

Modélisation du fonctionnement trophique ou écosystémique

TITO de MORAIS Luis, LE LOC'H François et BROCHIER Timothée

Introduction sur les modèles écosystémiques

Les modèles permettent une formalisation mathématique des relations écologiques connues entre les composantes d'un système et les observations empiriques obtenues à partir d'échantillonnages sur le terrain (par exemple les relations entre proies et prédateurs, les biomasses relatives entre espèces, les capacités de reproduction, les niches écologiques occupées, etc). Malgré les incertitudes inhérentes à tous les modèles, ceux-ci offrent notamment trois avantages principaux (1) la représentation simplifiée des systèmes observés, dont la confrontation avec la réalité permet de tester la cohérence des éléments ayant servi à la construction du modèle, (2) la génération de nouvelles hypothèses sur des processus mal connus, (3) la simulation sur le long terme de l'évolution des systèmes, et donc des capacités de prédiction. Parmi la multitude de modèles disponibles nous avons retenu deux approches un modèle de flux trophiques à l'état stable (Ecopath) et un modèle individu-centré (Osmose). Les premiers (Christensen et Pauly 1992) utilisent essentiellement les flux d'énergie échangés entre compartiments du système, les seconds analysent les interactions entre « agents » (Grimm et al. 2006) ayant chacun les caractéristiques, en termes de traits de vie, les plus proches possible de l'objet qu'ils sont censés représenter (en termes de comportement, de reproduction, de nourriture, ...). Dans les deux cas, les compartiments ou « agents » modélisés peuvent représenter soit directement des espèces distinctes, soit, le plus souvent, des « méta-espèces » ou groupes d'espèces aux caractéristiques écologiques voisines. En milieu tropical ouvert, eu égard à la grande richesse spécifique des milieux, c'est souvent cette approche par « méta-espèces » qui est retenue. Dans le cas de milieux comme le Bamboung où la pêche est un élément fondamental (qu'elle ait été arrêtée, qu'elle perdure ou que l'on souhaite analyser les impacts de sa reprise), les pêcheurs sont également un des éléments du modèle (compartiment dans Ecopath ou agent pour Osmose), se comportant comme un « super-prédateur » avec ses caractéristiques propres.

Les modèles individu-centrés sont en général fondés sur des hypothèses plus réalistes que les modèles utilisant des variables d'état comme les modèles de flux trophiques. Cependant ainsi que le note Grimm (1999) il ne faut pas oublier que le but de la modélisation individu-centrée n'est pas « réalisme », mais bien la modélisation en elle-même à des fins de compréhension des systèmes. L'approche fondée sur les individus est une approche « bottom-up » (du bas vers le haut) qui commence par les « parties » (les individus) d'un système, puis tente de comprendre comment les propriétés du système émergent de l'interaction entre ces parties (Grimm 1999). Cependant, ces approches ascendantes ne suffiront pas à conduire à des théories au niveau des systèmes. Les approches utilisant des variables d'état ou « top-down » (du haut vers le bas) sont nécessaires pour fournir une vue intégrée appropriée, et appréhender les questions pertinentes à l'échelle de la population (Grimm 1999). D'où l'intérêt de mener en parallèle des modélisations selon les deux types d'approche comme cela a été fait dans le Bamboung.

Présentation rapide des modèles Ecopath et Osmose sur le Bamboung

Le modèle écosystémique Ecopath (Christensen et Pauly 1992 ; Christensen et al. 2008)

Le modèle Ecopath est un modèle trophodynamique qui permet de comprendre l'organisation et le fonctionnement trophique d'un écosystème en le considérant dans sa totalité. L'ensemble de la biomasse de l'écosystème est ainsi répartie entre différents compartiments trophiques, définissant les groupes fonctionnels du modèle. Chaque compartiment regroupe les espèces (ou stades biologiques) qui ont sensiblement les mêmes proies, les mêmes prédateurs et les mêmes caractéristiques biologiques (productivité, taux de consommation, taux de mortalité...). Le modèle Ecopath permet de représenter et quantifier les interactions et flux trophiques entre différents groupes trophiques, en supposant un état d'équilibre des masses. Ce modèle, avec son extension Ecosim, peut être utilisé pour (Christensen et al. 2008) :

- Poser des questions d'ordre écologique ;
- Évaluer les impacts de la pêche sur tout l'écosystème ;
- Explorer des options de gestion sur une zone ;
- Évaluer l'impact et la position d'AMP ;
- Évaluer l'impact de changements environnementaux.

L'approche Ecopath utilise des équations d'équilibre de masse pour estimer les flux entre compartiments. Chaque groupe (espèce ou méta-espèce) est représenté par une équation d'équilibre de masse et nécessite en entrée les variables suivantes : biomasse (B), productivité (P/B), taux de consommation (Q/B), efficacité écotrophique (EE, définie comme la proportion de la production de chaque groupe qui est utilisée c'est à dire consommée dans la chaîne trophique, exportée, accumulée ou pêchée) et enfin le régime alimentaire et les captures par pêche de chaque groupe. Les équations linéaires sont résolues par algèbre matricielle pour produire des estimations des flux qui équilibrent les entrées et les sorties des compartiments ; tout paramètre manquant fait l'objet d'une estimation à partir des paramètres connus. Cependant, les exports (pêche) et le régime alimentaire doivent toujours être entrés, alors que, sur les quatre autres paramètres d'entrée de base (B, P/B, Q/B et EE), trois sur quatre seulement doivent être connus. Dans la plupart des cas, quand toute l'information destinée à faire tourner un modèle Ecopath est rassemblée, le modèle n'est pas en équilibre à cause des incohérences dans l'information. Les valeurs d'un ou de plusieurs des paramètres doivent être changées de façon itérative jusqu'à obtention d'un équilibre. Il y a en fait plus d'une façon de construire un modèle Ecopath et il n'existe jamais une solution unique pour un modèle. Le logiciel Ecopath avec son module ECOSIM permet une analyse de sensibilité pour examiner l'effet des paramètres sur le modèle. L'efficacité écotrophique permet de vérifier immédiatement le bilan d'équilibre de masse. Si le modèle n'est pas équilibré, il y a des flux négatifs vers les détritiques et les valeurs de EE sont supérieures à un.

Paramètres pris en compte dans la construction des groupes (espèces ou méta-espèces) pour le modèle Ecopath de Bamboung

Plusieurs paramètres sont pris en compte dans la construction des groupes de poissons : la catégorie écologique (Albaret 1999), la catégorie trophique, la taille maximale L_{max} issue de Fishbase (Froese et Pauly 2009), la taille asymptotique L_{∞} calculée à partir de la taille maximale observée dans le Bamboung, et le niveau trophique issu de Fishbase (Froese et Binohlan 2000). Les catégories trophiques et écologiques sont issues de travaux antérieurs faits sur le Sine Saloum et d'autres estuaires ouest-africains. La catégorie écologique prend en

compte le degré d'euryhalinité des espèces ainsi que leur cycle bio-écologique et leur abondance. Le niveau trophique et la catégorie trophique permettent d'effectuer un premier tri, affiné ensuite par la prise en compte des tailles asymptotiques et des catégories écologiques.

Au final, 21 groupes de poissons (allant des requins aux petits benthophages) sont identifiés (Tab. 9.1). Deux groupes, dauphins et oiseaux, sont également construits. Les 8 groupes d'invertébrés (allant des crevettes aux détritus) sont repris de modèles Ecopath relatifs à l'ensemble du Saloum (Vignot 2007 ; Villanueva 2004).

Tableau 9.1 : Groupes trophiques (espèces ou méta-espèces) utilisés dans la construction du modèle Ecopath de Bamboung.

Requins	Tétron	Sardinelle	Crabe
Dauphins	Petit capitaine	Gerres	Macrobenthos
Oiseaux	Pompaneau	Ethmalose	Meiobenthos
Raies	Carangues	Mulets	Zooplancton
Otolithes	Mâchoirons marins	Pomadasys	Phytoplancton
Barracudas	Elops	Tilapias	Microphytobenthos
Grand capitaine	Breton africain	Petits benthophages	Détritus
Vivaneaux	Sole-langue	Crevettes	

Le modèle multi-agent Osmose

La configuration Osmose utilisée à Bamboung est une adaptation du modèle individu centré (ou multi-agent) pré-existant Osmose (Shin et Cury 2001 ; Yemane et al. 2009) aux spécificités des assemblages de poissons des milieux estuariens, en l'occurrence le Sine Saloum au Sénégal. Osmose est un modèle de flux d'énergie spatialisé à travers un écosystème structuré en taille, avec donc des règles de prédation entre les individus principalement déterminées par des rapports de tailles. Ici nous présentons une configuration de ce modèle pour l'AMP de Bamboung (Fig. 1.1 et 1.2), ainsi que quelques adaptations réalisées pour satisfaire aux particularités des écosystèmes d'estuaires.

Les adaptations au cas de l'AMP de Bamboung concernent principalement la prise en compte de la diversité des histoires de vie et stratégies de prédation qui vont déterminer les périodes de présence dans le bolon, et sont détaillées dans Brochier et al. (2012). Par mesure de simplification, nous avons regroupé les espèces de poissons présentes dans le bolon en 15 méta-espèces (Tab. 9.2), ou groupes d'espèces, représentant 97% de la biomasse des poissons capturées à la senne. Les espèces rassemblées dans chacun de ces groupes partagent des caractères fonctionnels communs, leur appartenance à une même catégorie trophique et à une même catégorie écologique. Idéalement, ces groupes devraient également partager des caractères morphologiques (croissance, fécondité) et morphométriques (rapport taille-poids, gamme de taille des proies,...). Toutefois, en première approximation, nous avons défini des groupes partageant les catégories trophiques et écologiques, en choisissant une espèce-type parmi les espèces dominantes en biomasse. Nous avons défini quatre catégories d'histoire de vie des poissons observés dans l'estuaire, et pour trois d'entre elles, Osmose a dû être modifié afin de pouvoir les prendre en compte.

En plus du rapport de taille entre les prédateurs et les proies, la prédation est aussi limitée par une matrice d'accessibilité des espèces entre elles. Cette matrice d'accessibilité intègre trois facteurs autres que la taille limitant la prédation : (1) les habitats, (2) les régimes alimentaires spécifiques et (3) les défenses naturelles.

L'habitat préférentiel de chaque espèce est défini selon son stade de développement et un taux de rencontre est ainsi estimé entre les individus affectés à chaque habitat. Les régimes spécifiques de chaque espèce proviennent de l'observation des contenus stomacaux dans la même zone ou dans des environnements similaires. Enfin, la présence de défenses naturelles, en particulier chez l'une des espèces présentes, *Arius spp.*, rend inaccessible à la prédation les stades adultes.

Tableau 9.2 : Définition des méta-espèces (Modèle) fondées sur une espèce-type et des espèces associées. (Voir le chapitre inventaire faunistique pour la signification des codes espèces, des catégories écologiques et des catégories trophiques).

Modèle	Espèce type	Espèces associées	Catégorie écologique	Catégorie trophique
Arius	AGA	ARP AHE	ME	p2-ge
Pomadasys	PJU	PPE TFA PIN	Em	p1-bt
Gerres	GNI	GME	Es	p1-mc
Sardinelle	SEB	IAF SAU	ME	p1-zo
Ethmalose	EFI		Em	he-ph
Mulet	LFA	LDU MCU MBA LGR MCE	Em-ME	he-de
Elops	ELA	ELS	ME	p2-pi
Dasyatis	DAM	DMA	Em	p1-bt
Lutjans	LGO	EAE LUD	Ma	p2-pi
Tilapia	THE	TGU	Es	he-ph
Grands prédateurs estuariens	POQ	SPI SGU TLE	ME	p2-pi
Grands prédateurs marins	CLC	Dauphins	Mo	p2-pi
Prédateurs estuariens	GDE	PLM PBR PEL PTY	ME-Em	p2-ge
Macrophages estuariens	CHL	BAU DAF VSE	ME	p1-mc
Petits prédateurs	PSB	CST	Em	p2-ge

Difficultés inhérentes aux approches de modélisation

Quelle que soit l'approche de modélisation choisie, la simplification imposée par le modèle de même que les contraintes de calcul, posent un certain nombre de difficultés en grande partie liées à l'insuffisance des données biologiques et écologiques sur les espèces et les milieux concernés :

- Plus un modèle veut s'approcher de la représentativité des mécanismes qu'il simule, plus le modélisateur sera confronté à des choix de paramétrisation ne pouvant se baser sur des connaissances existantes, presque toujours insuffisantes.
- Une des principales sources d'incertitude dans les modèles d'écosystèmes présentés ici concerne les biomasses respectives de chacun des plus bas niveaux trophiques. Dans Ecopath, ces bas niveaux trophiques sont rétro-calculés pour satisfaire à la consommation des niveaux trophiques supérieurs. Pour faire ce rétro-calcul, il est cependant nécessaire, en l'absence de mesures, d'estimer la productivité des bas niveaux trophiques. Dans Osmose au contraire, les biomasses de bas niveaux trophiques constituent le principal forçage du système et nécessitent également une information sur la distribution spatiale de ceux-ci.
- En l'absence de données de terrain sur les biomasses de bas niveaux trophiques, Ecopath permet d'en réaliser une estimation qui peut servir à les paramétrer dans Osmose, ainsi que nous l'avons fait. Mais l'estimation des P/B est délicate et va pourtant influencer tout le reste. Des erreurs importantes sur les estimations des P/B peuvent rendre impossible la calibration de Osmose. Enfin, il n'existe à l'heure actuelle que très peu d'informations sur l'évolution de ces bas niveaux trophiques depuis la mise en défens de l'AMP, alors qu'il semble que l'impact puisse être important sur ces groupes au vu des modifications de spectre de tailles des coquillages traditionnellement ramassés (Mercier 2011).
- Les contraintes propres à chaque type de modélisation imposent de définir des groupes d'espèces (méta-espèces) adaptés à chaque modèle. Lorsque plusieurs types de modèles sont mis en œuvre, il est important de chercher à harmoniser, autant que possible, les méthodologies de détermination des groupes.
- Pour les espèces se reproduisant localement, la question de la distribution spatiale de la ponte reste ouverte pour certains des groupes d'espèces modélisés. Enfin, toutes les questions reliées à la saisonnalité (ponte, migration, pêche,..), et qui doivent être paramétrées selon le pas de temps de 10 jours de la configuration Osmose, s'avèrent difficiles à définir en se basant sur seulement 3 points d'échantillonnage dans l'année, bien que l'on sache que ces trois points correspondent aux trois saisons hydrologiques marquées dans cette région.
- Dans la configuration Osmose, une autre grande limitation de l'approche par groupes d'espèces concerne l'estimation des paramètres biologiques et morphométriques ; en effet, si les espèces d'un même groupe partagent les mêmes catégories écologiques et trophiques, elles ont parfois également des tailles et des formes très différentes, ce qui de par la nature même du modèle structuré en taille les inscrirait dans une dynamique trophique différente de celle de l'espèce type choisie pour le groupe.

Résultats obtenus par la modélisation et résultats potentiels attendus

Modèle Ecopath

L'approche Ecopath du bolong de Bamboung a fait l'objet de d'un mémoire de master (Colléter 2010), d'un article scientifique (Colléter et al. 2012). D'autres valorisations scientifiques sont en cours de publication.

L'ensemble des démarches mises en œuvre montre bien un effet réserve sur le bolon de Bamboung. L'arrêt de la pêche a provoqué une augmentation de la biomasse des prédateurs et une diminution de celles des proies, conséquence en partie d'un effet Top-Down. Au final, la mise en place d'une AMP à cet endroit a rempli des objectifs de préservation de la biomasse et de la biodiversité. L'élaboration de modèles trophodynamiques semble donc un bon outil pour juger de l'efficacité locale des AMP, en terme de modification de la structure trophique de l'écosystème. Bien que s'intéressant au seul réseau trophique, ces modèles sont informatifs sur les peuplements et leurs évolutions. De plus, ils permettent une synthèse de toutes les connaissances disponibles sur la zone et les peuplements biologiques. On peut ainsi se rendre compte aussi des manques d'informations concernant certains compartiments, dans notre cas le benthos et les invertébrés pélagiques par exemple (Colléter 2010).

Le modèle permet en particulier, à partir de l'analyse d'un réseau trophique complexe (Fig. 9.1) de montrer comment une espèce (Fig. 9.2) ou une pêcherie (Fig. 9.3) impacte les différents groupes d'espèces.

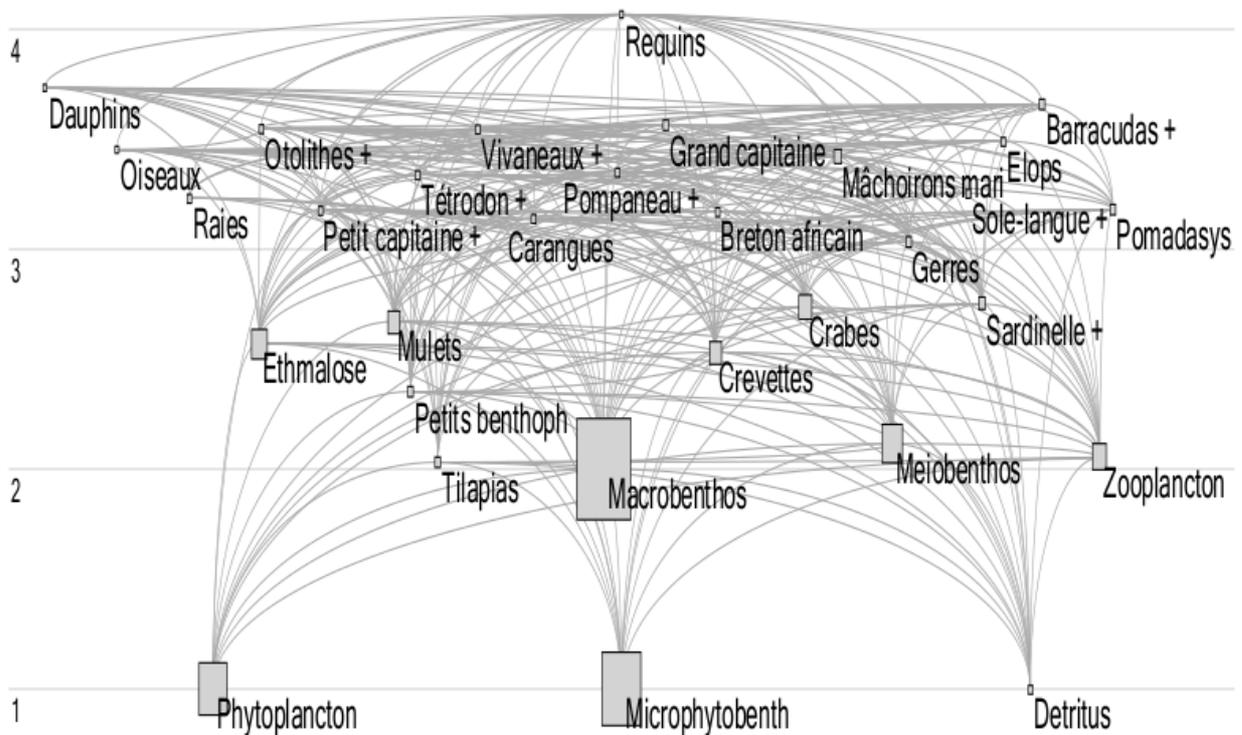


Figure 9.1 : Représentation de la structure du réseau trophique du Bamboung en 2003 modélisé par Ecopath (niveau trophique en ordonnée, taille des rectangles fonction de la biomasse) (Colléter 2010).

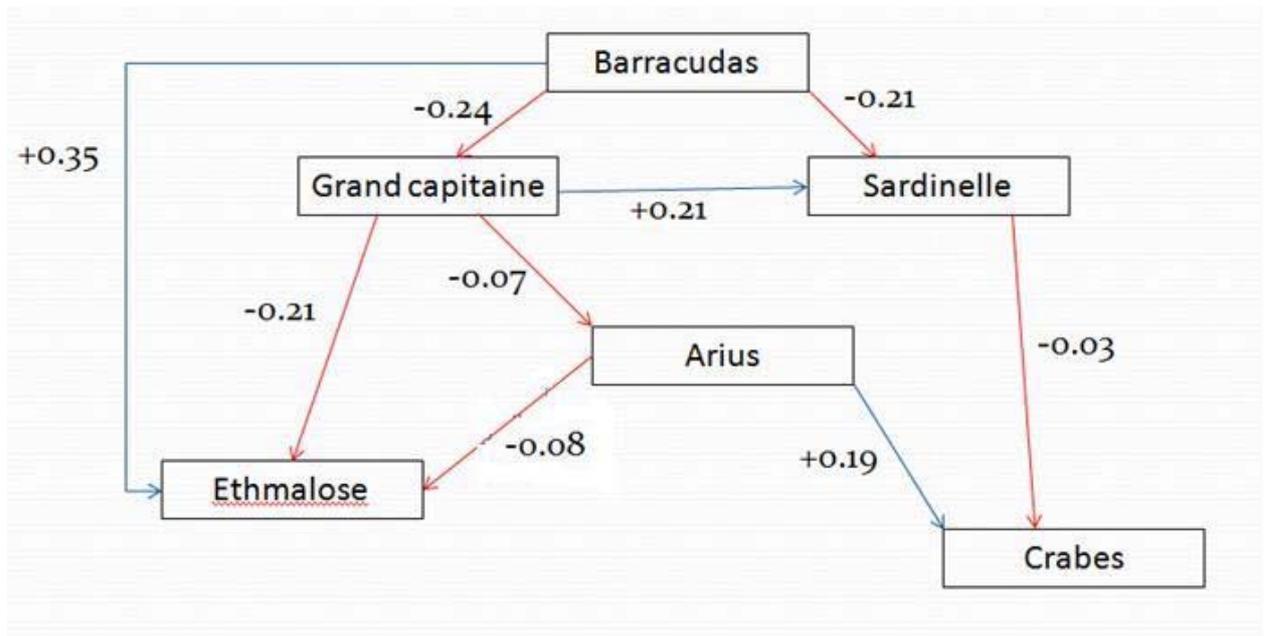


Figure 9.2 : Schéma représentant l'impact de l'augmentation relative de la biomasse de barracudas d'une unité sur une partie du réseau trophique, les valeurs sont égales à l'augmentation/la diminution de biomasse des groupes impactés (en bleu : augmentation, en rouge : diminution) (Colléter 2010).

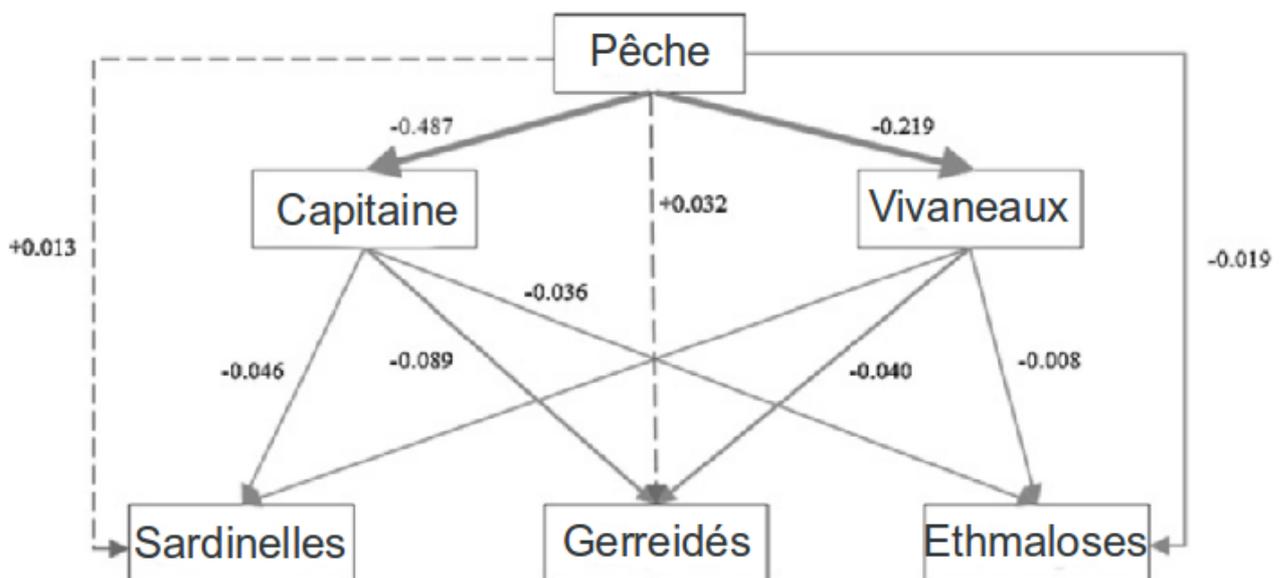


Figure 9.3 : Diagramme de l'impact trophique mixte (ITM) portant sur l'influence de la pêche sur deux grands prédateurs et trois de leurs proies. Les lignes en pointillés correspondent à des effets positifs et les lignes pleines à des effets négatifs. Les lignes plus épaisses correspondent à des effets importants ($> 0,1$) (les valeurs des ITM sont indiquées à côté des lignes) (Colléter et al. 2012).

Le modèle Ecopath permet également une estimation des exports potentiels (qui ne sont pas nécessairement des exports effectivement réalisés) à partir de l'AMP vers la zone extérieure (Fig. 9.4).

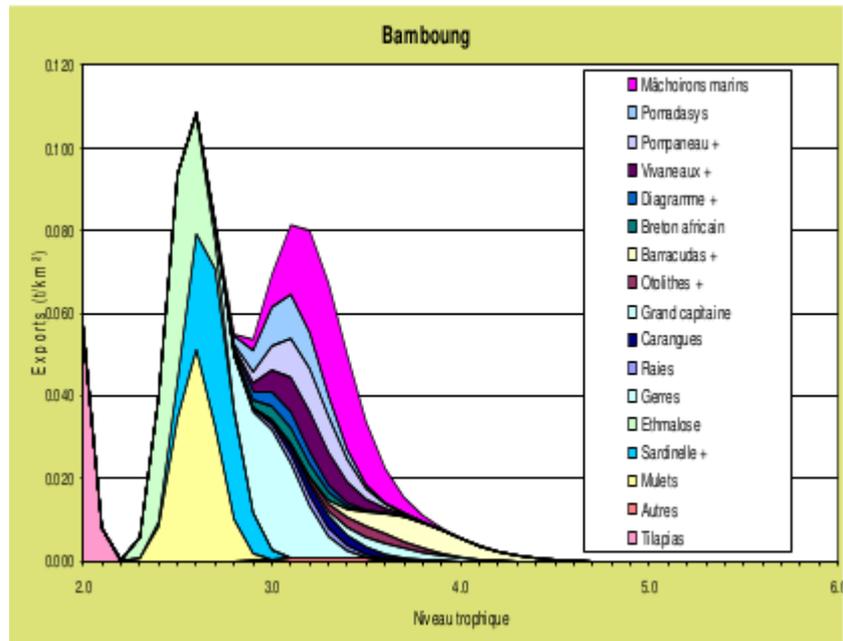


Figure 9.4 : Exports potentiels de l'AMP de Bamboung par niveau trophique, tel qu'estimés par le modèle Ecopath (Colléter et al. 2011).

Les exportations potentielles vers l'extérieur apparaissent faibles (1 t.km^{-2} par an), et du coup seraient significatives principalement au voisinage immédiat de l'AMP. Cependant même sur une AMP de petite taille comme le Bamboung, les exports potentiels seraient du même ordre de grandeur que la perte de capture, bien que ce point reste à préciser tout comme le niveau effectif des exports réalisés.

Modèle Osmose

Les résultats préliminaires obtenus (Brochier et al. 2011, 2013) montrent d'abord qu'il est possible de calibrer Osmose pour reproduire de façon très satisfaisante la distribution initiale des biomasses par groupe d'espèces, observée en 2003 lors de l'état de référence de l'AMP avant la fermeture de celle-ci (Fig. 9.5). La simulation du scénario de mise en défens de l'AMP induit une suppression de l'effort de pêche dans le bolon de Bamboung et sa redistribution dans les eaux environnantes.

Sur les 15 groupes d'espèces considérés, 9 présentent des évolutions des biomasses simulées comparables à celles observées après la mise en défens (Fig. 9.6). Pour les autres groupes, les tendances parfois inversées montrent soit qu'il existe des erreurs parmi les hypothèses de base du modèle sur les mécanismes régissant la dynamique de population de ces espèces, soit que par phénomène de cascade trophique, une mauvaise représentation de l'évolution de la biomasse des grands prédateurs a pu se répercuter sur les proies potentielles. En l'occurrence, dans ces simulations préliminaires, il apparaît que le compartiment des grands prédateurs connaît une légère diminution en biomasse après la mise en défens (Fig. 9.6) malgré une augmentation des proies potentielles, mais aussi des prédateurs.

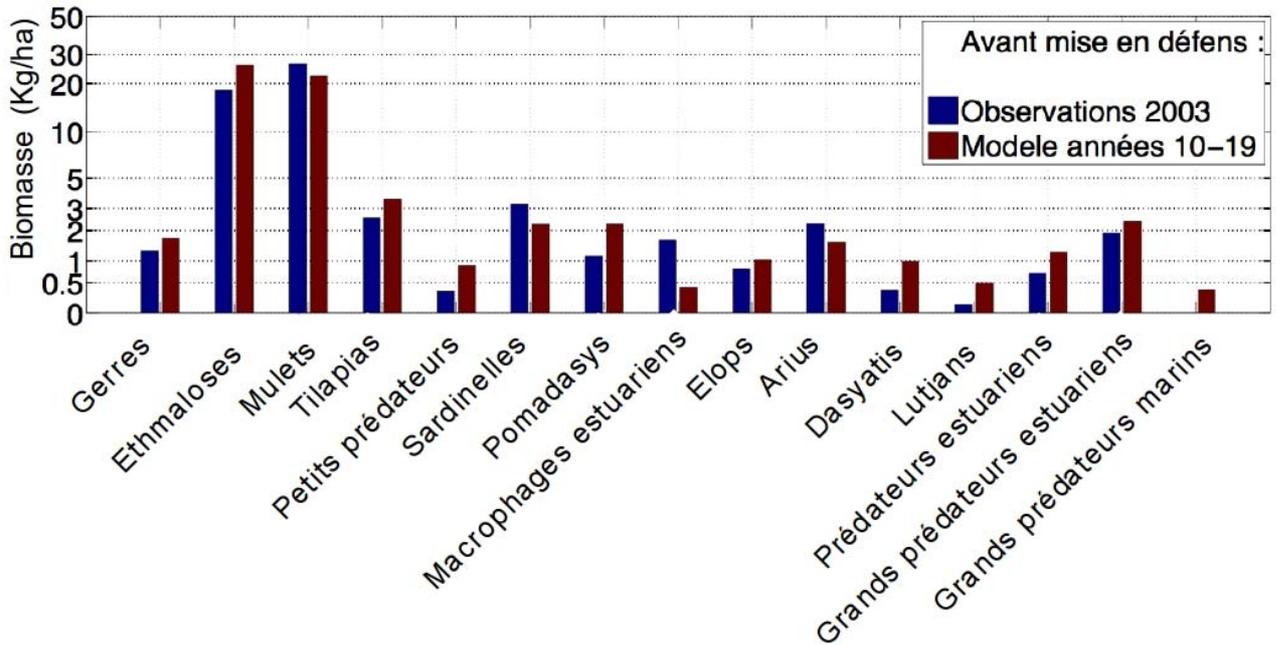


Figure 9.5 : Calibration des biomasses du modèle Osmose pour la situation pré-AMP

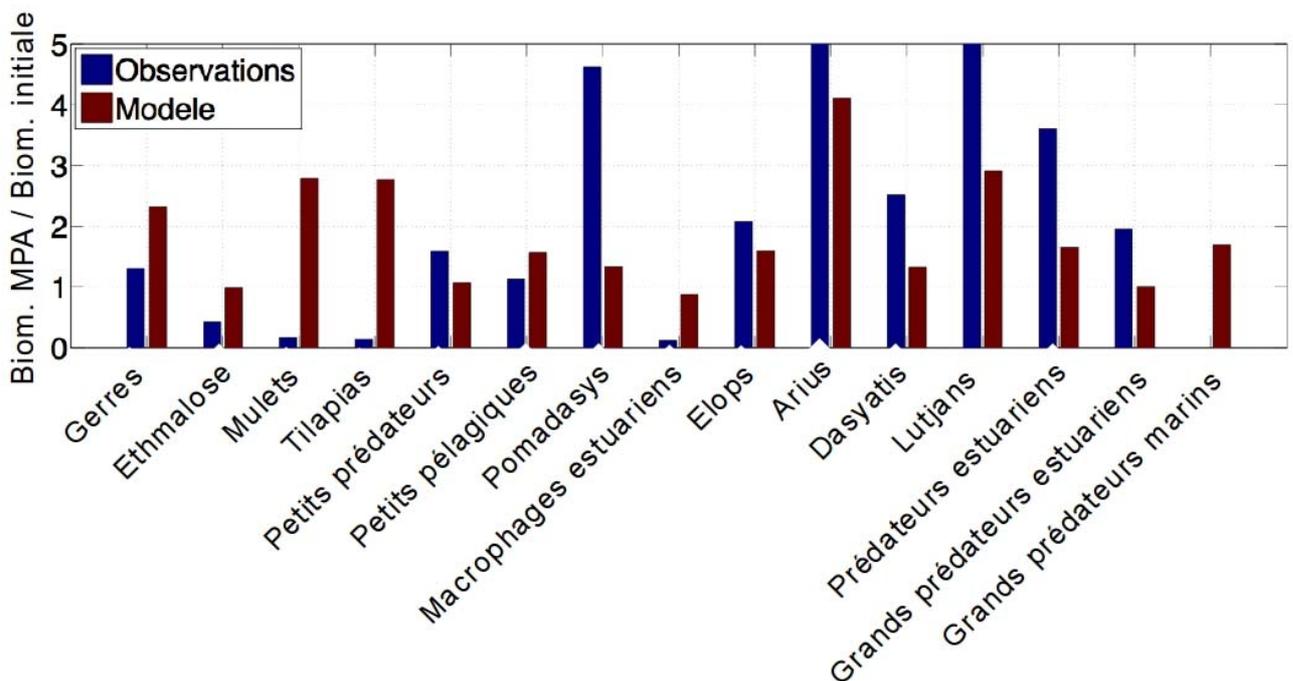


Figure 9.6 : Ratios des biomasses du modèle Osmose entre les situations pré- et post-AMP

Ces résultats sont en contradiction avec les observations empiriques qui montrent au contraire une augmentation des biomasses de grands prédateurs, ce qui remet en question les hypothèses de base régissant l'alimentation et la présence des grands prédateurs dans l'AMP. Ainsi, on pourrait par exemple tester à l'avenir une hypothèse d'attractivité de l'AMP pour les grands prédateurs pour des raisons autres que trophiques (absence de bruit, évitement des pêcheurs...).

Enfin, l'analyse de l'évolution des biomasses simulées hors de l'AMP (dans le Diomboss) ainsi que des biomasses d'individus migrants permettent d'estimer les retombées (« spillover ») de l'AMP, c'est à dire l'augmentation de biomasse qu'elle induit en dehors de ses limites. Le modèle permet non seulement de quantifier les retombées (« spillover ») par espèce et par catégorie écologique, mais aussi de les quantifier selon le mécanisme (Fig. 9.7) qui peut être soit la diffusion d'individus depuis les fortes densités de biomasses dans l'AMP vers les densités plus faibles de l'extérieur, soit la migration, saisonnière de reproduction où bien ontogénétique comme c'est le cas de certains poissons qui sortent définitivement de l'estuaire passé un certain stade de développement.

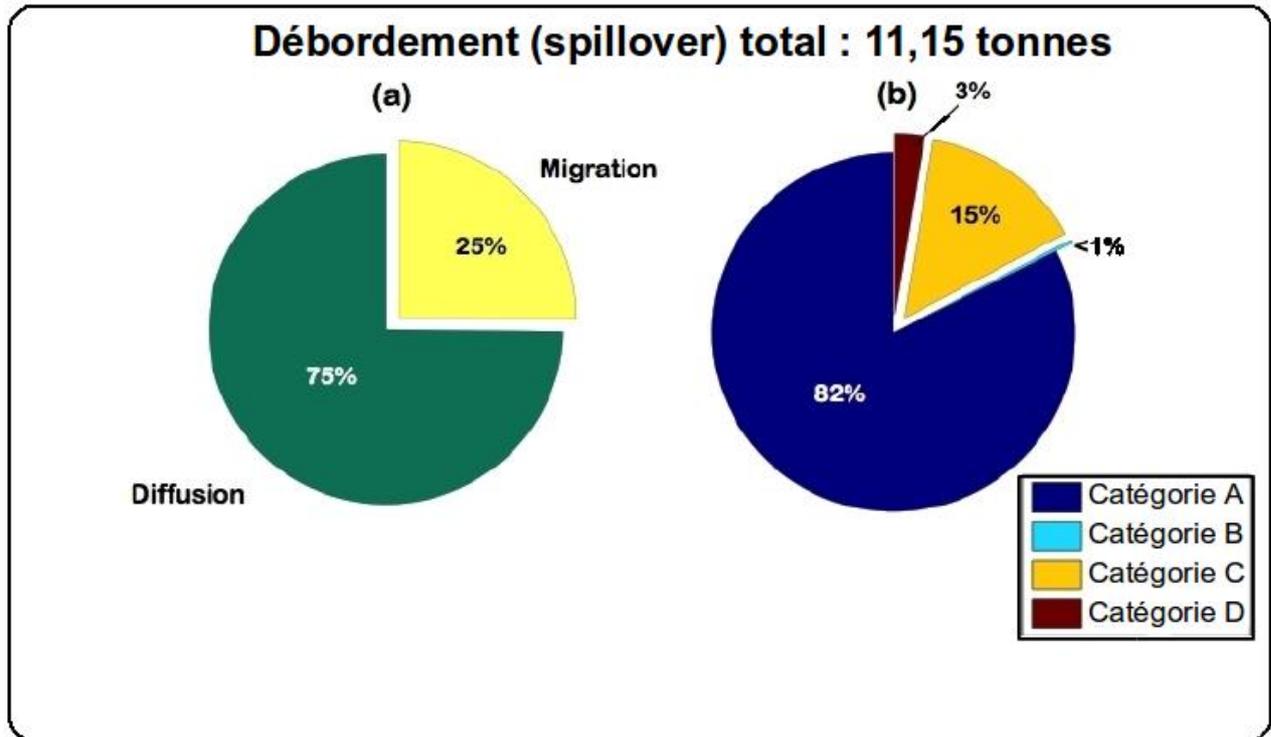


Figure 9.7 : Retombées de l'AMP ("spillover") estimées par mécanisme (graphe de gauche) ou par catégorie d'histoire de vie (graphe de droite). Catégorie A : espèces qui vivent et se reproduisent dans l'AMP; B : espèces qui ne sont présentes qu'au stade juvénile; C : espèces qui arrivent juvéniles et restent sauf pour reproduction; D : présence de courte durée à des fins trophiques.

Les résultats potentiels attendus, une fois les détails techniques restant à régler dans la configuration Osmose, sont multiples. Dans un premier temps, une calibration basée non plus seulement sur les biomasses totales mais aussi sur les spectres de taille de chaque groupe d'espèce, permettra une bien meilleure appréhension de la dynamique trophique de l'ensemble. Par ailleurs, l'implémentation d'une pêche sélective sur les grandes tailles dans Osmose, telle qu'observée dans les faits, permettra une bien meilleure simulation d'un des principaux effets observés de l'AMP qui a été la réapparition des individus de grande taille suite à la mise en défens.

A partir de là, différents scénarios de mise en défens peuvent être explorés pour analyser la réaction de la dynamique trophique à diverses mesures de gestion. Les travaux en cours comportent en particulier l'étude comparative de 3 scénarios de gestion qui sont (1) la fermeture totale de l'exploitation dans l'AMP, tant de la pêche que de la collecte de

coquillages, (2) la fermeture de la pêche tout en autorisant la collecte de coquillages et (3) l'interdiction de collecter les coquillages mais pas de limitation sur la pêche. L'analyse de ces résultats devrait permettre d'évaluer les effets relatifs de chacune des mesures testées.

Intérêt scientifique de la modélisation

Le processus de modélisation est par essence un processus interactif entre le(s) modélisateur(s) et les écologues de terrain. La construction d'un modèle comprend un très grand nombre d'allers-retours entre le terrain, le laboratoire et les salles informatiques. Les questions posées lors de la construction et la mise en place des modèles permettent de mettre en évidence des informations manquantes essentielles à la compréhension de la dynamique du système. Outre que ce processus conduit les écologues à s'interroger sur la validité et la cohérence de leurs savoirs et observations, il conduit également à une meilleure allocation des ressources vers l'acquisition des éléments de savoir les plus pertinents.

Dans le cas particulier de la modélisation d'une AMP, la calibration des modèles se fait en 2 temps : (1) simulation de l'état initial pré-AMP et (2) modélisation prospective des changements observés après mise en place de l'AMP. Cette deuxième phase permet de réduire considérablement les degrés de liberté du modèle, d'améliorer sa sensibilité générale et d'éliminer ainsi les solutions « dégénérées » (au sens mathématique du terme) du modèle. Ces dernières peuvent fonctionner pour un état statique, comme la situation initiale, mais ne permettent pas de reproduire la dynamique des changements intervenant après la mise en place de l'AMP. La confrontation des deux états pré et post AMP apporte donc des éléments nouveaux particulièrement pertinents pour la bonne compréhension du système étudié.

La réalisation de scénarios et leur analyse permet de générer, tester et éventuellement rejeter des hypothèses sur les facteurs qui contribuent à définir la distribution spatiale des poissons, comme leurs déplacements.

Ces scénarios permettent également d'inférer les impacts potentiels des acteurs humains par le biais de leurs actions directes (comme la pêche) ou indirectes (les changements climatiques ou de réglementation par exemple).

Intérêt de la modélisation pour l'étude des scénarios de gestion des AMP

Börjeson et al. (2005, 2006) distinguent trois grandes catégories d'études de scénarios fondés sur la modélisation. Leur classification est basée sur les principales questions qu'un utilisateur peut vouloir poser à propos de l'avenir : scénarios prédictifs, exploratoires et normatifs. Chaque catégorie est ensuite subdivisée en deux types de scénarios différents (Fig. 9.8).

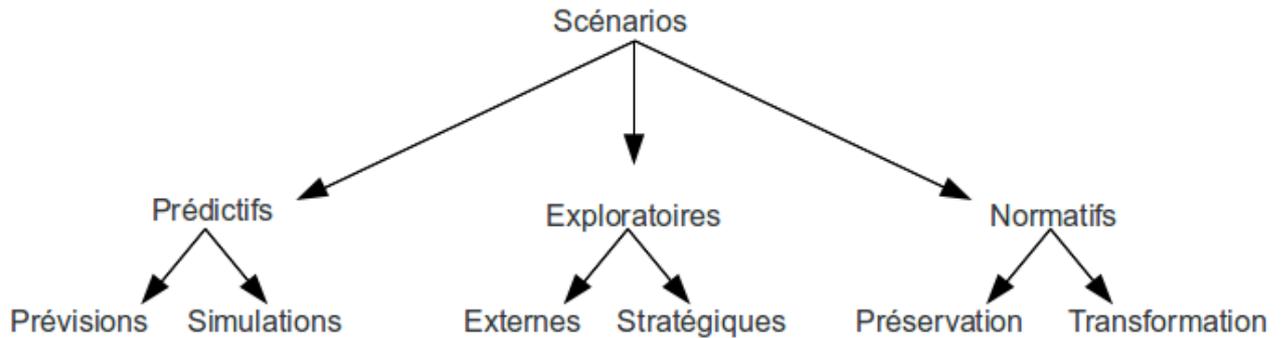


Figure 9.8 : Typologie des scénarios d'après Börjeson et al. (2006). Si l'utilisateur veut prédire l'avenir, les prévisions et les scénarios de simulation sont à privilégier. Si l'utilisateur veut penser en termes de plusieurs futurs possibles, peut-être afin d'être en mesure de s'adapter à différents types de résultats, les scénarios exploratoires peuvent être utiles. Si l'utilisateur veut rechercher des scénarios répondant à des objectifs précis, et choisir entre différentes actions qui peuvent concourir à les atteindre, les scénarios normatifs devraient être choisis.

- La première question, « *Qu'est-ce qui va se passer ?* », trouve des éléments de réponse par des scénarios prédictifs. La réponse à une question de ce type étant toujours conditionnelle, les auteurs distinguent deux types de scénarios prédictifs : les prévisions (qui cherchent à décrire ce qui est le plus probable à l'avenir) et les simulations (ou tests d'hypothèses) qui permettent de vérifier comment la modification de certains facteurs ou comportements modifieront l'avenir.
- La deuxième question, « *Qu'est-ce qui peut arriver ?* », est étudiée par les scénarios exploratoires. Les scénarios sont donc l'exploration de ce qui pourrait arriver dans l'avenir, indépendamment des croyances quant à ce qui est susceptible de se produire ou quant aux opinions sur ce qui serait souhaitable. Il n'y a pas de tests d'hypothèses. Cette catégorie est divisée en scénarios externes (dont les facteurs sont en dehors de la sphère d'influence de l'acteur) et stratégiques (qui répondent à la question « *Qu'est-ce qui peut arriver si nous agissons d'une certaine manière ?* »).
- La troisième question est « *Comment un objectif précis peut-il être atteint ?* », à cela il est répondu par les scénarios normatifs. De telles études sont explicitement normatives, car elles prennent une cible comme point de mire. Elles sont souvent orientées vers la façon dont cet objectif pourrait être atteint. Cette catégorie est subdivisée en scénarios de préservation (destinés à rechercher comment maintenir un état souhaité) et scénarios de transformation (destinés à étudier comment atteindre un état souhaité).

Ces trois approches pour les études de scénarios sont différentes. En insistant sur la perspective de l'utilisateur pour les études de scénarios, Börjeson et al. (2006) soutiennent que le choix de la catégorie de scénario n'est pas seulement une question liée à la nature du système étudié. La vision du monde de l'utilisateur, sa perception et le but assigné à l'étude peut être encore plus important pour le choix des scénarios à tester dans l'approche modélisatrice, quel que soit le modèle de base.

Les deux modèles développés sur le Bamboung, permettront aux utilisateurs de s'interroger sur ces différentes approches et de définir leurs propres scénarios en fonction des objectifs qu'ils se fixeront. Par ailleurs, bien que cela n'ait pas été fait jusqu'ici, les savoirs écologiques locaux pourront être recueillis et intégrés dans les études de scénarios qui seront mises en

place avec les acteurs. Sur la base d'interactions similaires à celles entre écologues et modélisateurs qui ont présidé à la conception des modèles, les savoirs traditionnels pourront aider à combler les lacunes des connaissances académiques (comme par exemple la connaissance des saisons et des lieux de pontes). Les modèles développés ici devaient également permettre facilement une incorporation d'éléments économiques destinés à évaluer les impacts économiques de l'AMP sur l'exploitation des ressources halieutiques (mais pas des autres composantes socio-économiques). Enfin, l'utilisation et l'échange autour des modèles et des scénarios permettra du même coup d'impliquer les populations locales dans l'étude de l'AMP (sensibilisation et responsabilisation).

Ce qu'il faut retenir :

Le principal intérêt de la modélisation est la modélisation (Grimm 1999). Ce qui ressemble à une tautologie recouvre dans les faits un grand nombre d'attendus extrêmement intéressants en termes d'aménagement et de gestion des écosystèmes et de leurs ressources, ainsi que détaillé ci-dessus dans le cadre des études de scénarios. La réalisation de modèles relatifs à la mise en place d'AMP apporte ainsi :

- **Un outil de test de la cohérence des données empiriques récoltées sur le terrain ;**
- **Un outil permettant d'identifier les lacunes des connaissances sur le système étudié, permettant de mieux cibler la récolte de données nécessaires à sa bonne compréhension ;**
- **Un outil permettant une bonne représentation du système étudié avant la mise en place de l'AMP, et son évolution récente ;**
- **Un outil permettant des tester des scénarios sur les évolutions futures du système et les différentes alternatives de gestion ;**
- **Un cadre d'échanges entre les modélisateurs, chercheurs et acteurs du développement (populations, officiels, ONG) ;**
- **Un outil pédagogique permettant de faciliter la compréhension des enjeux autour de la protection de l'environnement et sa relation avec l'exploitation des ressources halieutiques.**

La réalisation de modèles de type Ecopath et Osmose (ce dernier étant cependant plus coûteux à tous les égards), apportent un surcoût limité par rapport aux coûts des activités d'échantillonnage de terrain qui restent la base nécessaire de toute évaluation sérieuse des AMP. En tant que complément aux systèmes de suivi, leur réalisation et utilisation devrait être systématiquement envisagée.



L'Aire Marine Protégée communautaire de Bamboung (Sine Saloum) : Synthèse 2003 – 2011

Ecoutin J.M. (éditeur scientifique)

avec la collaboration de :

**Béhagle N., Brochier T., Guillard J., Laë R.,
Lebourges Dhaussy A., Le Loc'h F., Raffray J., Sadio O.,
Simier M., Sow I., Tito de Morais L.**



Dakar, juin 2013

Plan de la synthèse

Introduction	1
L’Aire Marine Protégée communautaire de Bamboung : histoire, localisation et protocole de collecte de données ECOUTIN Jean Marc, SOW Ibrahima et SIMIER Monique	5
L’environnement hydroclimatique de l’Aire Marine Protégée de Bamboung de 2003 à 2011 SIMIER Monique	19
Inventaire faunistique de l’Aire Marine Protégée de Bamboung : guildes fonctionnelles (écologique et trophique) SIMIER Monique	27
Le peuplement de référence avant la mise en défens, comparaison avec les peuplements de sites proches ECOUTIN Jean Marc, SADIO Oumar et SIMIER Monique	35
Les grands traits évolutifs du peuplement de poissons de 2003 à 2011 ECOUTIN Jean Marc, SIMIER Monique et SADIO Oumar	49
Comparaison du peuplement de poissons de Bamboung avec celui d’un site autorisé à l’exploitation halieutique, le bolon de Sangako SADIO Oumar et ECOUTIN Jean Marc	77
Evolution saisonnière du peuplement de poissons dans l’Aire Marine Protégée communautaire de Bamboung LAË Raymond, ECOUTIN Jean Marc et SIMIER Monique	99
Les réseaux trophiques de l’Aire Marine Protégée de Bamboung LE LOC’H François	109
Modélisation du fonctionnement trophique ou écosystémique TITO de MORAIS Luis, LE LOC’H François et BROCHIER Timothée	119
L’acoustique comme outil d’échantillonnage des peuplements de poissons BEHAGLE Nolwenn, GUILLARD Jean, SOW Ibrahima et LEBOURGES-DHAUSSY Anne	133
L’Aire Marine Protégée de Bamboung, un impact sur le peuplement de poissons ?	145
Références bibliographiques	149