00431.x>

- McClanahan, T.R., Graham, N.A.J., MacNeil, M.A., Cinner, J.E., 2015. Biomass-based targets and the management of multispecies coral reef fisheries: Biomass-Based Targets and the Management of Multispecies Coral Reef Fisheries. *Conservation Biology* 29, 409–417. <https://doi.org/10.1111/cobi.12430>
- McClanahan, T.R., Mangi, S.C., 2004. Gear-based management of a tropical artisanal fishery based on species selectivity and capture size. *Fisheries Manage* 11, 51–60. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2400.2004.00358.x>
- McCluskey, S.M., Lewison, R.L., 2008. Quantifying fishing effort: a synthesis of current methods and their applications: Quantifying fishing effort: methods review. *Fish and Fisheries* 9, 188–200. <https://doi.org/10.1111/j.1467-2979.2008.00283.x>
- McKenna, S.A., Allen, G.R., Randrianasolo, H., Center for Applied Biodiversity Science, Rapid Assessment Program (Conservation International) (Eds.), 2005. Une évaluation rapide de la biodiversité marine des récifs coralliens du nord-ouest de Madagascar, RAP bulletin PER d'évaluation biologique. Centre pour les sciences appliquées à la biodiversité, Conservation International, Washington, D.C.
- McVean, A.R., Hemery, G., Walker, R.C.J., Ralisaona, B.L.R., Fanning, E., 2005. Traditional sea cucumber fisheries in southwest Madagascar: A case-study of two villages in 2002. *SPC Beche-de-mer Information Bulletin* n°21 4.
- Meadows, Donella, Meadows, Dennis, Randers, J., Behrens, W., 1972. The Limits to Growth - Abstract by Eduard Pestel. A Report to The Club of Rome 9.
- Mendo, T., Smout, S., Photopoulou, T., James, M., 2019. Identifying fishing grounds from vessel tracks: model-based inference for small scale fisheries. *R. Soc. open sci.* 6, 191161. <https://doi.org/10.1098/rsos.191161>
- Mills, D.J., Westlund, L., Graaf, G. de, Kura, Y., Willman, R., Kelleher, K., 2011. Under-reported and undervalued: small-scale fisheries in the developing world., in: Pomeroy, R.S., Andrew, N.L. (Eds.), *Small-Scale Fisheries Management: Frameworks and Approaches for the Developing World*. CABI, Wallingford, pp. 1–15. <https://doi.org/10.1079/9781845936075.0001>
- Moberg, F., Folke, C., 1999. Ecological goods and services of coral reef ecosystems. *Ecological Economics* 29, 215–233. [https://doi.org/10.1016/S0921-8009\(99\)00009-9](https://doi.org/10.1016/S0921-8009(99)00009-9)
- Natale, F., Gibin, M., Alessandrini, A., Vespe, M., Paulrud, A., 2015. Mapping Fishing Effort through AIS Data. *PLOS ONE* 10, e0130746. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0130746>
- Navarrete Forero, G., Miñarro, S., Mildemberger, T.K., Breckwoldt, A., Sudirman, Reuter, H., 2017. Participatory Boat Tracking Reveals Spatial Fishing Patterns in an Indonesian Artisanal Fishery. *Frontiers in Marine Science* 4. <https://doi.org/10.3389/fmars.2017.00409>
- Newton, K., Côté, I.M., Pilling, G.M., Jennings, S., Dulvy, N.K., 2007. Current and Future Sustainability of Island Coral Reef Fisheries. *Current Biology* 17, 655–658. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2007.02.054>
- Obura, D.O., Wells, S., Church, J., Horrill, C., 2002. Monitoring of fish and fish catches by local fishermen in Kenya and Tanzania. *Mar. Freshwater Res.* 53, 215. <https://doi.org/10.1071/MF01151>
- Pascal, B., 2003. Requins et tortues de mer chez les Vezo du sud-ouest de Madagascar : enjeux écologiques ou enjeux sociaux ? Mémoire de DEA en Aménagement, développement, environnement - Université d'Orléans 127 p.

Pauly, D., 1993. On Malthusian overfishing. ICLARM 2.

Pauly, D., Zeller, D., 2016. Catch reconstructions reveal that global marine fisheries catches are higher than reported and declining. *Nat Commun* 9. <https://doi.org/10.1038/ncomms10244>

PCD, 2006. Plan Communal de Développement de Saint Augustin, District de Toliara II, Région Atsimo Andrefana 107 p.

Peel, D., Good, N.M., 2011. A hidden Markov model approach for determining vessel activity from vessel monitoring system data. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 68, 1252–1264. <https://doi.org/10.1139/f2011-055>

Pichon, M., 1978. Recherches sur les peuplements a dominance d'anthozoaires dans les recifs coralliens de Tulear (Madagascar). *Atoll Research Bulletin* 1–447. <https://doi.org/10.5479/si.00775630.222.1>

Polunin, N., Graham, N.A.J., 2003. Review of the impacts of fishing on coral reef fish populations. *Western Pacific Regional Fishery Management Council* 53 p.

Prieur, C., 2009. Pêches traditionnelle, artisanale et industrielle - Ethnies Antandroy et Antanosy de l'extrême sud de Madagascar.

Prince, J., Hordyk, A., 2019. What to do when you have almost nothing: A simple quantitative prescription for managing extremely data-poor fisheries. *Fish Fish* 20, 224–238. <https://doi.org/10.1111/faf.12335>

Raharinaivo, L.R., 2018. Etude de la maturité sexuelle des poissons capturés par les petits pêcheurs d'Ankilibe dans les herbiers de la baie de Toliara (sud-ouest de Madagascar). Mémoire de DEA en Océanologie appliquée (IH.SM) 101 p.

Raharinaivo, L.R., Jaonalison, H., Mahafina, J., Ponton, D., 2020. How to efficiently determine the size at maturity of small-sized tropical fishes: A case study based on 144 species identified via DNA barcoding from southwestern Madagascar. *J Appl Ichthyol* 36, 402–413. <https://doi.org/10.1111/jai.14046>

Rakotoarinivo, W., 1998. Les petits poissons pélagiques de la région de Toliara (sud ouest de Madagascar) : biologie, écologie, exploitation et aménagement (Thèse en Océanologie appliquée (option : gestion de ressources)). IH.SM - Université de Toliara.

Ramahatratra, F., 2014. Etude de la capacité de resilience du Grand Récif de Toliara et de sa gestion durable (Facteur: Poissons Herbivores) (Thèse de doctorat en Océanologie appliquée - IH.SM). Université de Toliara.

Ramanantsoa, J.D., Krug, M., Penven, P., Rouault, M., Gula, J., 2018. Coastal upwelling south of Madagascar: Temporal and spatial variability. *Journal of Marine Systems* 178, 29–37. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2017.10.005>

Ranaivomanana, L., 2006. Identification des conditions d'appropriation de la gestion durable des ressources naturelles et des écosystèmes : « Cas du Grand Récif de Toliara » (Thèse de doctorat en Océanologie appliquée - IH.SM). Université de Toliara et ENSAR.

Randrianambinintsoa, J.E., 2016. Suivi des captures de la pêche traditionnelle maritime sur le lieu de débarquement : Cas du village d'Ifaty (Sud-ouest de Madagascar). Mémoire de fin d'études Licence - IH.SM - Université de Toliara. 48 p.

- Randriantsara, R.M., 2018. Etude spatiale de la pêche traditionnelle à partir de l'analyse des trajectoires des pirogues. Cas du village d'Ankilibe, Sud-ouest de Madagascar. Mémoire de DEA en Océanologie appliquée (IH.SM) 74.
- Rejela, M.N., 1993. La pêche traditionnelle Vezo du Sud-Ouest de Madagascar : un système d'exploitation dépassé ? (Thèse de géographie). Université de Bordeaux 3.
- Rogers, A., Blanchard, J.L., Mumby, P.J., 2017. Fisheries productivity under progressive coral reef degradation. *Journal of Applied Ecology* 10. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.13051>
- Sadovy, Y., Domeier, M., 2005. Are aggregation-fisheries sustainable? Reef fish fisheries as a case study. *Coral Reefs* 24, 254–262. <https://doi.org/10.1007/s00338-005-0474-6>
- Salimo, 1997. Etude de la pêche collective à pied sur les platiers du Grand Récif de Toliara (Sud Ouest de Madagascar). Diplôme d'études approfondies en Océanologie appliquée. IH.SM - Université de Toliara 83 p.
- Scholz, A.J., Steinback, C., Kruse, S.A., Mertens, M., Silverman, H., 2011. Incorporation of Spatial and Economic Analyses of Human-Use Data in the Design of Marine Protected Areas: Human-Use Data in Design of MPAs. *Conservation Biology* 25, 485–492. <https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.2010.01626.x>
- SCOR-Boston, 1998. Environnement & Développement durable: les coraux en danger! (www.futurasciences.com/comprendre/d/dossier255-5.php du 28 Sept 2004).
- Selgrath, J.C., Gergel, S.E., Vincent, A.C.J., 2018. Shifting gears: Diversification, intensification, and effort increases in small-scale fisheries (1950-2010). *PLOS ONE* 13, e0190232. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0190232>
- Short, R., Gurung, R., Rowcliffe, M., Hill, N., Milner-Gulland, E.J., 2018. The use of mosquito nets in fisheries: A global perspective. *PLoS ONE* 13, e0191519. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0191519>
- Spalding, M.D., Corinna, Green, E.P., 2001. World Atlas of Coral Reefs. UNEP 432.
- Staples, D., Satia, B., Gardiner, P.R., 2004. A research agenda for small-scale fisheries 44.
- Stelzenmüller, V., Maynou, F., Martín, P., 2007. Spatial assessment of benefits of a coastal Mediterranean Marine Protected Area. *Biological Conservation* 136, 571–583. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2007.01.002>
- Stephenson, R.L., Paul, S., Pastoors, M.A., Kraan, M., Holm, P., Wiber, M., Mackinson, S., Dankel, D.J., Brooks, K., Benson, A., 2016. Integrating fishers' knowledge research in science and management. *ICES Journal of Marine Science* 73, 1459–1465. <https://doi.org/10.1093/icesjms/fsw025>
- Stewart, K.R., Lewison, R.L., Dunn, D.C., Bjorkland, R.H., Kelez, S., Halpin, P.N., Crowder, L.B., 2010. Characterizing Fishing Effort and Spatial Extent of Coastal Fisheries. *PLoS ONE* 5, e14451. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0014451>
- Tassetti, A.N., Galdelli, A., Pulcinella, J., Mancini, A., Bolognini, L., 2022. Addressing Gaps in Small-Scale Fisheries: A Low-Cost Tracking System. *Sensors* 22, 839. <https://doi.org/10.3390/s22030839>
- Teh, L.C.L., Sumaila, U.R., 2013. Contribution of marine fisheries to worldwide employment: Global marine fisheries employment. *Fish and Fisheries* 14, 77–88. <https://doi.org/10.1111/j.1467-2979.2011.00450.x>

- Tovondrainy, G., 2004. Les activités de pêche dans la région d'Andavadoake (sud-ouest de Madagascar). *Memoire de fin d'études MaST/ML - IH.SM - Université de Toliara*. 69 p.
- Tuda, P.M., Wolff, M., Breckwoldt, A., 2016. Size structure and gear selectivity of target species in the multispecies multigear fishery of the Kenyan South Coast. *Ocean & Coastal Management* 130, 95–106. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2016.06.001>
- Tzanatos, E., Somarakis, S., Tserpes, G., Koutsikopoulos, C., 2006. Identifying and classifying small-scale fisheries métiers in the Mediterranean: A case study in the Patraikos Gulf, Greece. *Fisheries Research* 81, 158–168. <https://doi.org/10.1016/j.fishres.2006.07.007>
- Veloson, M., 2020. Etude des moyens d'existence des ménages ruraux dans la baie de Toliara, Sud-Ouest de Madagascar. *Mémoire de Master en Sciences Marines et Halieutiques (IH.SM)* 89 p.
- Veriza, F., 2019. Les yeux de la mer et les médecins de la mer - Des espaces sacrés des ancêtres aux aires marines protégées des vazaha sur le littoral vezo à Madagascar. *Université Bordeaux Montaigne et Université de Toliara*.
- Veriza, F., Chazan-Gillig, P.S., Manjakahery, B., 2018. Les Vezo du littoral sud-occidental de Madagascar. *Les oubliés de la terre ou les enfants adoptifs de la mer-mère* 12.
- Vermard, Y., Rivot, E., Mahévas, S., Marchal, P., Gascuel, D., 2010. Identifying fishing trip behaviour and estimating fishing effort from VMS data using Bayesian Hidden Markov Models. *Ecological Modelling* 221, 1757–1769. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2010.04.005>
- Volandrae, H., 2019. Evaluation de la surface balayée par le chalut moustiquaire. *Memoire de fin d'études Licence - IH.SM - Université de Toliara*. 38 p.
- Walker, E., Bez, N., 2010. A pioneer validation of a state-space model of vessel trajectories (VMS) with observers' data. *Ecological Modelling* 221, 2008–2017. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2010.05.007>
- Wang, Y.B., Wang, Y., 2016. Estimating catches with automatic identification system (AIS) data: a case study of single otter trawl in Zhoushan fishing ground, China. *Iranian Journal of Fisheries Sciences*.
- Wilén, J.E., 2004. Spatial Management of Fisheries. *Marine Resource Economics* 19, 7–19. <https://doi.org/10.1086/mre.19.1.42629416>
- Wilkinson, C., 2004. Status of Coral Reefs of the World: 2004. *Australian Institute of Marine Science and Global Coral Reef Monitoring Network* 1., 301 p.
- Wright, M.N., Ziegler, A., 2017. ranger: A Fast Implementation of Random Forests for High Dimensional Data in C++ and R. *J. Stat. Soft.* 77. <https://doi.org/10.18637/jss.v077.i01>
- Zaïme, A., Gautier, J.-Y., 1989. Comparaison des régimes alimentaires de trois espèces sympatriques de Gerbillidae en milieu saharien, au Maroc. *Revue d'Ecologie, Terre et Vie, Société nationale de protection de la nature* 44, 153–163.

ANNEXES

Annexe 1: Extrait des données GPS lors du suivi

Name:SFMP005									
Date	Time	Latitude	Longitude	Altitude	Satellites	HDOP	PDOP	TTF [s]	Info
01/06/2018	13:49:34	-23.357245	43.68368	18	5	1.5	1.7		
01/06/2018	13:50:01	-23.3571933	43.6836583	18	5	1.5	1.7		
01/06/2018	13:50:30	-23.3571	43.68307	18	5	1.5	1.7		
01/06/2018	13:50:58	-23.3574317	43.6827717	18	5	1.5	1.7		
01/06/2018	13:51:27	-23.357695	43.6829033	18	5	1.5	1.7		
01/06/2018	13:51:55	-23.3579133	43.68262	18	5	1.5	1.7		
01/06/2018	13:52:23	-23.3581017	43.6825183	18	4	1.5	1.8		
01/06/2018	13:52:52	-23.357975	43.6819333	18	5	1.5	1.7		
01/06/2018	13:53:21	-23.3580067	43.681605	18	5	1.5	1.7		
01/06/2018	13:53:52	-23.35813	43.6814233	18	4	1.8	2.1		
01/06/2018	13:54:21	-23.3580583	43.6810117	18	5	1.5	1.7		
01/06/2018	13:54:51	-23.3579983	43.6804767	8	5	2.0	4.8		
01/06/2018	13:55:20	-23.3580583	43.680105	12	5	1.5	1.7		
01/06/2018	13:55:51	-23.3580633	43.6796233	26	5	1.5	1.7		
01/06/2018	13:56:23	-23.3580067	43.6793633	10	5	1.5	1.7		
01/06/2018	13:56:53	-23.3579733	43.6790533	0	5	2.1	5.0		
01/06/2018	13:57:24	-23.3579867	43.6788833	4	5	1.5	1.7		
01/06/2018	13:57:55	-23.3580317	43.6783767	6	5	2.1	5.1		
01/06/2018	13:58:26	-23.3579583	43.6785867	10	5	1.5	1.7		
01/06/2018	13:59:03	-23.35798	43.6784017	12	5	1.5	1.7		
01/06/2018	13:59:36	-23.358085	43.6786983	26	5	1.4	1.7		
01/06/2018	14:00:07	-23.3581133	43.67883	12	5	1.4	1.7		
01/06/2018	14:00:42	-23.3581267	43.6793817	16	5	1.4	1.7		
01/06/2018	14:01:17	-23.3581817	43.6808267	10	5	1.4	1.7		
01/06/2018	14:01:52	-23.3580133	43.6824167	12	5	1.4	1.7		
01/06/2018	14:02:24	-23.3571817	43.683245	-10	5	1.4	1.7		
01/06/2018	14:02:55	-23.35655	43.6827067	34	5	1.4	1.7		
01/06/2018	14:03:26	-23.3557067	43.6818767	14	5	1.4	1.7		
01/06/2018	14:03:56	-23.3549783	43.6809317	4	5	1.4	1.7		
01/06/2018	14:04:34	-23.3543283	43.6801933	24	5	1.4	1.7		
01/06/2018	14:05:05	-23.3538233	43.6798433	42	5	1.4	1.7		
01/06/2018	14:05:36	-23.3531667	43.6796067	28	5	1.4	1.7		
01/06/2018	14:06:07	-23.352235	43.6793083	16	5	1.4	1.7		
01/06/2018	14:06:36	-23.3516217	43.6791467	2	5	1.4	1.7		
01/06/2018	14:07:06	-23.3518283	43.6790683	-6	5	1.4	1.7		
01/06/2018	14:07:37	-23.35178	43.679165	6	5	1.4	1.7		
01/06/2018	14:08:08	-23.3515667	43.67905	14	5	1.4	1.7		
01/06/2018	14:08:40	-23.3507917	43.6786967	0	5	1.4	1.7		
01/06/2018	14:09:11	-23.349965	43.67843	24	5	1.4	1.7		
01/06/2018	14:09:39	-23.3498517	43.678555	110	5	1.4	1.7		
01/06/2018	14:10:14	-23.3496583	43.6785667	2	5	1.4	1.7		
01/06/2018	14:10:47	-23.34974	43.67882	34	5	1.4	1.7		
01/06/2018	14:11:24	-23.3495533	43.6792733	4	5	1.4	1.7		

Annexe 2: Synthèse méthodologique du code R sur la réalisation de l'analyse forêt aléatoire et de la validation croisée des données de suivi

Supplementary materials for Estimating fishing effort in small-scale fisheries using GPS tracking data and random forests

Faustinato Behivoke¹, Marie-Pierre Etienne², Jérôme Guitton³, Roddy Randriatsara¹, Eulalie Ranaivoson¹, Marc Léopold⁴

¹Institut Halieutique et des Sciences Marines (IH.SM), Madagascar. <https://www.ihsm.mg/>

²University of Rennes, Agrocampus Ouest, CNRS, UMR 6625 IRMAR, Rennes, France

³ESE, Agrocampus Ouest, INRAE, Rennes, France

⁴ENTROPIE (IRD, University of La Reunion, CNRS, Ifremer) Toliara, Madagascar

Contents

Paper Abstract

Detailed classification procedure for the gillnet dataset example

Brief presentation of the gillnet dataset	
Identifying fishing operation using a simple speed threshold	
Identifying fishing operation using Random Forest	
Visual comparison of the Speed threshold method versus the Random forest method	

Effort estimation

Paper Abstract

During the last decade spatial patterns of industrial fisheries have been increasingly characterized using tracking technologies and machine learning analytical algorithms. In contrast, for small-scale fisheries, fishers' behaviour for estimating and mapping fishing effort has only been anecdotally explored. Following a comparative approach, we conducted a boat tracking survey in a small-scale reef fishery in Madagascar and investigated the performance of a learning random forest algorithm and a speed threshold for estimating and mapping fishing effort. We monitored the movements of a sample of 31 traditional sailing fishing boats at around 45s time interval using small GPS trackers. A total of 306 daily tracks were recorded among five gear types (beach seine, mosquito trawl net, gillnet, handline, and gilnet). To ground-truth GPS location data, fishers' behaviour was simultaneously recorded by a single on-board observer for 49 tracks. Typical, gear-specific track patterns were observed. Overall, the random forest model was found to be the most reliable, generic, and complex method for processing boat GPS tracks and detecting spatially-explicit fishing events regardless gear type. Predictions of mean fishing effort per trip showed that both methods reached from 89.4% to 97% accuracy across gear types. Our findings showed that boat tracking combined with on-board observation would improve the reliability of spatial fishing effort indicators in small-scale fisheries and contribute to more efficient management. Which GPS data processing method is appropriate would depend on local gear use, fishing effort indicators, and available analytical expertise.

Detailed classification procedure for the gillnet dataset example

The study area is located in the bay of Toliara, southwestern Madagascar. a 156 km²-wide reef and lagoon complex which has been intensively exploited to feed the growing urban demand in fish.

The dataset on gillnet use has been used to exemplify the analytical procedure (please download it on the same depository as the present document to run the R code as below). That procedure was repeated for all main gear types in the study area.

Brief presentation of the gillnet dataset

The movement of 4 different boats using gillnet were monitored using small GPS trackers (i-GotU GT600 and Catlog) in 2017 and 2018, which produced a total of 62 tracks. The GPS locations were recorded every minute approximately. The boat trajectories were then linearly interpolated to assure a fixed 60-second interval between successive positions. For 9 of the 62 recorded tracks, on-board observers associated a fishing state (Fishing versus Not Fishing) to every recorded location. The fishing states of all recorded locations for the 53 remaining tracks were manually classified by identifying typical fishing pattern.

Finally, 23792 locations of boats using gillnet were recorded, among which 15278 were identified as fishing, 8514 as not fishing.

Figure @ref(fig:plot-data) presents the classified fishing activities for all recorded tracks.

```
## Joining, by = "idpos"
```

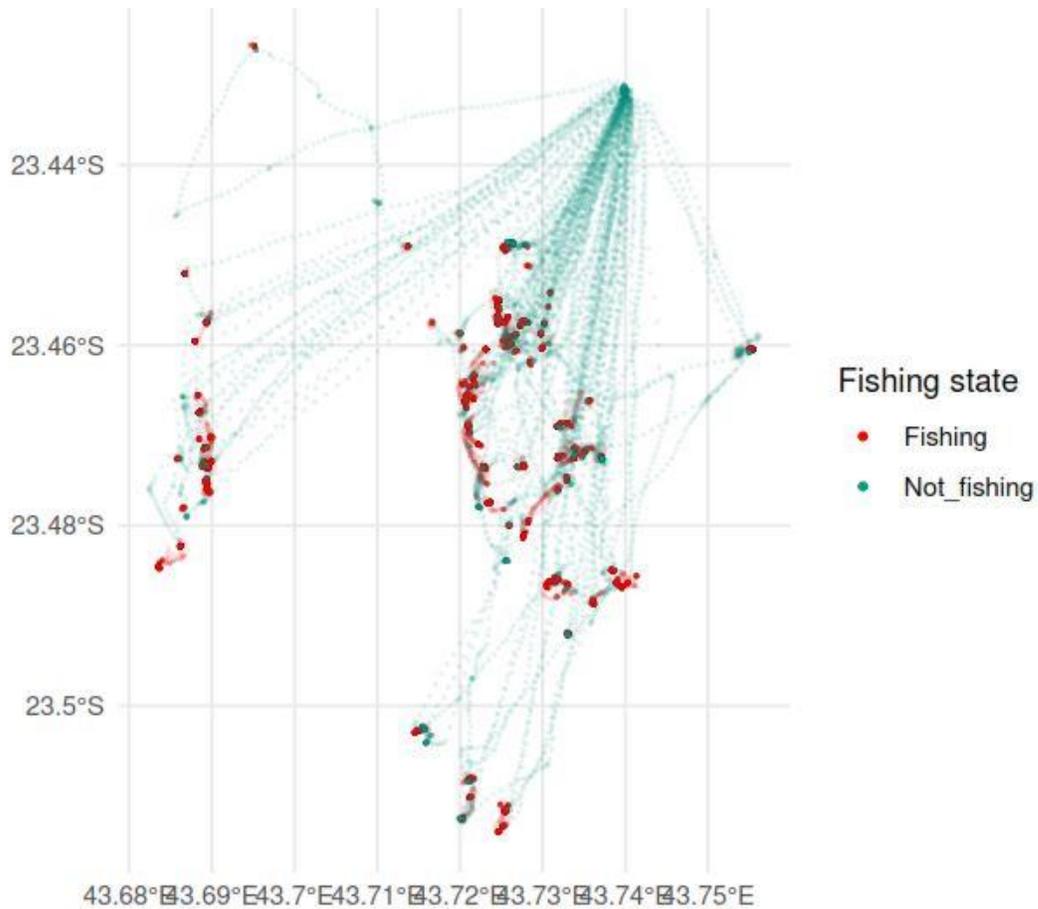


Figure 1: The presented tracks are recorded using small GPS on-board of boats using gillnet. The color depicts the fishing activity associated to each relocation.

The main paper compares two methods that automatically classified the fishing and not fishing states at each GPS position.

Identifying fishing operation using a simple speed threshold

In most applications, the threshold used for track classification is based on expert knowledge. Unfortunately no such knowledge was available in the fishery of the Bay of Toliara. As explained in the paper, we chose the speed threshold according to the best trade-off between sensitivity and selectivity.

The speed between successive positions varied from 0 meters per minutes to 331. Figure @ref(fig:speed-thres-def) illustrates the trade off to be made between sensitivity and specificity.

Warning: Removed 14242 row(s) containing missing values (geom_path).

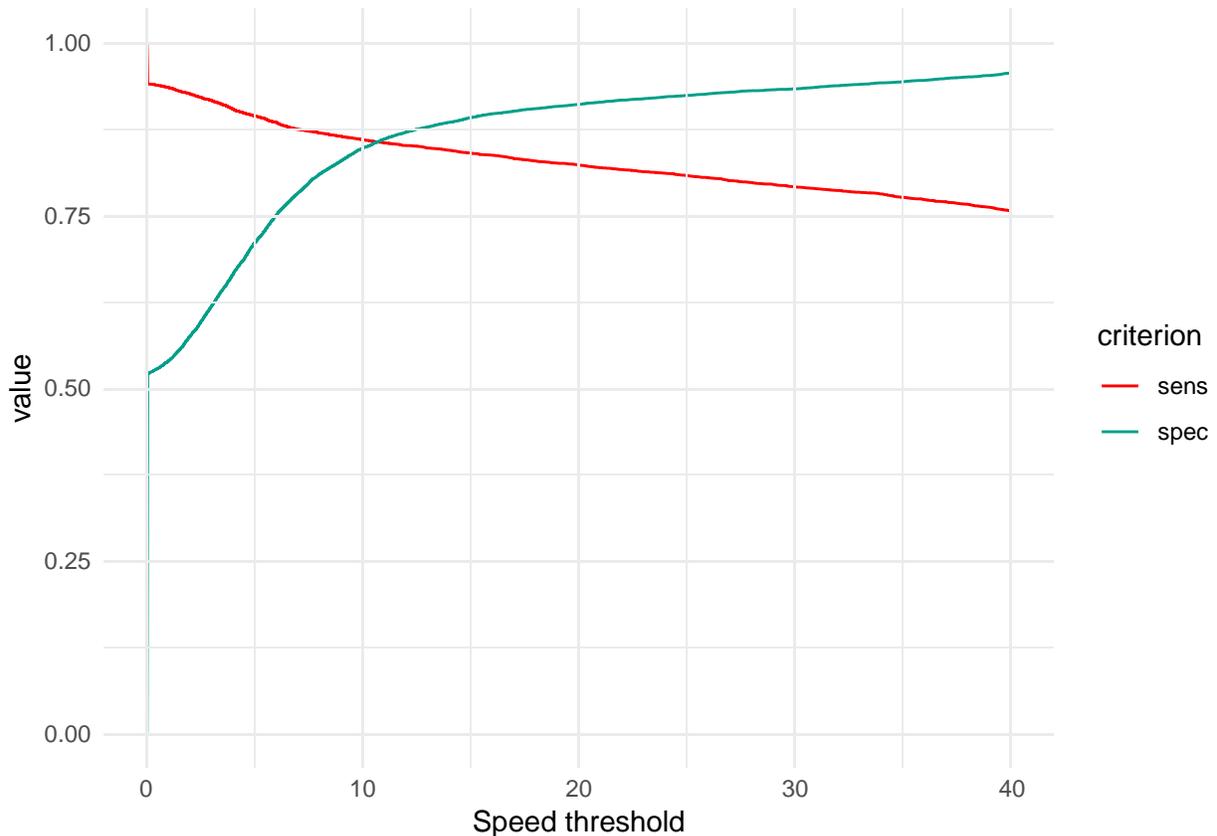


Figure 2: The sensitivity in red (respectively the specificity) is the proportion of relocations classified as fishing (resp not fishing) while actually fishing (resp. not fishing) among the relocations classified as fishing (not fishing).

According to Figure @ref(fig:speed-thres-def) the optimal speed threshold for gillnet use was 10.67 meters per minute.

For a given threshold, the following function was used to classify data according to the speed threshold:

```
speed_filter <- function(data, thr){
  data %>%
    mutate(speed_predicted_state = factor(ifelse(distance > thr , 'Not_fishing', 'Fishing')))
    %>%select(speed_predicted_state) %>%
    simplify() -> res
  return(res)
}
```

```

res_speed <- gillnet_df %>%
  select(no_trajet, idpos, pecheur_id, Fishing_state) %>% mutate(speed_filter_class =
  speed_filter(gillnet_dataset, thr = thr_opt)) %>% mutate(speed_filter_class =
  factor(speed_filter_class, levels = c('Fishing', 'Not_fishing')))

save(list = c('res_speed'), file = 'res_speed.RData')

```

The confusion matrix, the sensitivity and the specificity (as well as many measures of performance) measures were obtained through the confusionMatrix function of the caret package.

```

caret::confusionMatrix(res_speed$speed_filter_class, res_speed$Fishing_state)

```

```

## Confusion Matrix and Statistics
##
##              Reference
## Prediction   Fishing Not_fishing
## Fishing      13064      1234
## Not_fishing   2214      7280
##
##              Accuracy : 0.8551
##              95% CI : (0.8505, 0.8595)
##              No Information Rate : 0.6421
##              P-Value [Acc > NIR] : < 2.2e-16
##
##              Kappa : 0.6925
##
## Mcnemar's Test P-Value : < 2.2e-16
##
##              Sensitivity : 0.8551
##              Specificity : 0.8551
##              Pos Pred Value : 0.9137
##              Neg Pred Value : 0.7668
##              Prevalence : 0.6421
##              Detection Rate : 0.5491
##              Detection Prevalence : 0.6010
##              Balanced Accuracy : 0.8551
##
##              'Positive' Class : Fishing
##

```

Identifying fishing operation using Random Forest

Different covariates were defined (see manuscript). They were derived from recalibrated data and then associated to each GPS position. As illustrated in Figure @ref(fig:cor-fig), they logically were highly correlated by blocks

```

gillnet_df %>%
  dplyr::select_if(stringr::str_detect(names(.), 'distance|speed|cercle|conv')) %>%
  cor %>%
  corrplot::corrplot( type = "upper")

```

The procedure to fit the Random forest algorithm and to evaluate its performance was more complex than the speed threshold used in the previous section. This algorithm indeed depends on the specification of hyperparameters that may strongly impact RF model's accuracy.

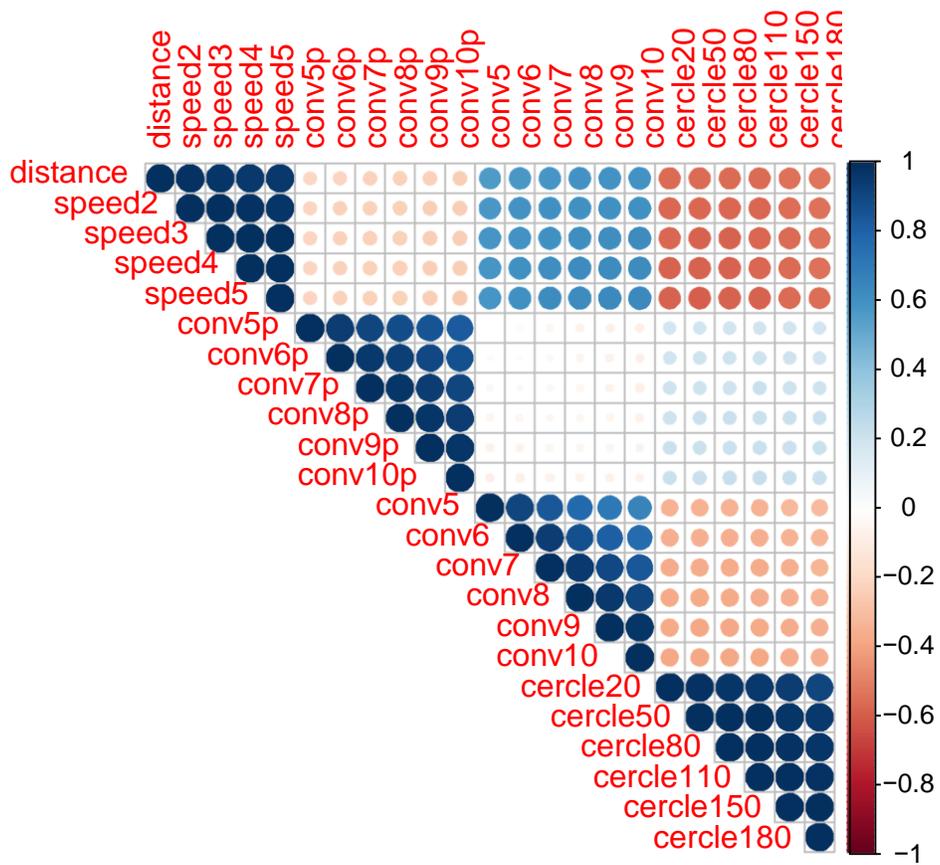


Figure 3: Correlation between the different metrics associated to each relocation

Hyperparameter choice

A grid of hyper parameters has been defined:

- The number of trees (values chosen among 200, 500, 1000, 1500)
- The number of variables to possibly split at in each node (values chosen among 2, 4, 6, 8, 10, 12)

```
num_tree <- c(200, 500, 1000, 1500, 2000)
mtry      <- c(2, 4, 6, 8, 10)
hyper_param <- expand_grid(num_tree, mtry)
```

As explained below the choice among those hyperparameters was driven by the Area under cross validated (ROC) curve (AUC). The cross validation procedure is developed below.

Splitting between learning and training set

For reducing the risks of overconfidence, we used a cross validation procedure. The dataset was split in training and testing datasets and the prediction was computed on the testing dataset only. As the RF algorithm was designed to classify fishing behaviour for new boats/ new fishermen, we decided to split the original dataset according to the fishermen's identification. Alternatively, the track of a each fisherman were used as the testing dataset, while the tracks of all other fishermen were used as the training dataset. The cross validation procedure fitted as many RF than fishermen, i.e. 4 for the gillnet dataset, and associated each GPS position of the testing dataset to a probability of being in Fishing state. The corresponding AUC is reported in the AUC_results table below (order with respect to the AUC value).

The cross_validation_AUC function is provided in the same depository than the present document.

```
auc_results <- hyper_param %>%
  invoke_rows(.f = cross_validation_AUC, gps_data = gillnet_df, .collate = "cols") %>%
  rename(auc = .out) %>%
  arrange(-auc)
```

```
auc_results %>%
  knitr::kable()
```

num_tree	mtry	auc
1500	2	0.9116333
2000	10	0.9116215
1500	8	0.9114351
1000	2	0.9113993
1500	10	0.9113415
2000	2	0.9113192
2000	6	0.9111809
500	2	0.9111341
500	10	0.9111130
1000	10	0.9110300
2000	8	0.9110259
1500	6	0.9110001
2000	4	0.9109458
200	2	0.9109453
1000	6	0.9109295
1000	8	0.9108905
1000	4	0.9108290
1500	4	0.9108045
500	8	0.9108009
500	4	0.9107746

num_tree	mtry	auc
500	6	0.9103024
200	8	0.9099620
200	4	0.9094403
200	10	0.9092857
200	6	0.9087321

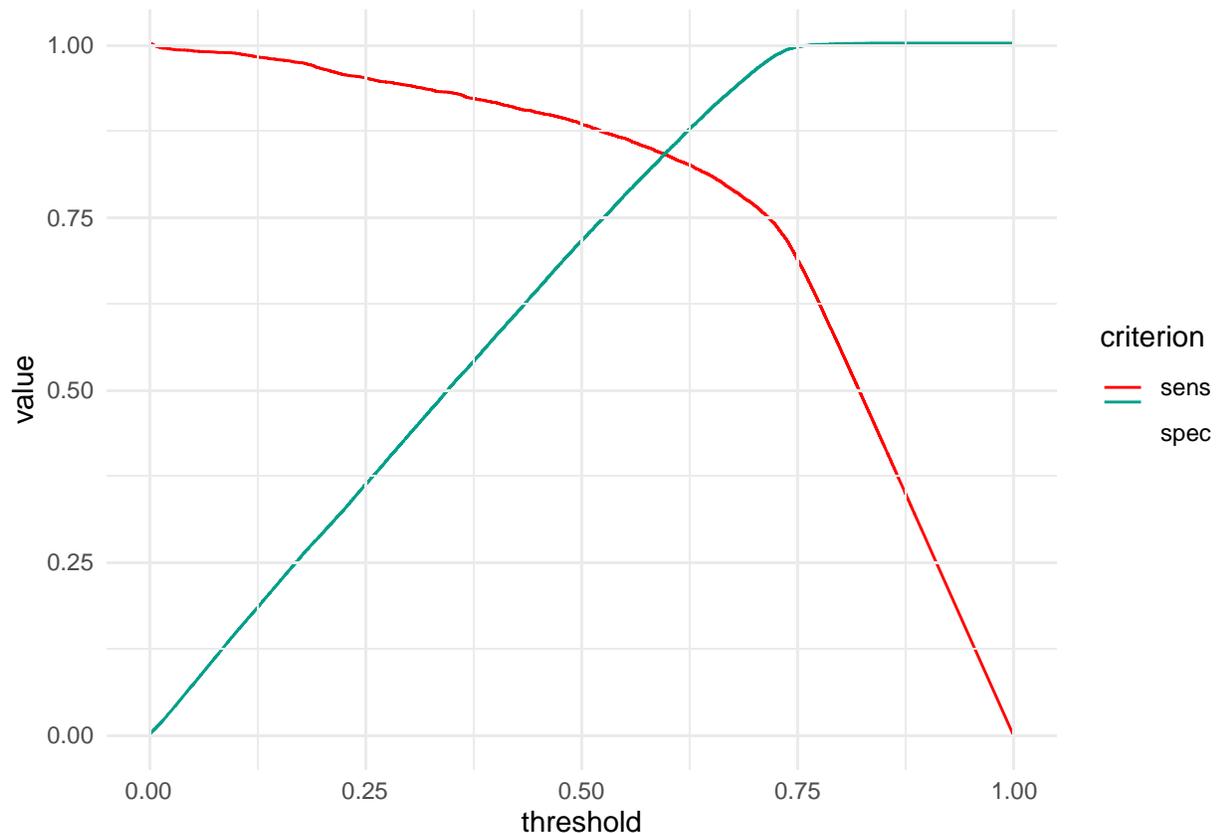
```
save(list = c("auc_results"), file = file.path('results', 'auc_results.RData'))
```

Predictions for all fishermen using gillnet

According to the AUC table, the best predictions were obtained by choosing 1500 as the number of trees and 2 as the number of variables to possibly split at in each node, although all combinations produced similar results.

```
sens <- AUC::sensitivity(predictions = res$pred, labels = res$Fishing_state )
spec <- AUC::specificity(predictions = res$pred, labels = res$Fishing_state )
```

```
data.frame(sens = sens$measure,
           spec = spec$measure,
           threshold= sens$cutoffs) %>% pivot_longer(-threshold,
           values_to = 'value', names_to = 'crit')
scale_color_manual(values = wes_palette("Darjeeling1", n = 2))
```



As said before, the Random forest algorithm associated a probability to belong to the class 'Fishing' to each GPS location. The decision rule used to transform this probability into a hard classification was optimized as for the speed threshold (see above).

```
thr_RF <- data.frame(sens = sens$measure, spec =
                    spec$measure, threshold=
                    sens$cutoffs) %>%
dplyr::filter(sens > spec) %>%
summarize(thr_opt = max(threshold)) %>% simplify()
```

The best trade-off between sensitivity and specificity consisted in classifying as Fishing any location Whose predicted probability is lower than 0.6. This hard classification produced the following confusion matrix.

```
res %>%
mutate(RF = as.factor(ifelse(pred < thr_RF, 'Fishing', 'Not_fishing' ))) %>%
inner_join(gillnet_df) %>%
inner_join(res_speed) %>%
mutate( Speed = as.factor( speed_filter_class)) %>%
select(idpos, Fishing_state, RF, Speed, no_trajet) ->
classification_res
```

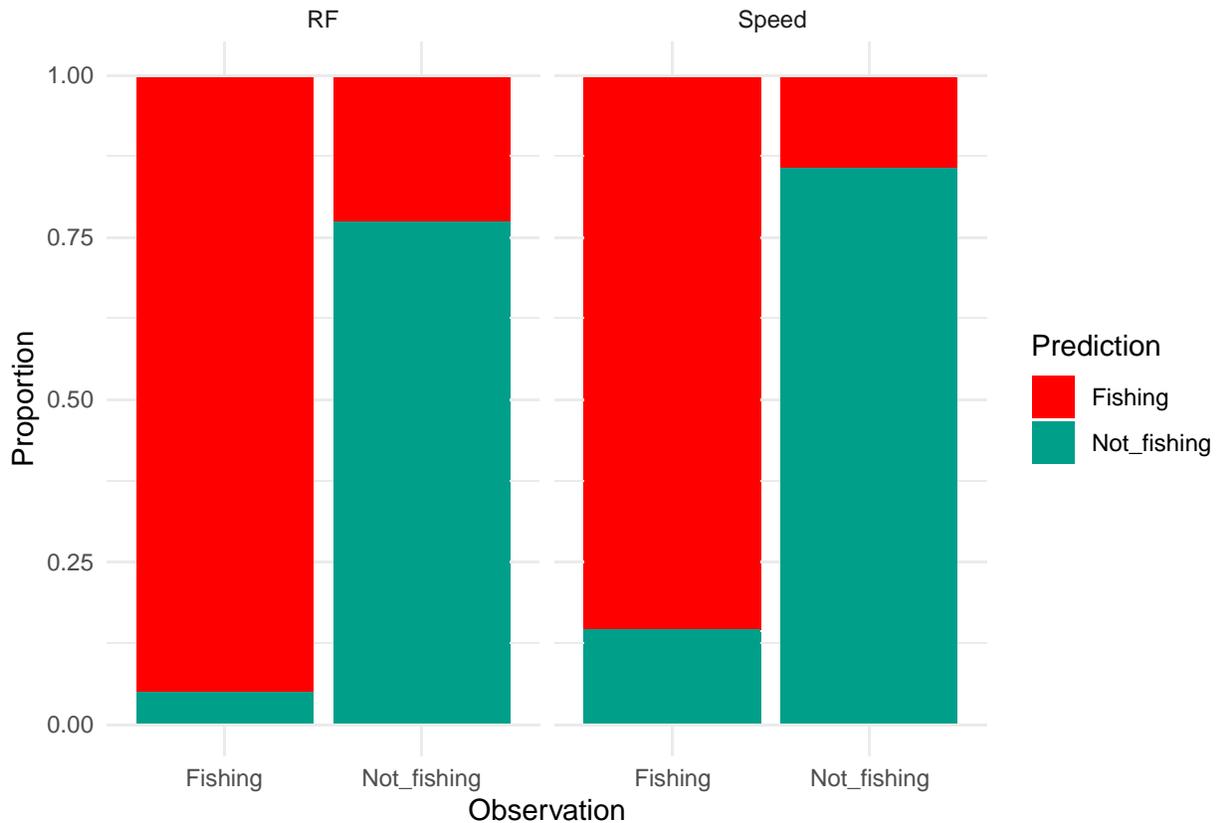
```
caret::confusionMatrix( data = classification_res$RF,
reference = classification_res$Fishing_state, positive = 'Fishing')
```

```
## Confusion Matrix and Statistics
##
##              Reference
## Prediction   Fishing Not_fishing
## Fishing      14544      1941
## Not_fishing   734       6573
##
##              Accuracy : 0.8876
##              95% CI : (0.8835, 0.8916)
## No Information Rate : 0.6421
## P-Value [Acc > NIR] : < 2.2e-16
##
##              Kappa : 0.7474
##
## Mcnemar's Test P-Value : < 2.2e-16
##
##              Sensitivity : 0.9520
##              Specificity : 0.7720
##              Pos Pred Value : 0.8823
##              Neg Pred Value : 0.8995
##              Prevalence : 0.6421
##              Detection Rate : 0.6113
##              Detection Prevalence : 0.6929
##              Balanced Accuracy : 0.8620
##
##              'Positive' Class : Fishing
##
```

Visual comparison of the Speed threshold method versus the Random forest method

```
classification_res %>%
rename(Obs = Fishing_state) %>%
pivot_longer(-c(no_trajet, Obs, idpos), names_to = 'Method', values_to = 'State') %>%
```

```
ggplot() + facet_wrap(~ Method) +
geom_bar(aes(x = Obs, fill = State), position = "fill") +
scale_fill_manual(values = wes_palette("Darjeeling1", n = 2)) +
xlab("Observation") +
ylab("Proportion") +
labs(fill = "Prediction")
```



Effort estimation

The following section provides the codes to produce the Figure 4 of the paper for the gillnet dataset.

The following commands use the classification obtained through the Random forest or Speed threshold methods to estimate true fishing effort per track. The effort is expressed in fishing hours.

```
classification_res %>%
  inner_join(gillnet_df) %>%
  as_tibble() %>%
  select(idpos, Fishing_state, RF, Speed, no_trajet) %>%
  rename(Obs = Fishing_state) %>%
  pivot_longer(-c(no_trajet,idpos), names_to = 'Method', values_to = 'Effort') %>%
  filter(Effort == 'Fishing') %>%
  group_by(Method, no_trajet) %>%
  summarise(Effort = n()) %>%
  arrange(no_trajet) %>%
  mutate(Effort = Effort / 60) -> effort
```

```
## Joining, by = c("idpos", "Fishing_state", "no_trajet")
```

```
## `summarise()` regrouping output by 'Method' (override with `.groups` argument)
```

```
effort %>%  
  pivot_wider(names_from = Method, values_from = Effort) %>%  
  as_tibble() %>%print(n=6)
```

```
## # A tibble: 62 x 4  
##   no_trajet  Obs    RF Speed  
##   <dbl> <dbl> <dbl> <dbl>  
## 1         8  4.48  4.67  4.35  
## 2         9  3.77  4.1   3.62  
## 3        10  2.4   3.35  2.37  
## 4        11  1.38  2.9   1.98  
## 5        12  2.58  3.77  2.37  
## 6        15  3.07  3.32  2.48  
## # ... with 56 more rows
```

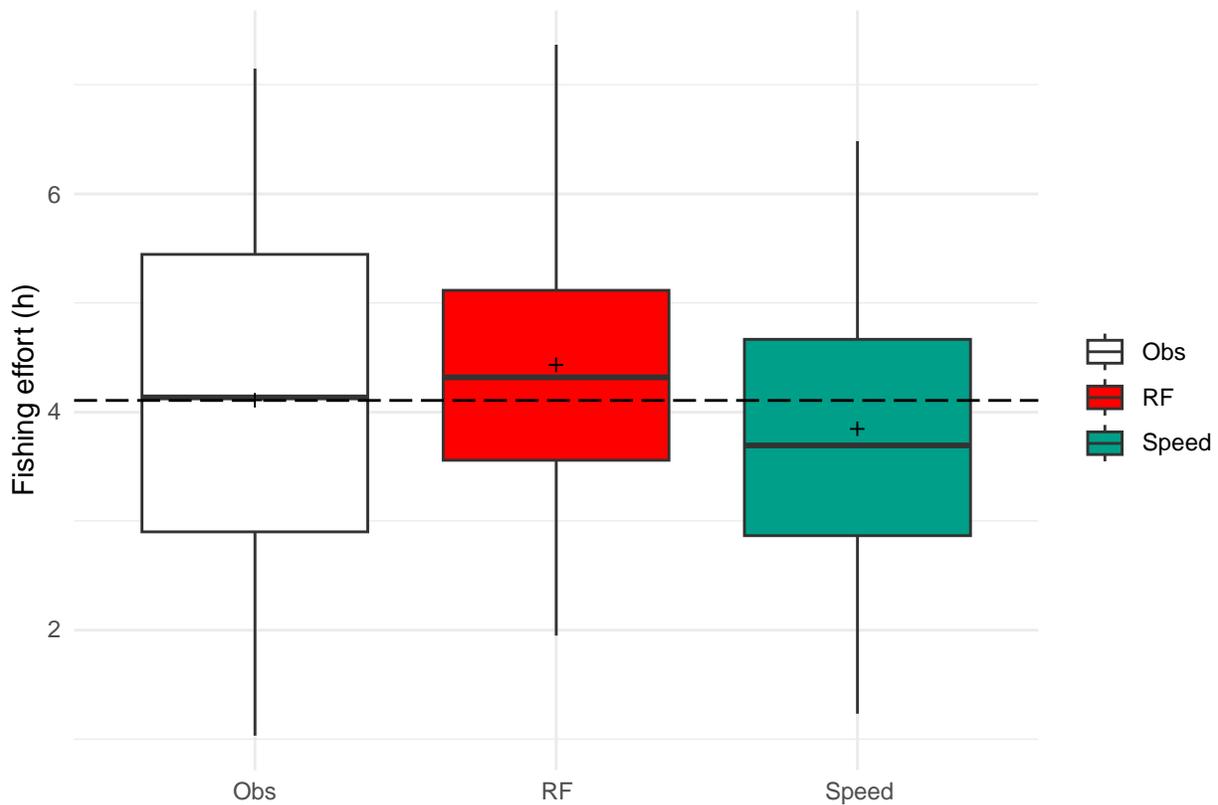
```
effort %>%  
  filter(Method == 'Obs') %>%  
  summarise(m = mean(Effort)) -> dummy_data
```

```
## `summarise()` ungrouping output (override with `.groups` argument)
```

Several visualizations are proposed in the manuscript for comparing the different indicators of fishing effort.

The first one presents the distribution of the fishing effort per track according on the method used.

```
effort %>% ggplot() +  
  geom_boxplot(aes(x= Method, y = Effort, fill = Method)) +  
  stat_summary(aes(x= Method, y = Effort), shape = 3, fun=mean, geom="point") +  
  geom_hline( data = dummy_data, aes(yintercept = m), alpha = 0.8, linetype = 'dashed') +  
  scale_fill_manual(values = c('#FFFFFF', wes_palette("Darjeeling1", n = 2))) +  
  ylab('Fishing effort (h theme(legend.title = element_blank(),  
  panel.background = element_blank())
```

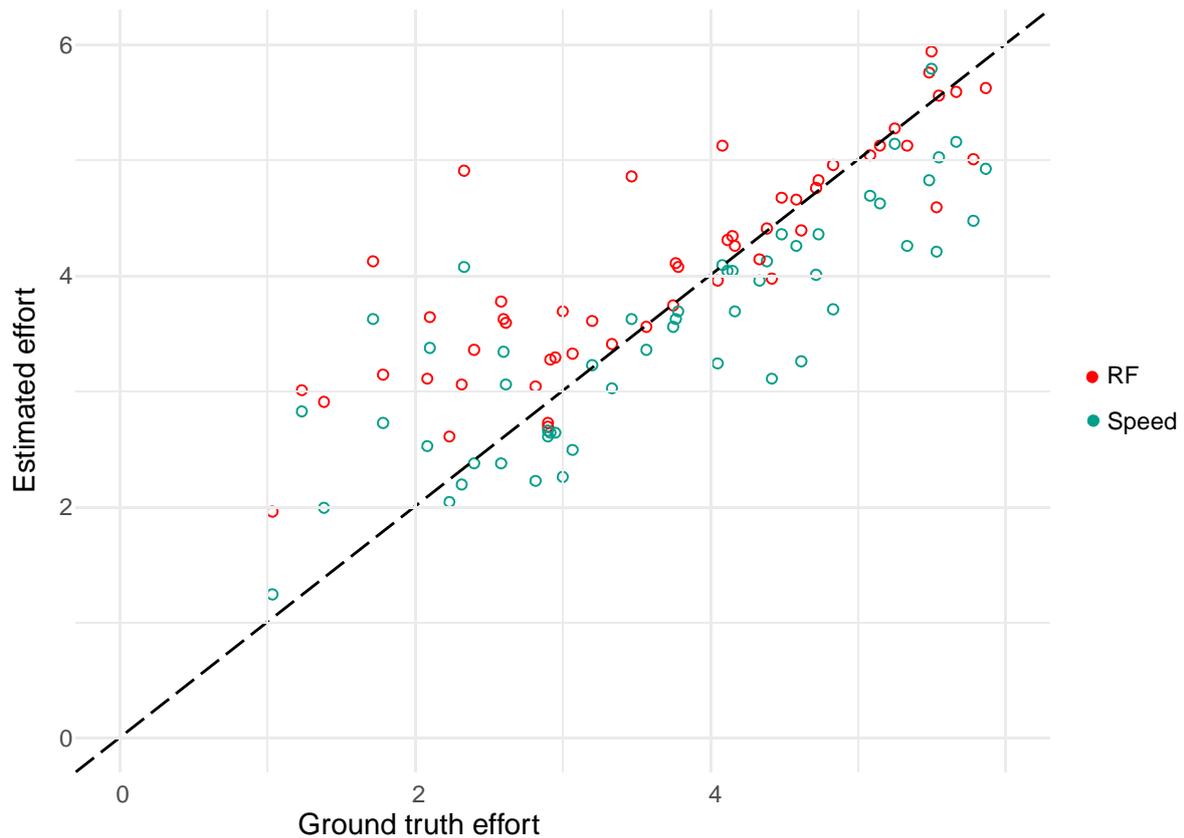


For visualizing the prediction's accuracy, we proposed to represent the predicted effort (by RF or Speed threshold method) according to the observed effort.

```
effort %>%
  pivot_wider(names_from = Method, values_from = Effort) %>%
  pivot_longer(-c(no_trajet, Obs), names_to = 'Method', values_to = 'Effort') %>%
  ggplot() + geom_point(aes(y= Effort, x = Obs, col = Method), alpha = 0.7) +
  geom_abline(slope = 1, intercept = 0, alpha = 0.5, linetype = 'dashed') +
  ylim(c(0,6)) + xlim(c(0, 6)) +
  theme(legend.title = element_blank(), panel.background = element_blank()) +
  # scale_color_viridis_d() +
  scale_color_manual(values = wes_palette("Darjeeling1", n = 2)) +
  # scale_color_manual(values = c("#00AFBB", "#FC4E07")) +
  xlab('Ground truth effort') + ylab('Estimated effort') -> p_effort
```

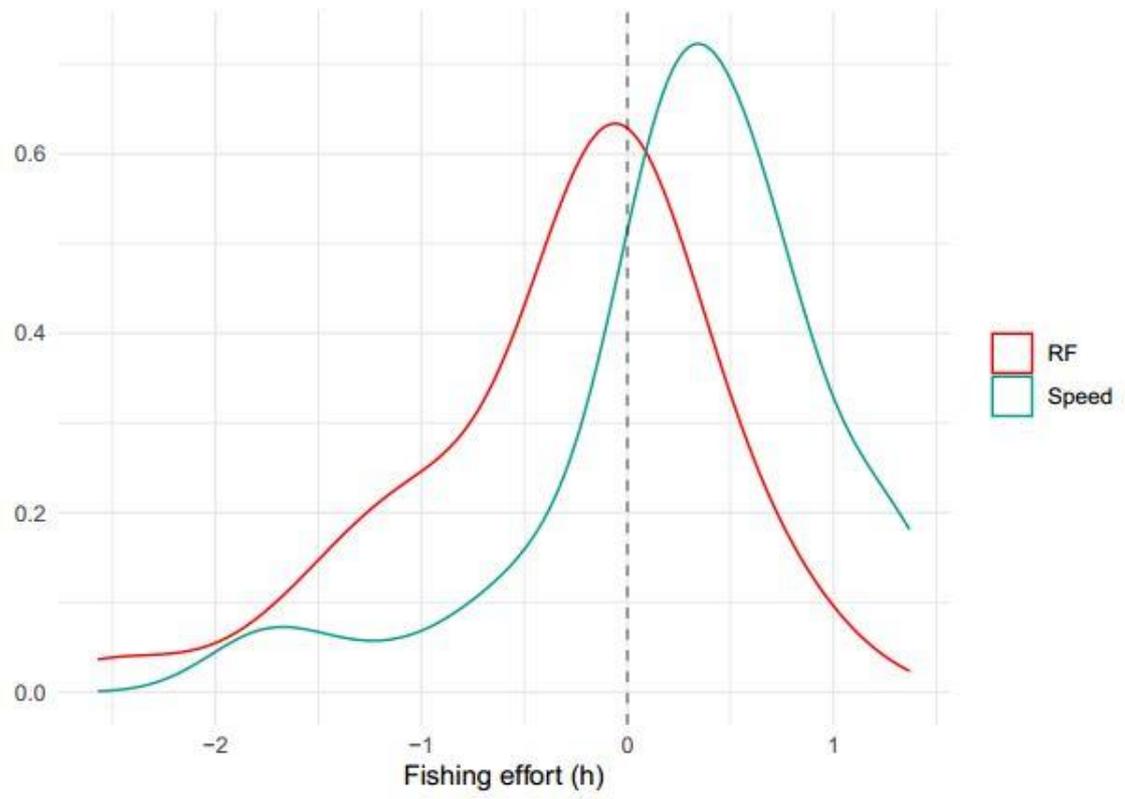
p_effort

Warning: Removed 18 rows containing missing values (geom_point).



Finally the distribution of effort density was displayed.

```
effort %>%
  mutate(id = row_number()) %>%
  pivot_wider(names_from = Method, values_from = Effort) %>% ungroup()
%>% select(-id) %>% pivot_longer(-c( no_trajet, Obs), names_to =
'Method', values_to = 'Effort') %>% mutate(error = Obs - Effort) %>%
ggplot() + geom_density(aes(x= error, y = ..density.., col = Method), adjust = 1.5)
+ scale_color_manual(values = c(wes_palette("Darjeeling1", n = 2))) +
xlab('Fishing effort (h)') +
ylab geom_vline(xintercept = 0, linetype = 'dashed', alpha = 0.5) +
theme(legend.title = element_blank(), panel.background = element_blank())-> p
print(p)
```



Annexe 5: Dispositif de prise de photo d'échantillon de poissons

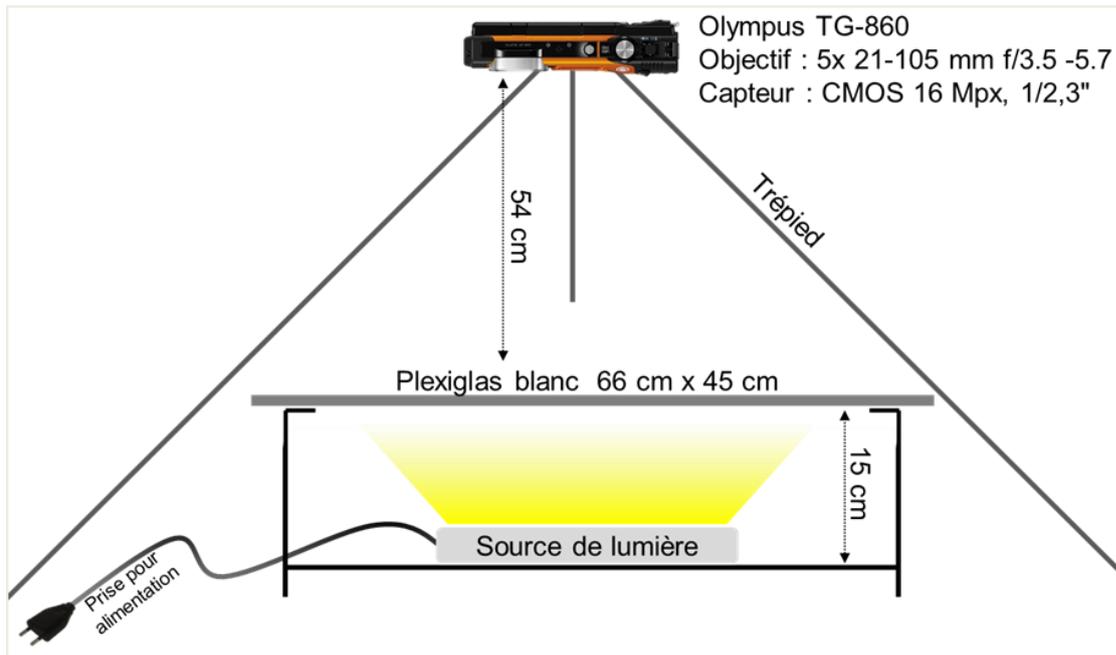


Schéma du design par : ANDRIALOVANIRINA Nicolas (2018)



Prise de photo par morphospecies

Annexe 6: Fiche du suivi participatif de la capture globale journalière de pêcheur

(Extrait de 10 premiers jours du mois de mai)

Fokontany :		Quartier :		Nom pêcheur		Code pecheur:		
Date	Journée	Nombre pêcheur embarqué	Engins utilisés	Poids poissons (kg)	Poids autres produits (kg)		toponymie	GPS
01-mai	Jour				PP :	PPP :		
					Crabe bon :	Crabe mauvais :		
					Crevettes :	Calamar :		
01-mai	Nuit				PP :	PPP :		
					Crabe bon :	Crabe mauvais :		
					Crevettes :	Calamar :		
02-mai	Jour				PP :	PPP :		
					Crabe bon :	Crabe mauvais :		
					Crevettes :	Calamar :		
02-mai	Nuit				PP :	PPP :		
					Crabe bon :	Crabe mauvais :		
					Crevettes :	Calamar :		
03-mai	Jour				PP :	PPP :		
					Crabe bon :	Crabe mauvais :		
					Crevettes :	Calamar :		
03-mai	Nuit				PP :	PPP :		
					Crabe bon :	Crabe mauvais :		
					Crevettes :	Calamar :		
04-mai	Jour				PP :	PPP :		
					Crabe bon :	Crabe mauvais :		
					Crevettes :	Calamar :		
04-mai	Nuit				PP :	PPP :		
					Crabe bon :	Crabe mauvais :		
					Crevettes :	Calamar :		
05-mai	Jour				PP :	PPP :		
					Crabe bon :	Crabe mauvais :		
					Crevettes :	Calamar :		
05-mai	Nuit				PP :	PPP :		
					Crabe bon :	Crabe mauvais :		
					Crevettes :	Calamar :		
06-mai	Jour				PP :	PPP :		
					Crabe bon :	Crabe mauvais :		
					Crevettes :	Calamar :		
06-mai	Nuit				PP :	PPP :		
					Crabe bon :	Crabe mauvais :		
					Crevettes :	Calamar :		
07-mai	Jour				PP :	PPP :		
					Crabe bon :	Crabe mauvais :		
					Crevettes :	Calamar :		
07-mai	Nuit				PP :	PPP :		
					Crabe bon :	Crabe mauvais :		
					Crevettes :	Calamar :		
08-mai	Jour				PP :	PPP :		
					Crabe bon :	Crabe mauvais :		
					Crevettes :	Calamar :		
08-mai	Nuit				PP :	PPP :		
					Crabe bon :	Crabe mauvais :		
					Crevettes :	Calamar :		
09-mai	Jour				PP :	PPP :		
					Crabe bon :	Crabe mauvais :		
					Crevettes :	Calamar :		
09-mai	Nuit				PP :	PPP :		
					Crabe bon :	Crabe mauvais :		
					Crevettes :	Calamar :		
10-mai	Jour				PP :	PPP :		
					Crabe bon :	Crabe mauvais :		
					Crevettes :	Calamar :		
10-mai	Nuit				PP :	PPP :		
					Crabe bon :	Crabe mauvais :		
					Crevettes :	Calamar :		

Annexe 7: Liste des familles de poissons capturées

ACANTHURIDAE
ALBULIDAE
APOGONIDAE
AULOSTOMIDAE
BALISTIDAE
BELONIDAE
BLENNIIDAE
BOTHIDAE
CAESIONIDAE
CALLIONYMIDAE
CARACANTHIDAE
CARANGIDAE
CENTRARCHIDAE
CENTRISCIDAE
CENTROPHORIDAE
CHAETODONTIDAE
CHIROCENTRIDAE
CIRRHITIDAE
CLUPEIDAE
CONGRIDAE
CYNOGLOSSIDAE
DACTYLOPTERIDAE
DICHISTIIDAE
DIODONTIDAE
ECHENEIDAE
EPHIPPIDAE
EXOCOETIDAE
FISTULARIIDAE
GERREIDAE
GOBIIDAE
HAEMULIDAE
HEMIRAMPHIDAE
HOLOCENTRIDAE
KYPHOSIDAE
LABRIDAE
LEIOGNATHIDAE
LETHRINIDAE
LUTJANIDAE
MICRODESMIDAE
MOBULIDAE
MONACANTHIDAE
MUGILIDAE
MULLIDAE
MURAENIDAE
NEMIPTERIDAE
OPHICHTHIDAE
OPHIDIIDAE
OSTRACIIDAE
PEMPHERIDAE
PERISTEDIIDAE
PINGUIPEDIDAE
PLATYCEPHALIDAE
PLOTOSIDAE
POLYNEMIDAE
POMACANTHIDAE
POMACENTRIDAE
PRIACANTHIDAE
PSETTODIDAE
RAJIDAE
RHINOBATIDAE
SCARIDAE
SCOMBRIDAE
SCORPAENIDAE
SERRANIDAE
SIGANIDAE
SOLEIDAE
SPARIDAE
SPHYRAENIDAE
SYNGNATHIDAE
SYNODONTIDAE
TERAPONTIDAE
TETRAODONTIDAE
TETRAROGIDAE
TORPEDINIDAE
ZANCLIDAE

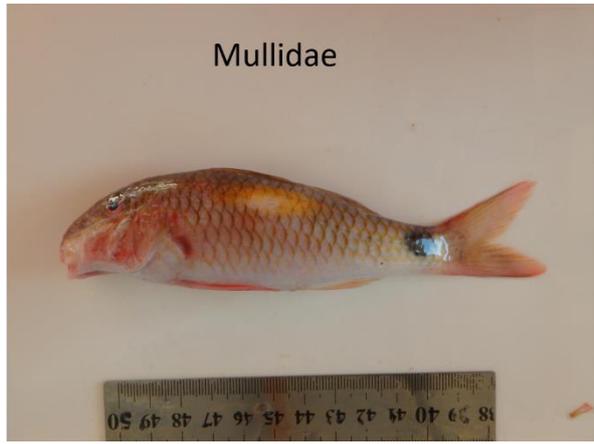
Annexe 8: Photos des dix familles dominantes des captures de poissons dans la baie de Toliara



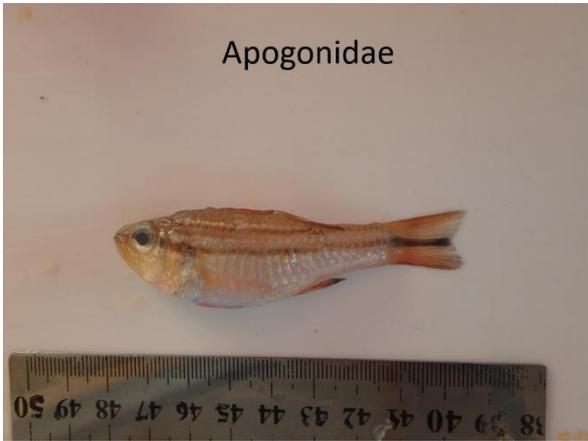
Pomacentridae



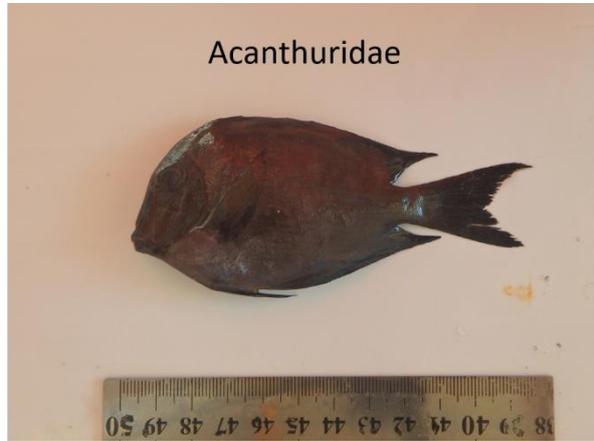
Mullidae



Apogonidae



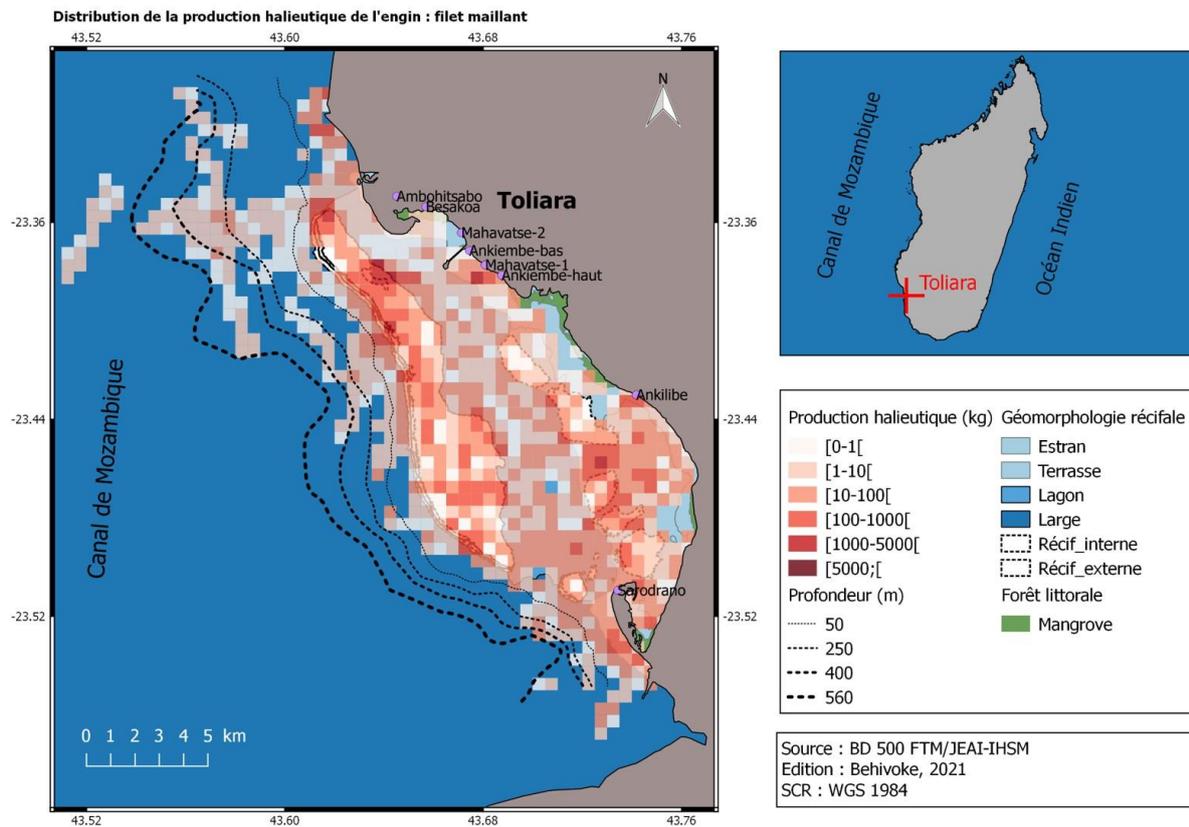
Acanthuridae



Annexe 9: Liste de nouvelles familles composant les captures des poissons récifaux dans la baie de Toliara

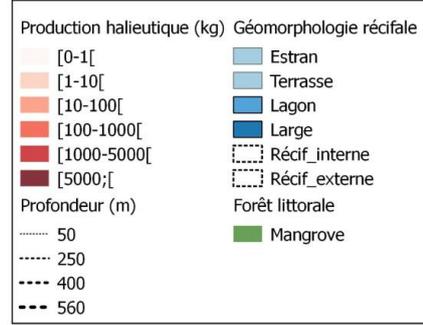
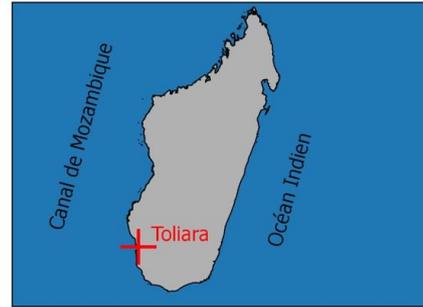
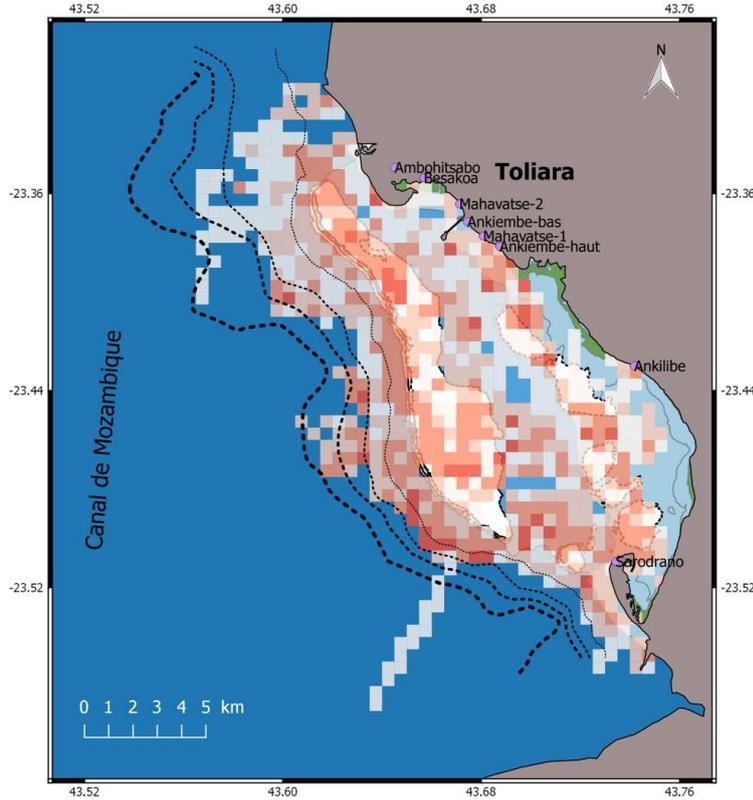
#	Famille
1	ALBULIDAE
2	APOGONIDAE
3	AULOSTOMIDAE
4	BLENNIIDAE
5	BOTHIDAE
6	CALLIONYMIDAE
7	CARACANTHIDAE
8	CENTRARCHIDAE
9	CENTRISCIDAE
10	CENTROPHORIDAE
11	CIRRHITIDAE
12	CONGRIDAE
13	CYNOGLOSSIDAE
14	DACTYLOPTERIDAE
15	DICHISTIIDAE
16	DIODONTIDAE
17	ECHENEIDAE
18	EPHIPPIDAE
19	EXOCOETIDAE
20	MICRODESMIDAE
21	MOBULIDAE
22	MONACANTHIDAE
23	MURAENIDAE
24	OPHICHTHIDAE
25	OPHIDIIDAE
26	PEMPHERIDAE
27	PERISTEDIIDAE
28	PLOTOSIDAE
29	POLYNEMIDAE
30	POMACANTHIDAE
31	PRIACANTHIDAE
32	PSETTODIDAE
33	RHINOBATIDAE
34	SCORPAENIDAE
35	SYNGNATHIDAE
36	SYNODONTIDAE
37	TERAPONTIDAE
38	TETRAODONTIDAE
39	TETRAROGIDAE
40	TORPEDINIDAE
41	ZANCLIDAE
42	CARCHARHINIDAE

Annexe 10: Zoom cartographique de la distribution de la production halieutique par engin



Distribution de la production halieutique du **filet maillant**

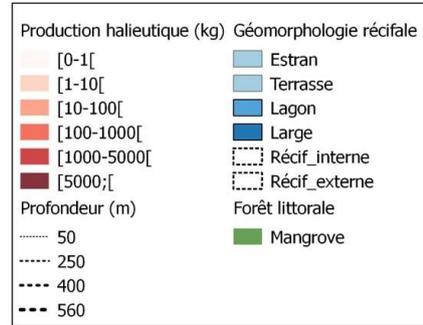
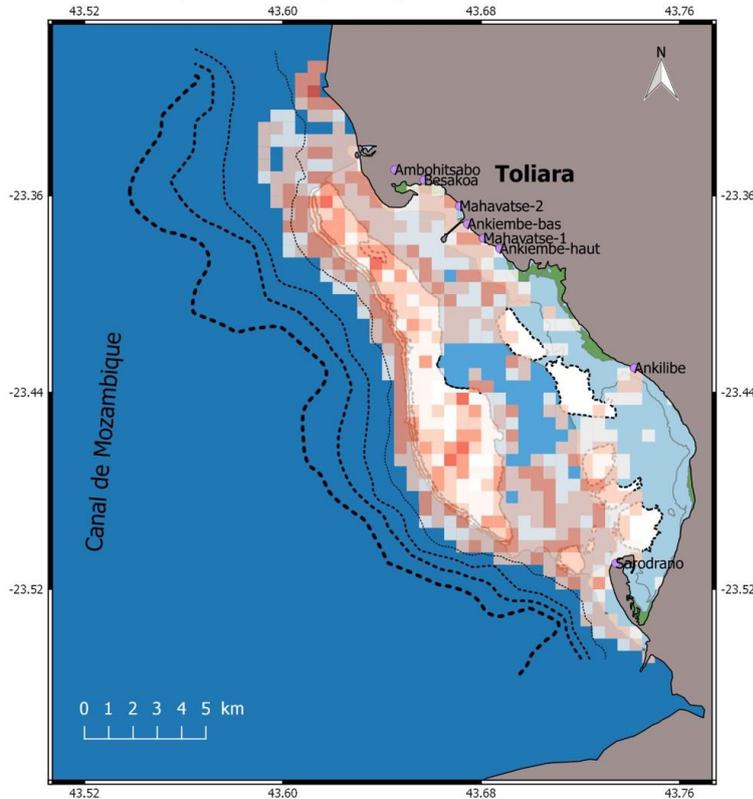
Distribution de la production halieutique de l'engin : ligne à main



Source : BD 500 FTM/JEAI-IHSM
Edition : Behivoke, 2021
SCR : WGS 1984

Distribution de la production halieutique de la ligne à main

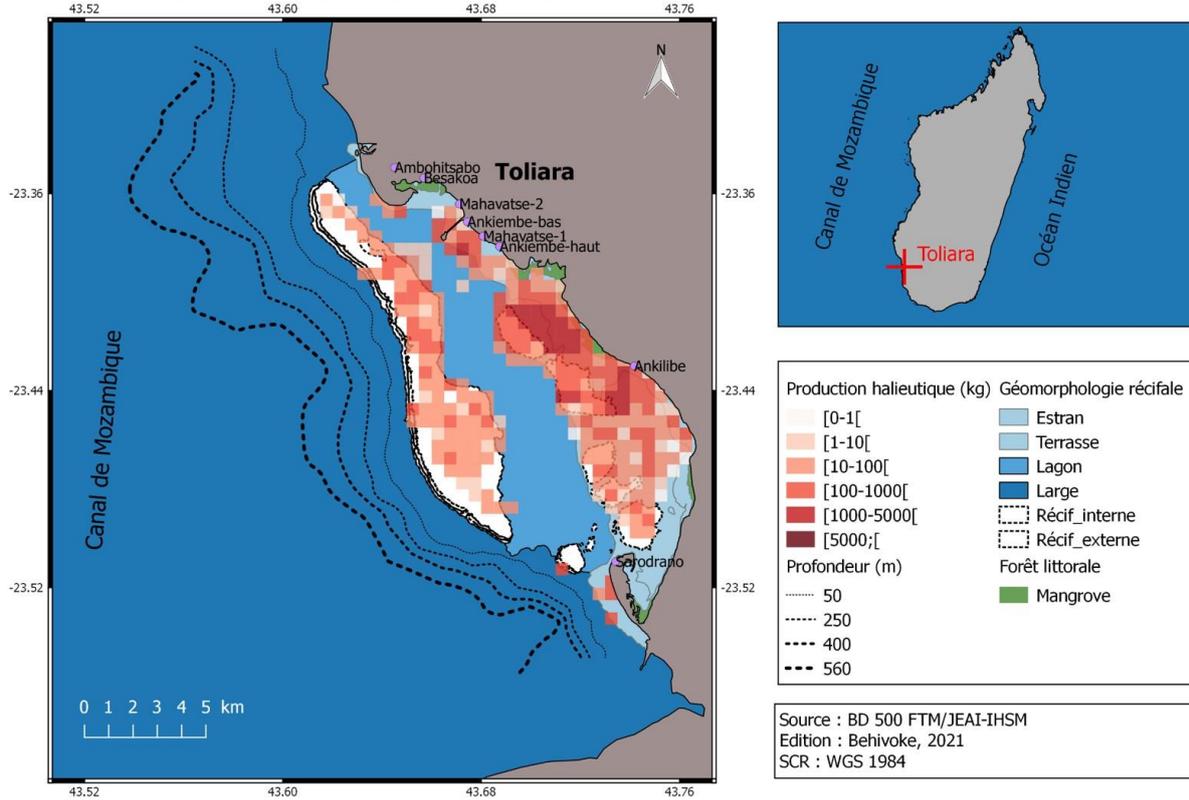
Distribution de la production halieutique de l'engin : fusil-harpon



Source : BD 500 FTM/JEAI-IHSM
Edition : Behivoke, 2021
SCR : WGS 1984

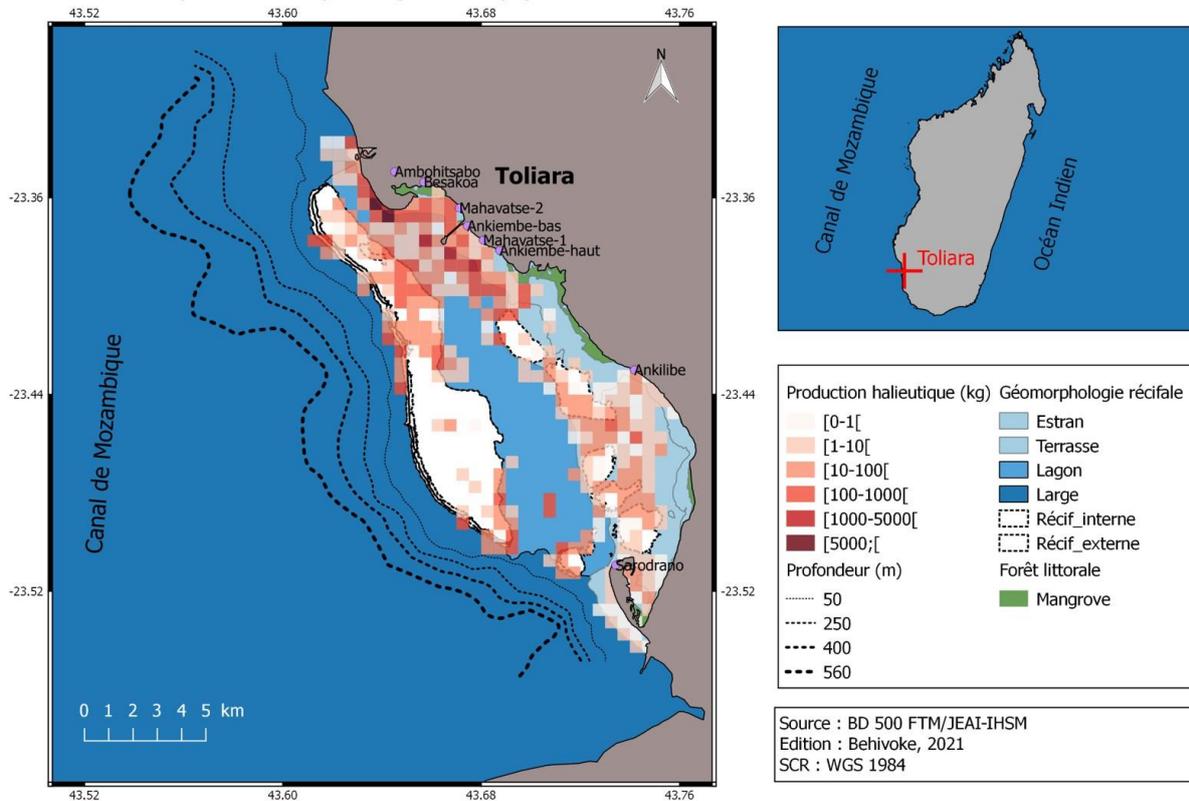
Distribution de la production halieutique du fusil-harpon

Distribution de la production halieutique de l'engin : chalut à moustiquaire



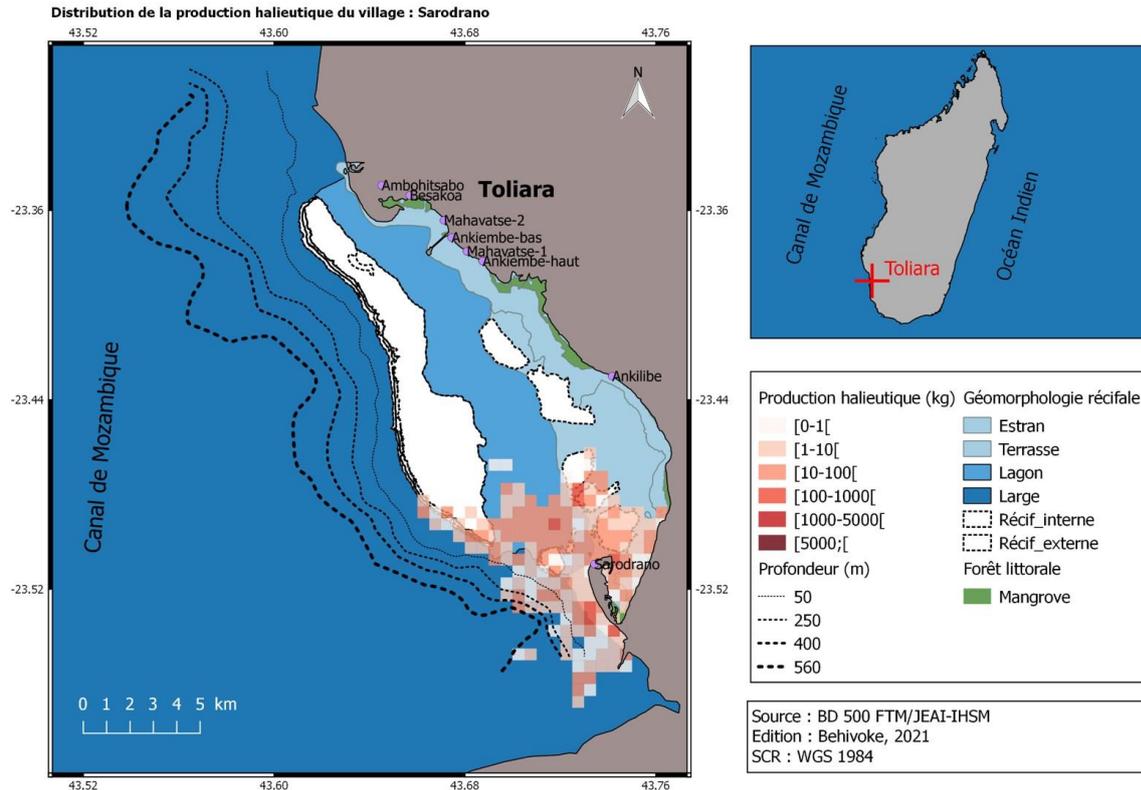
Distribution de la production halieutique du chalut à moustiquaire

Distribution de la production halieutique de l'engin : senne de plage

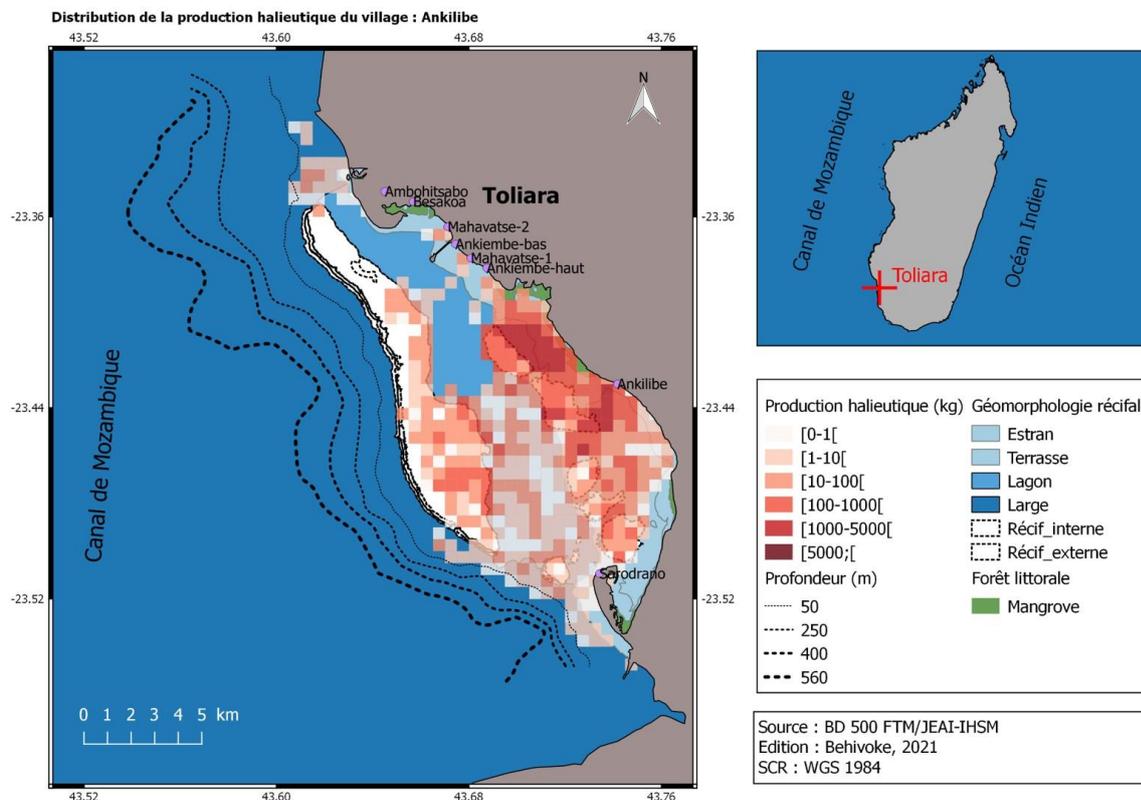


Distribution de la production halieutique de la senne de plage

Annexe 11: Zoom cartographique de la distribution de la production halieutique par village

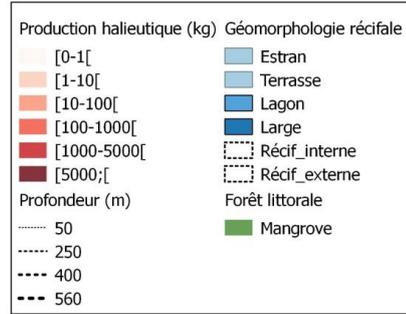
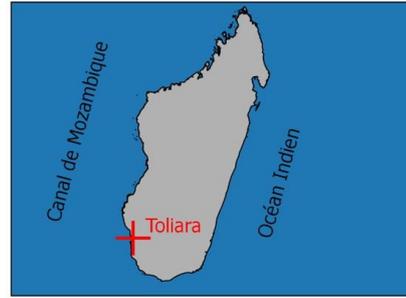
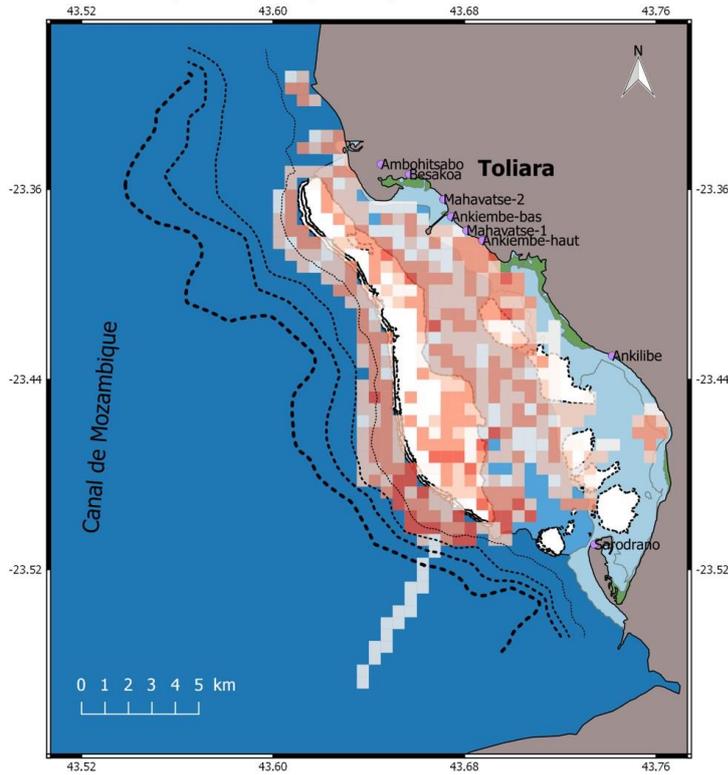


Distribution de la production halieutique du village de Sarodrano



Distribution de la production halieutique du village d'Ankilibe

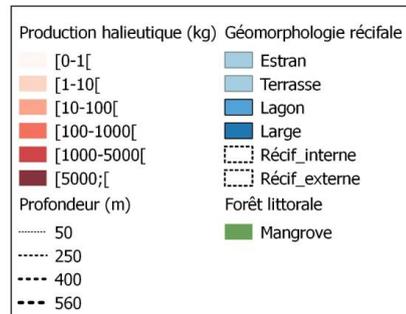
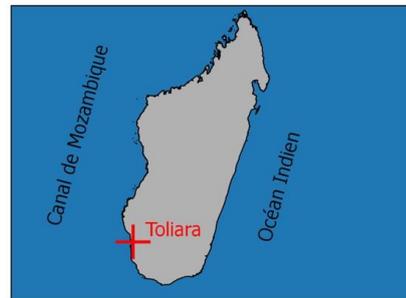
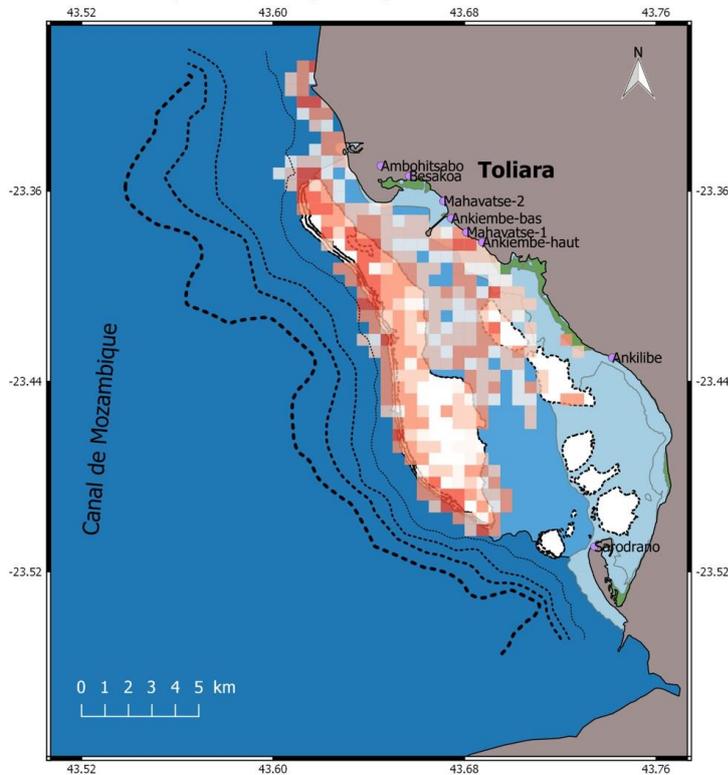
Distribution de la production halieutique du village : Ankiembe-haut



Source : BD 500 FTM/JEAI-IHSM
Edition : Behivoke, 2021
SCR : WGS 1984

Distribution de la production halieutique du village d'Ankiembe-haut

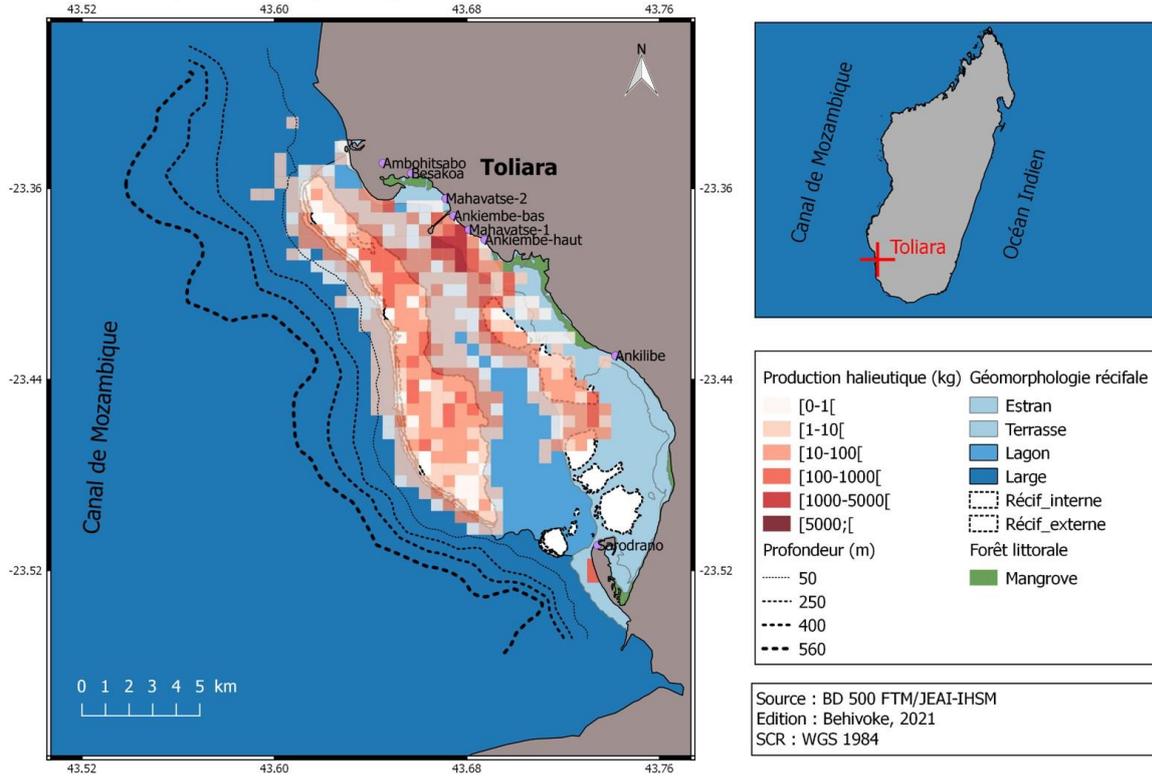
Distribution de la production halieutique du village : Mahavatse 1



Source : BD 500 FTM/JEAI-IHSM
Edition : Behivoke, 2021
SCR : WGS 1984

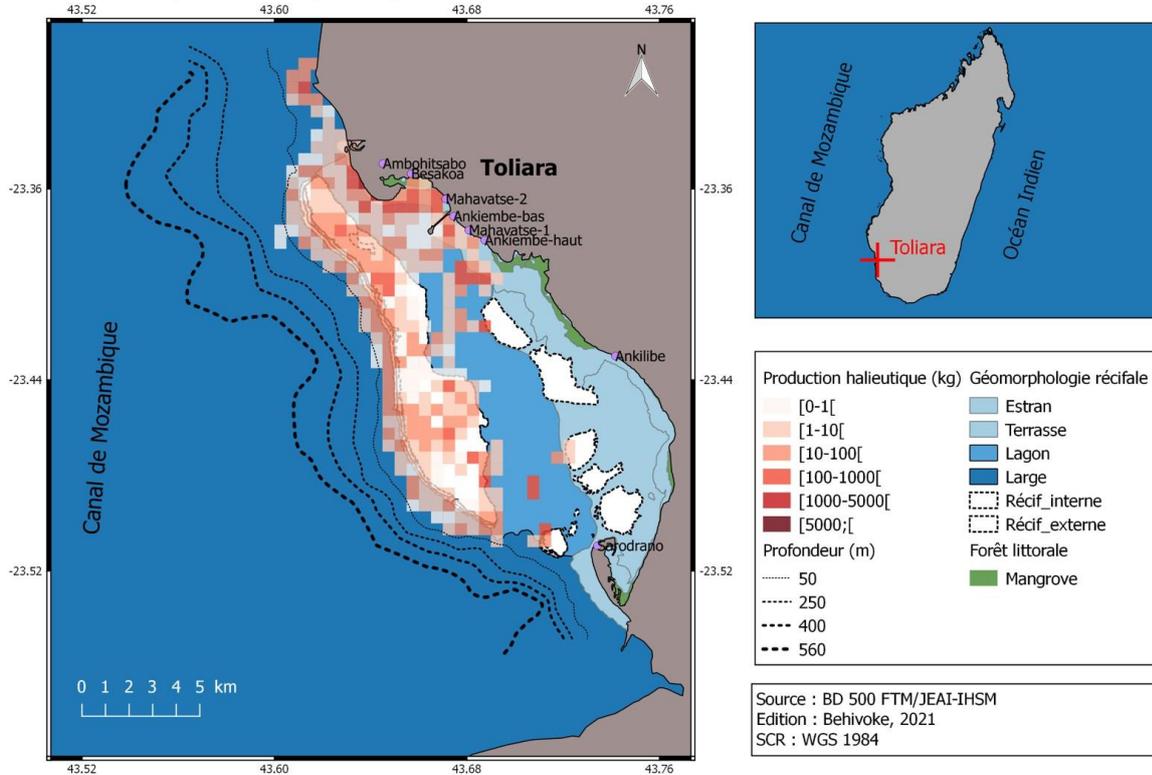
Distribution de la production halieutique du village de Mahavatse 1

Distribution de la production halieutique du village : Ankiembe-bas



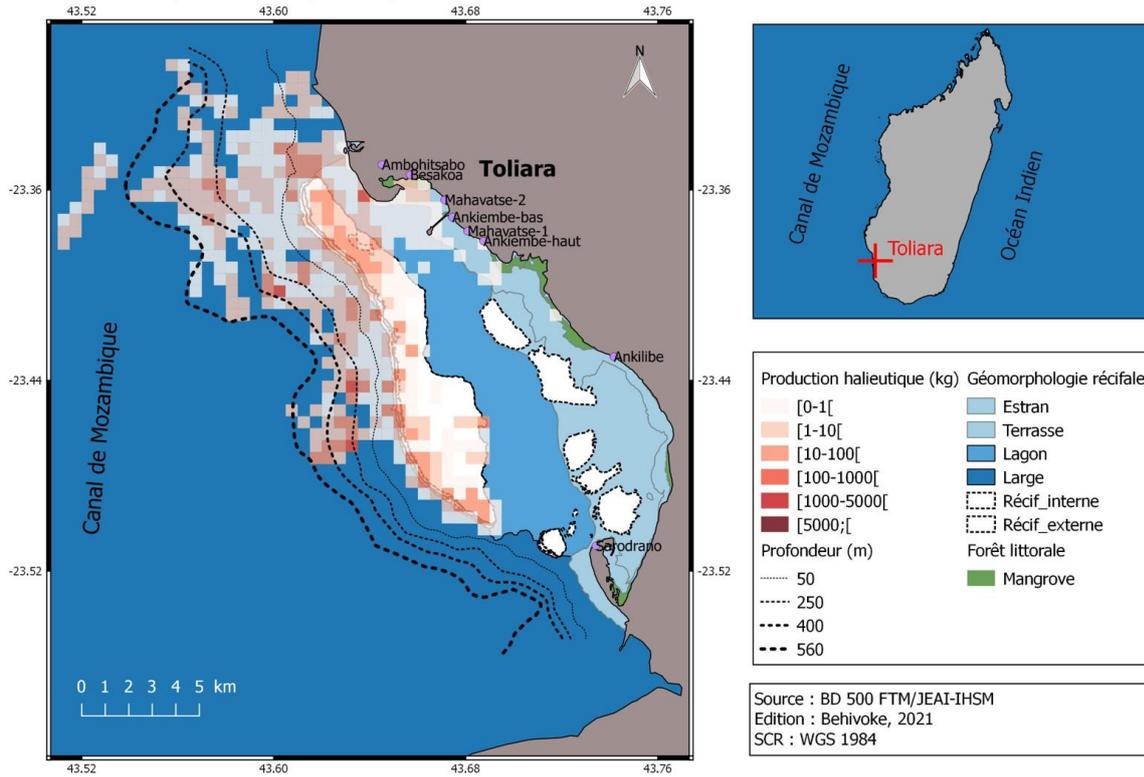
Distribution de la production halieutique du village d'Ankiembe-bas

Distribution de la production halieutique du village : Mahavatsé 2



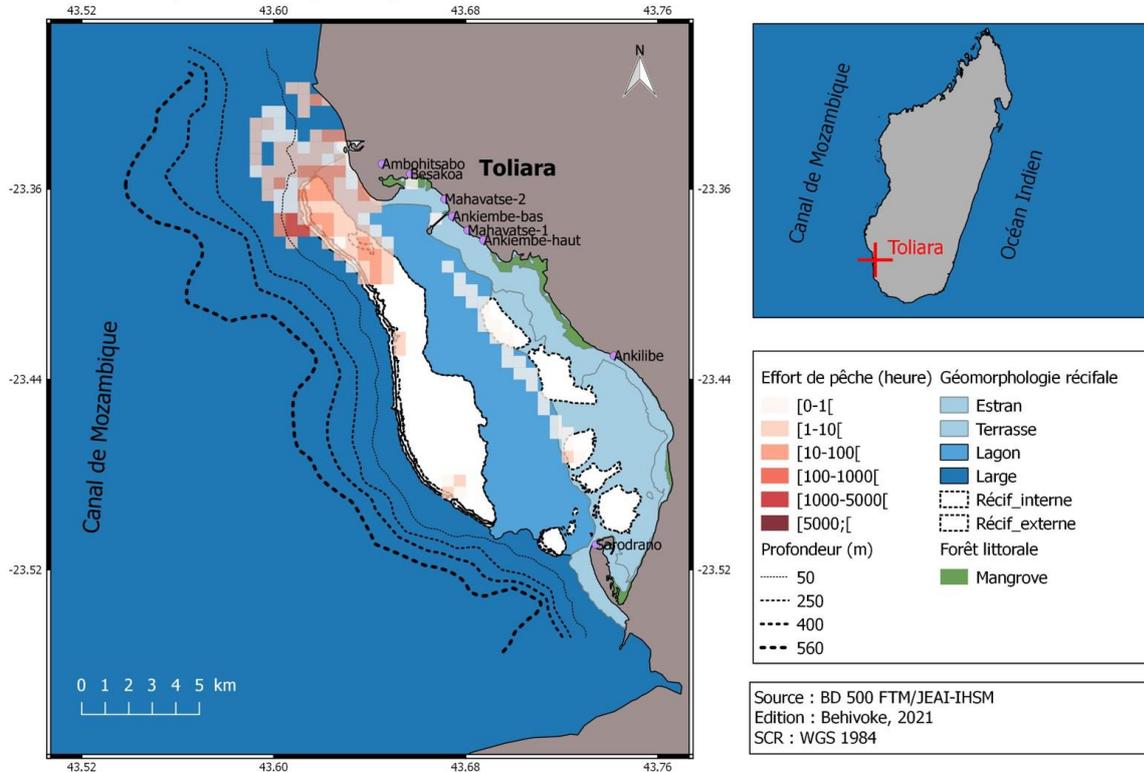
Distribution de la production halieutique du village de Mahavatsé 2

Distribution de la production halieutique du village de : **Besakoa**



Distribution de la production halieutique du village de **Besakoa**

Distribution de la production halieutique du village : **Ambohitsabo**



Distribution de la production halieutique du village d'**Ambohitsabo**

Annexe 12: Liste des communications scientifiques en relation avec la thèse

Orale :

Faustinato BEHIVOKE, Marc LÉOPOLD, Eulalie RANAIVOSON, Dominique PONTON, Marie-Pierre ETIENNE & Roddy RANDRIATSARA (2017). Using GPS trackers for characterizing a small-scale fishery: a case-study in Madagascar. 10th WIOMSA scientific symposium, 30th oct-04th nov 2017, Dar es Salaam - Tanzania.

Jamal MAHAFINA, Henitsoa JAONALISON, **Faustinato BEHIVOKE**, Lebely RADONIRINA, Marc LÉOPOLD, Dominique PONTON, Gildas TODINANAHARY, Mehdi ADJEROUD & Thierry LAVITRA (2017). Premiers résultats de la jeune équipe de recherche sur la gestion des écosystèmes coralliens à Madagascar. Forum de la recherche 5ème édition : Biodiversité marine, 22-23 septembre Nosy be – Madagascar.

Faustinato BEHIVOKE, Marie-Pierre ETIENNE, Marc LÉOPOLD, Roddy RANDRIANTSARA, Jérôme Guitton, Eulalie RANAIVOSON (2019). -Estimating effective fishing effort in coral reef fisheries using fine-scale GPS tracking. 11th WIOMSA scientific symposium, 1st-6th july 2019, Mauritius.

Roddy Michel RANDRIATSARA, **Faustinato BEHIVOKE**, Daniel RABERINARY, Marc LÉOPOLD (2019). Comparaison de la localisation des zones de pêche récifale à partir des déclarations des pêcheurs et des trajectoires des pirogues dans la baie de Toliara, sud-ouest de Madagascar. Colloque internationale sur : "Les enjeux pertinents de la maritimisation pour un développement durable", 18-20 Juin 2019 Toliara-Madagascar.

Affichée :

BEHIVOKE F., RANAIVOSON E., LÉOPOLD M., (2017) Cartographie d'une pêcherie récifale à partir d'un suivi GPS à haute fréquence des déplacements des embarcations. 13ème colloque « Pêches et Changements Globaux » organisé à IFREMER Centre de Nantes, 28 au 30 juin 2017.

JAONALISON H., PONTON D., LÉOPOLD M., Mahafina J., RANAIVOSON E., DURAND J-D., LEBELY R., **BEHIVOKE F.**, (2017). Assessing the fish biodiversity information through traditional

Malagasy fisheries in seagrass beds: a work in progress. 10th WIOMSA scientific symposium, Dar es Salaam 2017.

RANDRIATSARA Roddy Michel, **BEHIVOKE Faustinato** & LÉOPOLD Marc (2019). Mapping study of traditional fishing from the analysis of the pirogue trajectories. The case of Ankilibe village, Southwestern Madagascar. 11th WIOMSA scientific symposium, 1st-6th July 2019, Mauritius.

Journal:

Ronald FRICKE, Jamal MAHAFINA, **Faustinato BEHIVOKE**, Henitsoa JAONALISON, Marc LÉOPOLD & Dominique PONTON (2018). Annotated checklist of the fishes of Madagascar, southwestern Indian Ocean, with 157 new records. *FishTaxa* (2018) 3(1): 1-431. E-ISSN: 2458-942X.

ANDRIALOVANIRINA, N., PONTON, D., **BEHIVOKE, F.**, MAHAFINA, J., LÉOPOLD, M., 2020. A powerful method for measuring fish size of small-scale fishery catches using ImageJ. *Fisheries Research* 223, 105425.

BEHIVOKE, F., ETIENNE, M.-P., GUITTON, J., RANDRIATSARA, R.M., RANAIVOSON, E., LÉOPOLD, M., 2021. Estimating fishing effort in small-scale fisheries using GPS tracking data and random forests. *Ecological Indicators* 7.

Harinirina Sandra Ranaivomanana, Sébastien Jaquemet, Dominique Ponton, **Faustinato BEHIVOKE**, Roddy Michel Randriatsara, Jamal Mahafina, Marc Léopold. Tackling the issue of intense fishing pressure on small coral reef fishes in southwestern Madagascar (*en preparation*).

Patricia Andrée Herinirina, Lionel Bigot, Patrick Frouin, Huguette Vollandrae, Roddy Randriatsara, **Faustinato BEHIVOKE**, Lantoasinoro Ranivoarivelo, Marc Léopold. Seagrass macroinvertebrate assemblage supports strong mosquito net fishing in southwestern Madagascar (*en preparation*).