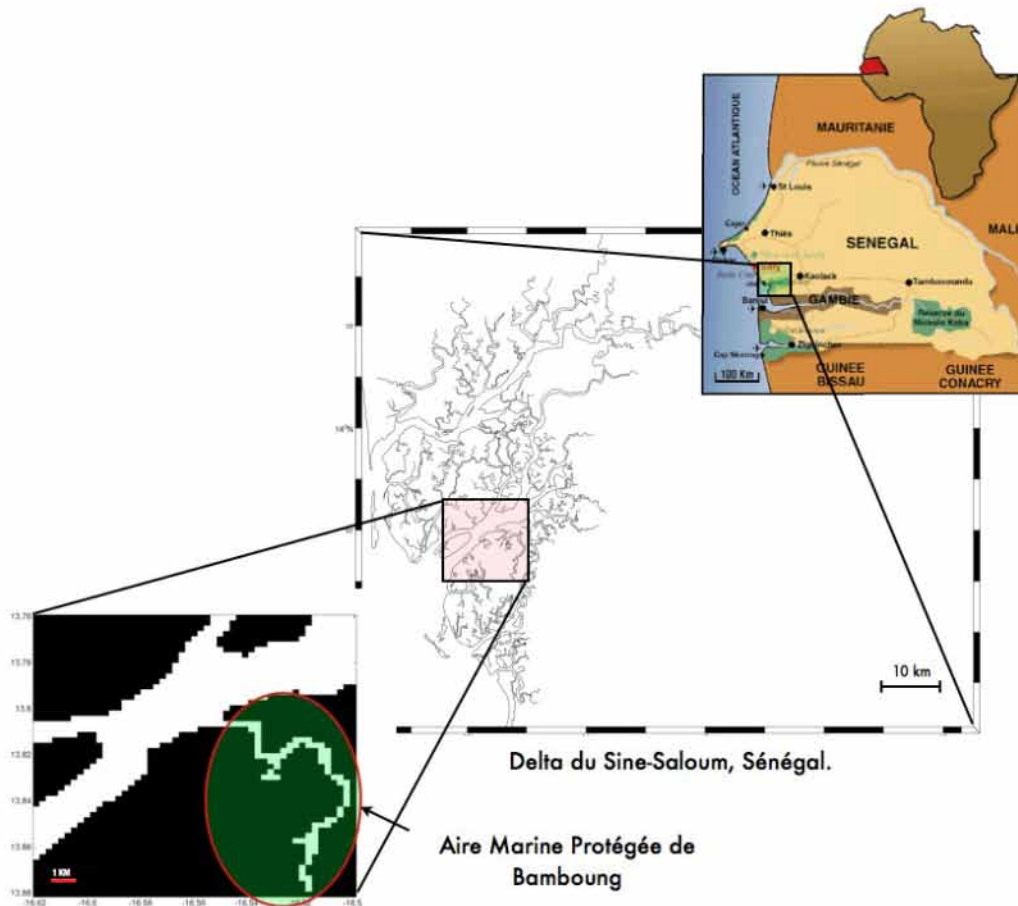


Manuel de « Osmose BBG »

Synthèse d'une approche de modélisation multi-agent pour étudier la dynamique de population dans l'Aire Marine Protégée de Bamboung, Sénégal



Décembre 2011

Timothée Brochier
Jean-Marc Ecoutin
Luis Tito de Morais
Raymond Laë

1- Introduction

Le présent manuel rassemble les spécificité de la configuration Osmose BBG, une adaptation du modèle individu centré (ou multi-agent) OSMOSE (Shin et Cury, 2001). Pour le détails du fonctionnement d'OSMOSE, ainsi que sur la marche à suivre pour installer et faire tourner le modèle (créer les fichier d'entrée, générer les sorties, etc...) l'utilisateur est renvoyé à l'excellente présentation-notice du Workshop OSMOSE ayant eu lieu au CRH de Sète les 14 et 15 Mai 2009, disponible sur demande. Ce travail a été réalisé en équipe malgré la distance séparant les co-auteurs, grâce à des visio conférences hebdomadaires entre Dakar, Brest, puis Casablanca et parfois Sète sur toute la période de novembre 2010 à décembre 2011.

1-1) Choix d'un modèle individu basé : osmose

Pour la modélisation multi-agent de l'assemblage d'espèces présent dans le bolon de Bamboung, nous avons choisi de réaliser une adaptation de OSMOSE, un modèle de flux d'énergie à travers un écosystème structuré en taille. Les adaptation au cas du bolon 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.

1-2) Sélection des modèles espèces

Par mesure de simplification, nous avons regroupé la quarantaine d'espèces présentes dans le bolon en 15 modèles, ou groupe d'espèces représentant 97% de la biomasse. Ces groupes d'espèces constituent en fait des "méta-comunauté", c'est un groupement d'espèces qui partagent des caractères fonctionnels communs concernant (1) leur catégorie trophique; et (2) leur catégorie écologique. Idéalement, ces méta-comunauté devraient également partager des caractères morphologiques tels que la courbe de croissance moyenne, la gamme de taille des proies, le rapport taille-poids et le rapport hauteur sur longueur du corps, ainsi que la fécondité relative. Toutefois, en première approximation nous avons définis des méta-comunauté partageant les points (1) et (2), en choisissant une espèce type parmi celles regroupée pour en tirer les autres caractéristiques. On a donc définis quatre catégories d'histoire de vie, et pour trois d'entres elles Osmose a été modifié afin de pouvoir prendre en compte des paramètres autre que la fécondité et saisonnalité de reproduction (Tableau 1 bis).

Tableau 1 : Sélection des modèles espèces. Occurrence : occurrence relative de la présence d'une espèce du modèle dans un coup de pêche. Intra AMP correspond aux stations BBG01 à BBG10. Le tableau reprend l'information des campagnes 4 (03-2004) à 22 (03-2010).

Modèle	Espèce type	Espèces associées	Catégorie écologique	Catégorie trophique	Occurrence (%)	Rendement (gr/coup)
					Intra	intra
Arius	AGA	ARP AHE	ME	p2-ge	48	8951
Pomadasys	PJU	PPE TFA PIN	Em	p1-bt	46	1311
Gerres	GNI	GME	<i>Es</i>	p1-mc	76	418
Sardinelle	SEB	IAF SAU	ME	p1-zo	51	916
Ethmalose	EFI		Em	he-ph	30	1915
Mulet	LFA	LDU MCU MBA LGR MCE	Em-ME	he-de	35	1124
Elops	ELA	ELS	ME	p2-pi	20	412
Dasyatis	DAM	DMA	Em	p1-bt	23	222
Mérou	LGO	EAE LUD	Ma	p2-pi	30	694
Tilapia	THE	TGU	<i>Es</i>	<i>he-ph</i>	11	89
Grands prédateurs	POQ	SPI SGU TLE	ME	p2-pi	15	916
Requins	CLC		Mo	p2-pi	1	226
Prédateurs estuariens	GDE	PLM PBR PEL PTY	ME-Em	p2-ge	33	626
Macrophages Estuarien	CHL	BAU DAF VSE	ME	p1-mc	11	48
Petits prédateurs	PSB	CST	Em	p2-ge	31	135
Somme		44				18003
Total	15	78			153	19089

Notes :

- Proposition modèle PJU devient PPE plus abondant en Saloum et à BBG
- Le modèle requins pourra aussi intégrer les dauphins
- 2 coups n'ont pas été réalisés d'où 153 coups au lieu de 155.

Tableau 1 bis : Classement par « catégories modèle » des groupe ou méta-espèces, selon leurs écophases présentes dans le bolon de Bamboung. (en souligné le paramètre utilisé pour la calibration, voir section 3)

Modèle	Espèce type	Espèces associées	Catégorie écologique	Catégorie trophique	Catégorie modèle
Gerres	GNI	GME	<i>Es</i>	p1-mc	A (vivent et se reproduisent dans l'AMP) Param : Fécondité relative, age de maturation, saisonnalité de reproduction, <u>mortalité larvaire</u>
Mulet	LFA	LDU MCU MBA LGR MCE	Em-ME	he-de	
Tilapia	THE	TGU	<i>Es</i>	<i>he-ph</i>	
Petits prédateurs	PSB	CST	Em	p2-ge	
Ethmalose	EFI		Em	he-ph	
Sardinelle	SEB	IAF SAU	ME	p1-zo	B (ne sont présents qu'au stade juvénile) Param : Taille des individus entrants, taille des individus sortants, saisonnalité de présence, <u>flux de juvénile entrant</u>
Pomadasy	PJU	PPE TFA PIN	Em	p1-bt	
Elops	ELA	ELS	ME	p2-pi	
Macrophages Estuariens	CHL	BAU DAF VSE	ME	p1-mc	C (arrivent juvénile et restent sauf pour reproduction) Param : Taille des individus entrants, taille de maturation, saisonnalité de reproduction, <u>flux de juvénile entrant</u>
Dasyatis	DAM	DMA	Em	p1-bt	
Mérou	LGO	EAE LUD	Ma	p2-pi	
Machoiiron (Arius)	AGA	ARP AHE	ME	p2-ge	
Prédateurs estuariens	GDE	PLM PBR PEL PTY	ME-Em	p2-ge	
Requins	CLC	(Dauphins)	Mo	p2-pi	D (présence de courte durée à des fins trophiques) Taille min et max des individus présents, <u>abondance par banc, biomasse de proie minimale</u>
Grands prédateurs	POQ	SPI SGU TLE	ME	p2-pi	

2 - Paramétrisation

2-1) Caractères "internes" des individus

a) Croissance

- Von Bertalanffy et Allométrie

Le tableaux 2 renseigne sur les paramètres de croissance et d'allométrie de chaque espèce type, voir des espèces associées dans certains cas. De plus, le rapport hauteur/longueur du corps a été calculé d'après des photos ou bien les dessins de la FAO (voir annexe).

Surligné jaune, relation retenue standardisée en LF, cm, an. Le tableau 3 montre le calcul de la longévité (age à 95% de Linf), et de l'age à la longueur maximale observée dans le bolon, plus 10%. Pour les méta-espèces de catégorie C, l'âge à la LMO + 10% est considéré comme l'âge au-delà duquel les individus quittent le bolon définitivement pour aller s'établir en mer.

Tableau 2 : Paramètres de croissance de von Bertalanffy, de relation taille-poids (c et b) et de rapport hauteur/longueur du corps (H/L)

Modèle	Espèce type	K	Linf	t ₀	c (10 ⁻⁵)	b	H/L	Comment
Arius	AGA	0,154 k1	65	-0,31	1,11	3,028	0.2263	
	AHE	0,138 k2	72,6	-0,355 k2				
	ARP	0,154 k2	65,4	-0,368 k2				
	AGA	0,124 k2	75,8	-0,373 k2				
		0,19 t	65,2	-1,026				
Pomadasys	PJU	0,3 a1, b 0,3 0,21 t	45 36,45 54,5	-1,157	4,42	2,798	0.3211	
Gerres	GNI	1,8 m 0,6 q	27 30		2,07	3,004	0.3586	Ttes data
Sardinelle	SEB	0,3 a2	37,5		1,89	2,946	0.269	Samb (1988)
	SAU	0,6 a1 0,6	32,5 b 26,5					
		1,206 n	30,63	-0,062				
Ethmalose	EFI	0,0797 d 0,46 f	24,48 27,0	-0,169 0,20	0,79	3,162	0.3596	
Mulet	LFA	0,6 o	39,2	0	0,61	3,119	0.2175	
Elops	ELA	0,03 c	65,34	-0,57	1,18	2,943	0.18	
		0,1178 g	85					
		0,36	65,34	-0,0475				
Dasyatis	DAM				16,83	2,748	0.08	Largeur du disque
Mérrou	LGO	0,17	109	0,08	2,95	2,883	0.33	Ttes data
		0,171 s	144	-0,08				
Tilapia	THE	0,44 g 0,22 i	32,6 24,4	-0,21 -1,37	5,64	2,817	0.3527	
Grands prédateurs	POQ	0,340 p 0,34	98,7 105	-0,4 -0,4	0,77	3,093	0.237	Ttes data
Requins	CLC	0,071 h 0,071	230 236	-5,12 -5,12			0.19	
Prédateurs estuariens	GDE	0,41 a2b	54,5		0,88	3,152	0.3	
		0,013 l	47	-19,56				
		0,156 0,25 t	47 43,2	-1,63 -0,742				
Macrophage Estuarien	CHL	0,56 ab 0,56	33,6 29,6		0,89	3,102	0.4239	
Petits prédateurs	PSB	0,42 ar	19,62		10,14	2,759	01/01/25	

ATTENTION

- Les relations L/P (Lf en mm et P en gr) d'après Ecoutin Albaret 2003 sauf indications contraires
- Les relations de croissance validées sont elles en cm, année
- Changement PJU en PPE, mais croissance PJU car PPE ? En fait on va l'appeler POM et utiliser PJU pour certaines relations et PPE pour les données de terrain.

a : Données Fishbase a&, sans référence a2, revoie à une référence

b : Données en Longueur totale (LT)

c : Hie Dare 1982 (Lf en cm) modèle en mois

d gerlotto 1976 (Lf en cm, en mois)

f Panfili MEPS 2004 Lf mm année saloum <60 psu, mais LMO > Linf

g : Laë (1997) Togo Attention *S. melanotheron* croissance très forte stress
 Voir aussi Coutin et Payne (1989) pour VB (Sierra Leone)
 h : Linf (precaudal length) en cm (Wintner et al., 2002), South Africa
 i Panfili ALR 2004 LF, mm, année Saloum <60 psu croissance très faible
 k1 et k2, 2 articles sur Arius Guinée Camara et al 1992 et Conand et al 1995 ; les résultats pour les 3 espèces sont légèrement différents alors qu'il s'agit des mêmes auteurs. Age max 20 à 30 ans (mortalité faible)
 l, Fontana 1981 thèse, croissance moitié plus lente que Fishbase
 m, Madagascar soit 22cm en un an
 n Fréon 1986 et Thèse Fréon SEB 18cm Lf à 1 an, la courbe SAU est trop forte, celle retenue un peu lente
 o MCU 43,2 TL, 0,6 croissance rapide, LGR 55,2 TL, 0,186 très lent d'après FishBase
 p Moreau et al. Iclarm 45 (LS, cm, an)
 q *G. cinereus* (Caraïbes) en Lf, cm, an
 r, relation *Citharichtys spilorpterus* (caraïbes), croissance un peu trop lente
 s, relation EAE pour le Sénégal modèle non retenue Cury et Worms 1982, modèle retenue Laurans 2005
 t, thèse Sidibe sur la communauté à scianidés ; tous Lf, an (vérifié), méthode Elephant1.

Pour âge maximal voir Hoenig (1983) et Longhurst (2002)
 EFI : 40 mois (Ama-Abasi et al., 2004) (Cross river estuary)

Tableau 3 : Paramètres de croissance de von Bertalanffy, longévité (age à 95% de Linf) et age à LMO + 10%.

Modèle	Espèce type	K	Linf	t ₀	REF	LMO (cm)	LONGEVITE (95% Linf)	Age à LMO+10%)
Arius	AGA	0,154	65	-0,31	Tableau 2	61,4	19,1	LMO+10% > Linf
Pomadasys	PJU	0,3	45	0	Tableau 2	40	10,0	12,7
Gerres	GNI	0,6	30	0	Tableau 2	21,9	5,0	2,7
Sardinelle	SEB	0,6	26,5	0	Tableau 2	22	5,0	4,1
Ethmalose	EFI	0,46	27	0,2	Tableau 2	23,6	6,7	7,3
Mulet	LFA	0,6	39,2	0	Tableau 2	32,7	5,0	4,2
Elops	ELA	0,36	65,34	-0,0475	Tableau 2	52,5	8,3	5,9
Dasyatis	DAM	0,089	121,5	-1,615	Ali, 2003 : (Dasyatis pastinaca)	63,5	32,0	8,0
Mérou	LGO	0,19	82,6	-0,67	Fishbase	59	15,1	7,4
Tilapia	THE	0,44	32,6	-0,21	Tableau 2	23,1	6,6	3,2
Grands prédateurs	POQ	0,34	105	-0,4	Tableau 2	91	8,4	8,6
Requins	CLC	0,071	236	-5,12	Tableau 2	137	37,1	9,2
Prédateurs estuariens	GDE	0,25	43,2	-0,742	Thèse de Sidibé	24,5	11,2	9,7
Macrophages estuariens	CHL	0,56	29,6	0	Tableau 2	15	5,3	1,5
Petits prédateurs	PSB	0,42	19,62	0	Tableau 2	16,3	7,1	5,8

c) Fécondité et reproduction

Pour les espèces de la catégorie A, qui se reproduisent sur place, nous devons entrer dans Osmose un taux de fécondité, un sex ratio et une saisonnalité de la ponte. En fait ces données doivent être renseigné pour toutes les méta-espèces modélisées, cependant elles ne seront pas du tout utilisé pour les autres catégories, la reproduction n'étant pas simulée.

En l'absence de donnée de fécondité relatives pour certaines espèces, nous somme partis des observations *in situ* de diamètre ovocytaire. En considérant une densité de 1,0287 g.cm⁻² (eau de mer), et en posant l'hypothèse d'un rapport gonado somatique (RGS) constant de 4%, on obtient la fécondité relative (nombre d'oeuf par gramme de femelle ; tableau 4). Le tableau 5 donne la saisonnalité de ponte pour chaque espèce type de la catégorie A.

Tableau 4 : Diamètres ovocytaires, fécondité relative correspondante pour un RGS de 4%, fécondité relative issue de la littérature ou estimée et sex ratio.

	Diamètre œuf (mm)	Fécondité relative calculée pour avoir un RGS = 4% (Nb œuf par gramme)	Fécondité relative littérature (*) ou estimations équipe (**)	Sex ratio (M/M+F)
Gerres (GNI)	0,4	1160,4	7272 (* Sri Lanka 2008 G. abbreviatus)	47%
Ethmalose (EFI)	0,6	343,8	300 (compilation JJA 1994, ECD-JJA 2003)	50%
Mulet (LFA)	0,5	594,1	1300 (**)	42%
Tilapia (THE)	2,6	4,2	4,58 (*panfili et al 2004)	50%
Petits Prédateurs (PSB)	0,67	246,9	1000 (**)	66%

Tableau 5 : Saisonnalité de la ponte.

	Distribution de la ponte sur l'année en % sur chaque mois de l'année (format des input : chaque nombre est précédé et suivi d'un point-virgule)
Gerres (GNI)	;12.5;;12.5;;12.5;;12.5;;12.5;;2.5;;2.5;;12.5;;2.5;;2.5;;2.5;;12.5;
Ethmalose (EFI)	;12.5;;12.5;;12.5;;12.5;;12.5;;0;;0;;0;;12.5;;12.5;;12.5;
Mulet (LFA)	;7;;7;;7;;7;;11;;15;;11;;7;;7;;7;;7;
Tilapia (THE)	;8.3;;8.3;;8.3;;8.3;;8.3;;8.3;;8.3;;8.3;;8.3;;8.3;;8.7;
Petits Prédateurs (PSB)	;4;;4;;4;;22;;22;;4;;4;;4;;4;;20;;4;;4;

2-3) – Prédation

a) Rapports de taille prédateur-proie

Pour chaque espèce, la gamme des proies potentielles est définie par quatre facteurs :

- 1) La gamme des rapport de taille prédateur/proie, qui donne pour chaque individu, en fonction de sa taille, une gamme de la taille de ses proies;
- 2) La coexistence effective dans une maille de la grille du modèle;
- 3) La concordance spatiale à l'intérieure de chaque maille, en fonction du type d'habitat de chaque poisson;
- 4) Les défenses naturelles contre la prédation

Le premier point est déjà explicitement défini par dans osmose, qui est structuré en taille, par des rapports de longueur entre prédateurs et proie. Par ailleurs, nous avons ajouté un rapport max de hauteur afin de pallier à des incohérences de prédation basée uniquement sur des rapport de longueur pour certaines espèces de morphologie originales, comme les Elops (très allongés) ou les *Monodactylus Sebae* (très hauts) (Tableau 6).

Tableau 6 : Coefficients permettant de déterminer la hauteur du corps pour les espèces types considérées, et les rapport de taille (longueur et hauteur) pour définir le spectre de tailles des proies concernées.

Groupe	Espece type	Catégorie Trophique	Rapport Hauteur/Longueur du corps	Rapport min Longueur prédateur/proie	Rapport max Longueur prédateur/proie	Rapport min Hauteur prédateur/proie
Ethmalose	EFI	he-ph	0,36	999999	100	100
Tilapia	THE		0,35	999999	100	100
Mulet	LFA	he-de	0,22	999999	15	15
Gerres	GNI	p1-mc	0,36	100	10	10
Macrophages Estuariens	CHL		0,4239	100	10	10
Dasyatis	DAM	p1-bt	0,08	100	5	1
Pomadasys	PJU		0,32	100	5	4
Sardinelle	SEB	p1-zo	0,27	1000	10	10
Requins	CLC	p2-pi	0,19	8	3	2
Elops	ELA		0,18	10	3	2
Grands prédateurs	POQ		0,24	8	3	3
Prédateurs estuariens	GDE		0,3	10	3	3
Mérou<300mm	LGO		0,33	200	3	3
Mérou>300mm	LGO		0,33	10	3	3
Arius	AGA	p2-ge	0,23	10	3	3
Petits prédateurs	PSB		1,25	12	3	5

b) Définition des habitats-types :

Nous avons classé les habitats des espèces types en trois classes (Tableau 7) :

1) **Mangrove** : par ce terme nous désignerons à la fois le plan d'eau dans lequel baignent les racines des palétuviers et la bordure du plan d'eau, de profondeur inférieure à 50cm.

2) **Pleine eau surface** : jusqu'à 2/3 de la colonne d'eau dans les zones peu profonde habitat des poissons pélagique

3) **Pleine eau fond** : habitat des poissons se nourrissant sur le substrat benthique.

Tableau 7 : Habitats par groupe d'espèces	
Nom du modèle	Habitat
Tilapia	Mangrove
Petits prédateurs	
Ethmalose	Pleine eau surface
Sardinelle	
Pomadasys	Pleine eau fond
Dasyatis	
Gerres	Mangrove ET Pleine eau fond
Macrophage Estuariens	Pleine eau surface ET Pleine eau fond
Mérou >300mm	
Prédateurs Estuariens	
Grands prédateurs > 300mm	
Requins	Partout
Mulet	
Elops	
Arius < 300mm	
Arius > 300mm	
Mérou < 300mm	
Grands prédateurs < 300mm	

En mangrove, nous nous sommes basé sur les travaux de Vidy et al. (2004) pour définir les tailles maximales observées de certaines espèces. Pour des raisons techniques il était préférable de fixer une même taille limite pour toutes les espèces, ce qui s'est avéré possible au vu des TMO des espèces concernées. La taille de 30cm c'est trouvé correspondre, (à + ou -15%) aux TMO en mangrove des espèces ayant une écophase juvénile en mangrove et une écophase adulte en pleine eau.

c) Définition des taux de rencontre entre espèces :

Le tableau 8 définit, arbitrairement, un coefficient de recouvrement des habitats de deux espèces X et Y en fonction de leur habitat respectifs. Le tableau 9 reporte ces coefficients de recouvrement d'habitat pour chaque espèce type en fonction de son habitat.

NB : les tableaux 8 et 9 sont des matrices triangulaires (symétriques par rapport à leurs diagonales).

	Habitat espèce X						
		Mangrove	Pleine eau surface	Pleine eau fond	Partout	Mangrove ET Pleine eau fond	Pleine eau surface ET Pleine eau fond
Habitat espèce Y	Mangrove	100%	5%	5%	33%	50%	10%
	Pleine eau surface	5%	100%	20%	33%	10%	60%
	Pleine eau fond	5%	20%	100%	33%	50%	60%
	Partout	33%	33%	33%	100%	66%	70%
	Mangrove ET Pleine eau fond	50%	10%	50%	66%	100%	50%
	Pleine eau surface ET Pleine eau fond	10%	60%	60%	70%	50%	100%

Tableau 9 : Coefficients de probabilité de rencontre des espèces en terme de recouvrement des habitats, pour chaque groupe d'espèce (la prédation est par ailleurs limitée par le rapport de taille, et par les coefficients de défenses (voir tableau X)).

	Tilapia	Petits prédateurs	Ethmalose	Sardinelle	Pomadasys	Dasyatis	Gerres	Macrophage Estuariens	Mérou >300 mm	Prédateurs Estuariens	Grands prédateurs >300mm	Requins	Mulet	Elops	Arius	Mérou <300mm	Grands prédateurs <300mm
Tilapia	100%	100%	5%	5%	5%	5%	50%	10%	10%	10%	10%	10%	33%	33%	33%	33%	33%
Petits prédateurs	100%	100%	5%	5%	5%	5%	50%	10%	10%	10%	10%	10%	33%	33%	33%	33%	33%
Ethmalose	5%	5%	100%	100%	20%	20%	10%	60%	60%	60%	60%	60%	33%	33%	33%	33%	33%
Sardinelle	5%	5%	100%	100%	20%	20%	10%	60%	60%	60%	60%	60%	33%	33%	33%	33%	33%
Pomadasys	5%	5%	20%	20%	100%	100%	50%	60%	60%	60%	60%	60%	33%	33%	33%	33%	33%
Dasyatis	5%	5%	20%	20%	100%	100%	50%	60%	60%	60%	60%	60%	33%	33%	33%	33%	33%
Gerres	50%	50%	10%	10%	50%	50%	100%	50%	50%	50%	50%	50%	66%	66%	66%	66%	66%
Macrophage Estuariens	10%	10%	60%	60%	60%	60%	50%	100%	100%	100%	100%	100%	70%	70%	70%	70%	70%
Mérou >300mm	10%	10%	60%	60%	60%	60%	50%	100%	100%	100%	100%	100%	70%	70%	70%	70%	70%
Prédateurs Estuariens	10%	10%	60%	60%	60%	60%	50%	100%	100%	100%	100%	100%	70%	70%	70%	70%	70%
Grands prédateurs >300mm	100%	100%	60%	60%	60%	60%	50%	100%	100%	100%	100%	100%	70%	70%	70%	70%	70%
Requins	100%	100%	60%	60%	60%	60%	50%	100%	100%	100%	100%	100%	70%	70%	70%	70%	70%
Mulet	33%	33%	33%	33%	33%	33%	66%	70%	70%	70%	70%	70%	70%	100%	100%	100%	100%
Elops	33%	33%	33%	33%	33%	33%	66%	70%	70%	70%	70%	70%	70%	100%	100%	100%	100%
Arius	33%	33%	33%	33%	33%	33%	66%	70%	70%	70%	70%	70%	70%	100%	100%	100%	100%
Mérou <300 mm	33%	33%	33%	33%	33%	33%	66%	70%	70%	70%	70%	70%	70%	100%	100%	100%	100%
Grands prédateurs <300mm	33%	33%	33%	33%	33%	33%	66%	70%	70%	70%	70%	70%	70%	100%	100%	100%	100%

c) Hypothèse sur les défenses et accessibilité :

Au delà des limitations de la prédation par le spectre de taille potentiels des proie et par la probabilité de rencontre, certains poissons possèdent des défenses naturelles sur leurs corps. C'est en particulier le cas de l'Arius avec ses épines dorsales et latérales. Pour l'instant, nous n'avons appliqué ce facteur limitant que pour l'arius, en le rendant totalement inaccessible à l'ensemble des autres espèces (accessibilité = 0) excepté les requins (accessibilité = 0,2)

d) Préférendum alimentaires :

Pour des raison de préférendum alimentaire qui aboutissent à une exclusions de certaines proies potentielles, nous avons forcé ces exclusions d'après (1) avis d'équipe et (2) les régimes définit par Villanueva et al., 2006 (Tableau 10).

Tableau 10 : Préférendum alimentaires. 0 = ne consomme pas du tout ; 1 = accède à tout ce qui est disponible, dans la gamme de longueur des proies potentielles.

	MACRO- BENTHOS	MEIO- BENTHOS	MICRO- BENTOS	CREVETTE	PHYTO	ZOO	Divers
Arius	1	1	1	1	1	1	ACCESSIBLE SEULEMENT AUX REQUINS
Pomadasys	1	1	1	1	0	0	
Gerres	1	1	1	0	1	1	
Sardinelle	0	0	0	0	1	1	
Ethmalose	0	0	0	0	1	1	
Mulet	1	1	1	0	1	1	
Elops	0	0	0	1	0	0	
Dasyatis	1	1	1	1	0	0	Pas de poissons pelagiques (Sardinelle, Ethmalose, Elops, Grand prédateur, Rquins, petits prédateurs) Smith et Merriner - 1985 - Food Habits and Feeding Behavior of the Cownose Ra
Merou	0	0	0	0	0	0	
Tilapia	1	1	1	0	1	1	Pas de poisson
Grd Prédateur	0	0	0	0	0	0	
Requins	1	0	0	0,5	0	0	
Prédateurs	0	0	0	1	0	0	
Estuariens	0	0	0	1	0	0	
Macrophage	1	1	1	1	1	1	
Estuarien	1	1	1	1	1	1	Pas de poisson
PetitsPrédateurs	0	0	0	1	0	0	

d) Autres Paramètres de prédation :

Predation rate : c'est le facteur déterminant la quantité de nourriture à ingérer par ans : en standart fixé à 3.5 pour toutes les espèces. $\text{biomass_to_predate} = \text{mon_poids} * \text{Predation_rate}$

Tableau 11 : Taux de prédation tiré de Ecopath (Villanueva et al.)

	Arius	Po ma das ys	Ger- res	Sardi nelle	Eth mal ose	Mulet	Elo ps	Dasy- atis	Merou	Tilapia	Grand préda- teur	Req- uins	Préda- teur Estu- arie	Macro- phages Estu- arien	Petits préda- teurs
Pre dati on rate	7.5	12	13	19	14	11	14	5	7	32	9	5	17	20	15

Critical predation efficiency : rapport $\text{min biomass_to_predate/biomass_predated}$ pour avoir de la croissance (en l'état = 0.57 pour toutes les espèces)

Max starvation mortality rate : taux de mortalité dû au manque de nourriture si $\text{biomass_to_predate/biomass_predated} < \text{Critical predation efficiency}$ (en l'état = 1 pour toutes les espèces)

2-4) – Flux de juvéniles

Pour chaque méta-espèce des catégories B et C on précise les tailles minimales entrantes et maximales présentes (pas de max pour catégorie C), ainsi que la saisonnalité d'entrée des juvéniles (Tableau 12). La calibration des biomasses initiales pour ces espèces se fait via l'abondance totale de juvénile entrant dans la grille du modèle par ans.

Tableau 12 : Flux de juvéniles : longueurs entrantes, sortantes et saisonnalité. (Longueur sortie = - : par de sortie)

	Longueur entrée (mm)	Longueur sortie (mm)	Saisonnalité entrée (% sur chaque mois)
SARDINELLE	70	140	;8.3;;8.3;;8.3;;8.3;;8.3;;8.3;;8.3;;8.3;;8.3;;8.3;;8.3;;8.3;;8.7;
POMADASYS	70	426	;5;;5;;5;;5;;5;;5;;5;;5;;5;;15;;25;;15;;5;
Elops	240	360	;8.3;;8.3;;8.3;;8.3;;8.3;;8.3;;8.3;;8.3;;8.3;;8.3;;8.3;;8.7;
Macrophages estuariens	60	130	;8.3;;8.3;;8.3;;8.3;;8.3;;8.3;;8.3;;8.3;;8.3;;8.3;;8.3;;8.7;
Arius	200	-	;11;;10;;9;;7;;2;;2;;2;;8;;13;;12;;12;;12;
Dasyatis	170	-	;8.3;;8.3;;8.3;;8.3;;8.3;;8.3;;8.3;;8.3;;8.3;;8.3;;8.3;;8.7;
Merou	160	-	;8.3;;8.3;;8.3;;8.3;;8.3;;8.3;;8.3;;8.3;;8.3;;8.3;;8.3;;8.7;
Prédateurs estuariens	70	-	;3;;2;;1;;1;;1;;1;;1;;10;;22;;45;;10;;3;

2-5) – Migrations saisonnières

Par migrations saisonnières on entend le cas des espèces qui quittent l'estuaire pour se reproduire ailleurs, à une période déterminée de l'année et à partir de la taille de maturation. Ce type de migration ne concerne que les espèces de la catégorie C. On définit (1) les classes d'âge qui effectuent la migration, (2) les périodes de migrations dans l'année et (3) la mortalité supplémentaire qui doit être appliqué pendant la migration (Tableau 13). La mortalité supplémentaire doit compenser le fait que la prédation n'est plus explicitement appliqué pour les poissons en migration, et aussi le fait qu'ils vont éventuellement s'exposer à une forte pression de pêche, etc...

NB : Pour traduire le fait qu'a aucun moment il n'a été observé qu'une espèce ne soit totalement absente dans le bolon, nous avons appliqué la migration à une classe d'âge sur deux...

	Classes d'âge	Mois de l'année	Mortalité additionnelle (pour chaque classe d'age)
Arius	; 2;;3;;4;;6;;7;;8;;10;;11;;12;;14;;15;;16;;17;	;6;;7;;8;;9;	;1;;1;;1;;1;;1;;1;;1;;1;;1;;1;;1;
Dasyatis	;2;;3;;5;;7;	;1;;2;;5;;8;;9;;11;	;1.9;;1.9;;1.9;;1.9;
Mérou	;2;;4;;6;	;2;;3;;6;;7;;9;;12;	;1.9;;1.9;;1.9;
Prédateurs estuarien	;1;;3;;5;;7;;8;	;1;;4;;5;;7;;10;;11;	;1.9;;1.9;;1.9;;1.9;;1.9;

2-6) – Prédateurs Opportunistes

Ce sont les prédateurs qui ne réalisent que des séjours assez court dans le bolon, ils sont à la recherche de nourriture et ne s'attardent que si ils trouvent une certaine abondance de proie. On calibre leur biomasse initiale en jouant sur ce seuil de proie minimal en fonction de ce qu'il doivent manger pour arriver à satiété. Mise à part ce paramètre de calibration, les autres paramètres sont la gamme de taille observée dans le bolon, et l'abondance maximale par banc (Tableau 14). Les caractéristiques des bancs entrants seront tirés au sort parmi ces gammes de taille et d'abondance.

	Taille min-max (mm)	Abondance max par banc
Grands Prédateurs	200 - 900	30
Requins	900 - 1300	1

2-7) – Environnement

a) grille spatiale

Un des principaux objectif de cette configuration étant l'étude du Spill-over de l'AMP, nous avons choisi de modéliser un domaine couvrant non seulement l'AMP de bamboung mais aussi une grande zone contigue extérieur de l'AMP, une partie du Diomboss ou se connecte le bolon de Bamboung. Par mesure de simplification du problème, et comme nous nous intéressons d'abord à l'effet AMP sur la dynamique, le milieu est considéré comme homogène et constant tout au long de l'année. Les observations montrent que cette hypothèse est relativement acceptable à l'intérieur du bolon, par contre les différences entre le bolon et le Diomboss sont en réalité assez importantes, le Diomboss étant un milieu très ouvert sur l'Océan. Ces hypothèses de départ devront être donc prises en compte lors de l'analyse des résultats.

La grille du modèle a été générée à l'aide de Matlab, à partir du trait de côte numérisé et géo-référencé obtenu via le projet AMPHORE. Au total on a 766 cellules d'eau de 250m x 250m, soit 12,5 km² de plan d'eau modélisé (Figure 1). La résolution de 250m a été choisie comme le meilleur compromis entre représentation de la topographie du bolon et optimisation des temps de calcul du modèle.

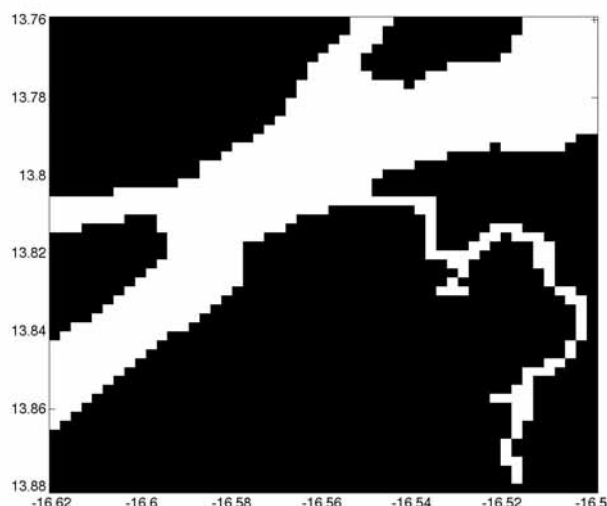


Figure 1: Grille spatiale utilisée pour la configuration Osmose BBG. Mailles de résolution de ~250m. Les pixels noirs correspondent à la terre, (surface totale en eau = 12458,7 Ha).

b) Bas niveaux trophiques

La dynamique de ces compartiments n'est pas modélisée à part entière, au contraire ils constituent le principal forçage énergétique d'OSMOSE. Les biomasses moyennes, le taux de production annuelle, le niveau trophique et les gammes de tailles sont données dans le tableau 15. Le niveau trophique n'est utilisé qu'à des fins de diagnostic du niveau trophique des espèces, mais n'influe en rien la dynamique ; c'est la gamme de taille des proies et l'accessibilité des compartiments pour chaque espèce qui définit la dynamique de prédation sur ces bas niveaux trophiques.

Tableau 15 : Paramètres pour les bas niveaux trophiques (bbg-LTLbasis)					
	Biomasse (t/km2)	P/B annuel*	Niveau trophique*	Taille min (mm)***	Taille max (mm)***
MACRO – BENTHOS	50,85*	1,2	2	0,5	70
MEIO – BENTHOS	7,404*	4	2	0,1	1
MICRO – BENTHOS	24,447*	15	1	0,001	0,1
CREVETTES - CRABES	6,12*	3,4	2	0,5	60
PHYTOPLANKTON	4**	138	1	0,0001	0,1
ZOOPLANKTON	1,27**	50	2	0,01	1
Origine de la donnée : * Ecopath (Colleter et al., soumis), ** Observations <i>in situ</i> , *** Littérature					

2-8) – Divers

a) Pas de temps

Idéalement, le choix du pas de temps doit être fait en fonction (1) de la résolution spatiale ; et (2) des hypothèses faites sur le déplacement des poissons. Ici cet aspect n'a pas encore été exploré, et un pas de temps de 1 mois a été choisi, surtout en fonction de la précision des connaissances en matière de saisonnalité (on dispose de 3 observations par ans...) mais aussi pour des raisons de temps de calcul. Cependant une bonne raison de diminuer ce pas de temps serait le fait que les avis d'experts (de l'équipe) tendent à estimer des séjours beaucoup plus court des prédateurs opportunistes dans le bolon, de l'ordre de la semaine. ATTENTION, en cas de modification du pas de temps il faudra modifier toutes les saisonnalités (flux de juvéniles, ponte, migration) vu que celles-ci sont entrée en terme de % par pas de temps.

La relation entre les hypothèses sur le déplacement des poissons, la résolution spatiale et le pas de temps fait actuellement l'objet d'une recherche au CRH, dirigée par David Kaplan (Post doc : Thomas ?).

b) Nombre d'individus

Une étude de Shin et Cury (2001) présente les résultats d'un test de sensibilité sur la taille des mailles de la grille, pour un nombre d'individu constant :

« When fish are fully accessible (one cell for the grid), some species are depleted by extreme predation pressure and system biomass is low. On the contrary, when fish groups are isolated (extreme right part of the curve), starvation occurs. System biomass is at a maximum at weak to intermediate strength links. On the other hand, this maximum observed biomass corresponds to a minimum in the CV of community biomass (figure 7b) as well as to a higher relative stability of the community compared to species dynamics (figure 7c). Figure 7c also shows that when interactions are too strong or too low, they induce a destabilization of the system ($CV / CV_e > 1$). »

Dans notre cas, la taille des mailles avait été imposé par des contraintes topographique (on a pris la résolution la plus grossière qui permettait de représenter le bolon). Un test de sensibilité sur le nombre d'individus par cohorte, à taille de maille constante a également fait apparaître un maxima , à 200 individus (Figure 2). Pour les raison de stabilité évoquées par Shin et Cury (2002, extrait ci-dessus) nous avons donc choisi de fixer à 200 le nombre d'individus.

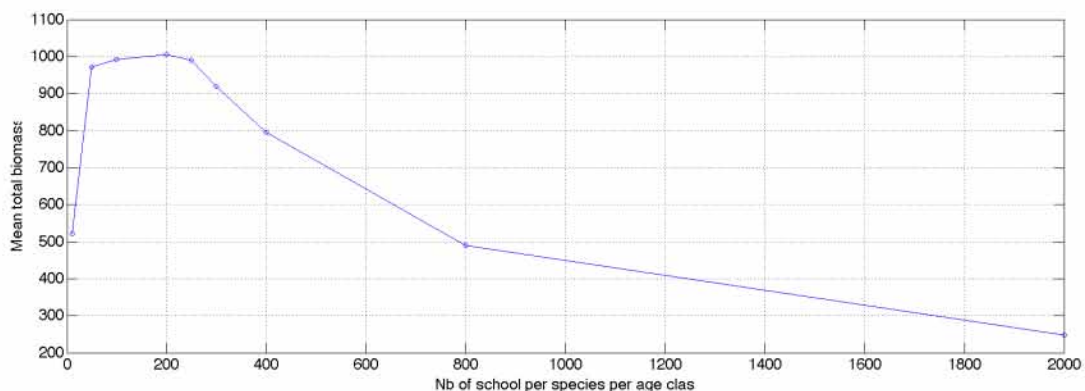


Figure 2: Evolution de la biomasse de poisson totale (tonnes ; grille entière) en fonction du nombre de super-individus (bancs) par cohorte.

b) Mortalité de pêche et AMP

En s'inspirant de l'étude ECOPATH de Colleter et al. (soumis), la mortalité de pêche a été fixée à $F=0,7$. Osmose étant structuré en taille et multi-agent, cette mortalité peut être appliqué sur les individus à partir d'une certaine taille (dite « de recrutement ») à définir pour chaque espèce. Dans notre cas, la taille de recrutement pour toutes les espèces a été fixée à 10cm, taille en deça de laquelle nous considérons que les poissons échappent aux différents engins de pêche.

Les coordonnées de la zone de la grille correspondant au bolon de Bamboung sont entrée dans le fichier bbg-MPA, ainsi que l'année de début et de fin de la mise en défens. Avant la mise en défens, la pression de pêche est homogène dans toute la grille ($F=0,7$). Pendant toute la période de mise en défens la mortalité de pêche pour les individus situé dans l'AMP est de 0, et l'effort de pêche est redistribué sur le reste de la grille selon la formule suivante (Shin et Cury 2001) :

$$F_e = F(1-RS)^{-1}$$

F_e = mortalité de pêche hors AMP ; F = mortalité de pêche pré-AMP ; RS = Taille relative de l'AMP (% de la grille)

b) Conditions initiales

Les conditions initiales sont les biomasses observées pour chaque espèce avant la mise en défens, en 2003 (Tableau 16). Pour chaque espèce, Osmose distribue cette biomasse initiale sur l'ensemble du spectre de taille, en considérant une mortalité naturelle de 0,5. Pour les espèces à présence opportuniste, la biomasse initiale (dans le modèle) est nulle (mais arrivée des les premiers pas de temps si biomasse de proies suffisante). Pour les espèces non présente à certaines gammes de taille dans le bolon, la distribution initiale de la biomasse sur l'ensemble du spectre de taille induit une erreur initiale, mais qui est résorbée dès les premiers pas de temps (Spin-up).

En définitive, les conditions initiales de biomasses n'ont d'importance que pour les espèces se reproduisant localement ; en effet pour celles-ci la dynamique va beaucoup dépendre de la biomasse d'individus matures ès le premier pas de temps.

Tableau 16 : Conditions initiales (2003) et durant la période de mise en défens (2004-2009) de biomasses par méta-espèce (bbg-calibration)

	Rendement moyen des pêches expérimentales (kg/Hectares)	
	2003	Moyenne 2004-2009
Arius	2,269714286	35,804
Pomadasys	1,134857143	5,244
Gerres	1,286857143	1,672
Sardinelle	3,230857143	3,664
Ethmalose	18,32571429	7,66
Mulet	26,25314286	4,496
Elops	0,792	1,648
Dasyatis	0,353142857	0,888
Mérou	0,116571429	2,776
Tilapia	2,52	0,356
Grands prédateurs	1,882285714	3,664
Requins	0	0,904
Prédateurs estuariens	0,696	2,504
ME3	1,634285714	0,192
Petits prédateurs	0,342285714	0,544
SOMME DES MODELES	60,84171429	76,356
Nb coups	0,105714286	
Total	62,444	

3 – Calibration et Validation

3.1) Variance et Spin-up

Comme tout modèle dynamique, il y a une durée de spin-up au début de chaque simulation, c'est à dire un temps avant de trouver un équilibre entre les interactions, étant donnée que la biomasse initiale a été définie sans tenir compte l'équilibre tropho-dynamique existant entre les espèces (à priori inconnu). Notre expérience montre que pour la configuration présentée ici, le spin-up est inférieur à 5 années de simulation. Cependant, concernant les espèces de catégories A, se reproduisant localement, on a toujours des variation importantes de biomasse à basse fréquence, sur des périodes de plusieurs années, en particulier pour les espèces à forte fécondité comme les Mulet et Ethmalose.

3.1) Calibration des biomasses initiales stabilisées

La calibration a été faite en se basant sur des séries de simulations de 15 années, avec un effort de pêche homogène (pas d'AMP). Les paramètres de calibrations sont alors ajustés de sorte à obtenir des biomasses moyennes sur les 10 dernières années comparables à celles observées dans la situation pré-AMP (2003 ; tableau 16). Les valeurs données dans le tableau 17 sont celles utilisées pour la version du code de novembre 2011, qui n'incluait pas encore les paramètres d'habitats et qui comportait un bug dans la routine de prédation ; ces valeurs sont donc données uniquement à titre indicatif. La comparaison modèle-donnée obtenue avec cette calibration est présentée en figure 3.

NB : On compare les biomasses moyennes dans la zone de la grille correspondant au bolon de Bamboung ; en effet il existe un effet bolon dans le modèle, qui tend à favoriser certaines espèces, effet purement topologique (milieu homogène) qui mériterait d'ailleurs une étude détaillée.

Tableau 17 : Paramètres de calibrations : mortalité larvaire, flux de juvéniles et seuil minimum de biomasse de proie (bbg-calibration)		
	Paramètre de calibration	Valeur pour calibration novembre 2011
Gerres	Mortalité larvaire	7,5
Mulet		9,25
Tilapia		4,5
Petits prédateurs		7,1
Ethmalose		8,1
Sardinelle	Flux entrant de juvéniles (abondance par ans)	3000000
Pomadasys		100000
Elops		45000
Macrophages Estuariens		1800000
Dasyatis		500
Mérou		3500
Machoiron (Arius)		45000
Prédateurs estuariens		175000
Requins	Seuil minimum de biomasse de proie, (multiple de la biomasse minimales nécessaire)	25
Grands prédateurs		25

Calibration « A la main »

Dans un premier temps, la validation a été effectuée « à la main », en commençant par les flux de juvéniles, puis les mortalité larvaires, puis les seuils de proie, avec bien sûr des réajustements nécessaires sur les autres espèces à chaque changement important. Merci à Gaspard Bertrand qui a grandement débroussaillé le terrain dans ce domaine, et ainsi donné une idée des ordres de grandeurs des paramètres de calibration. Une nouvelle calibration est nécessaire à chaque modification de la configuration (préférendum alimentaire, croissance, etc.), mais est généralement atteinte assez rapidement en partant de l'ancienne. En fait, le système est grandement stabilisé par l'existence des flux de juvéniles, alors que la plus grande variabilité vient des espèces se reproduisant localement.

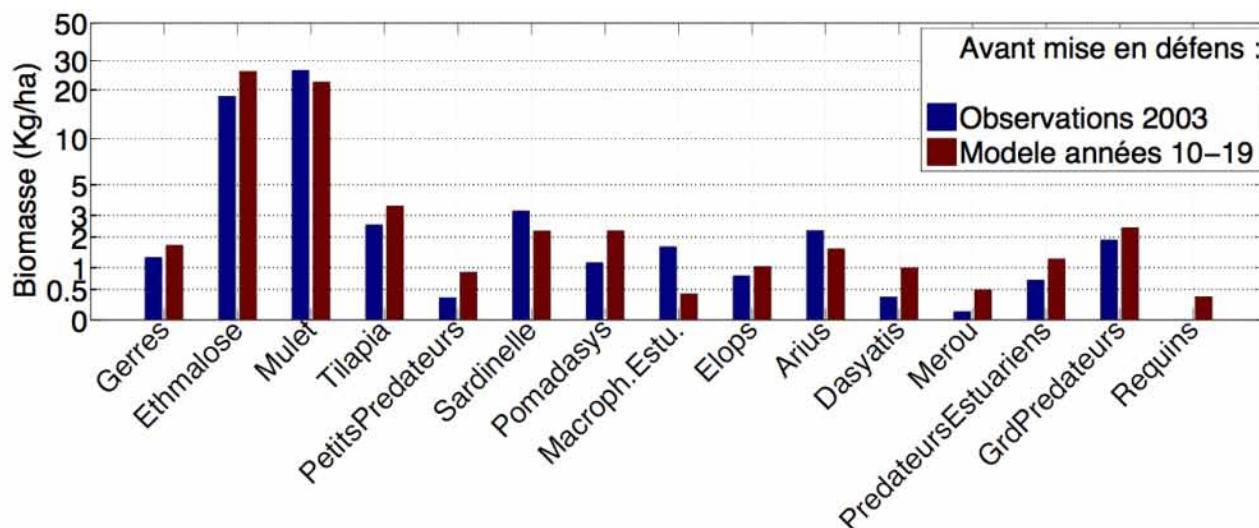


Figure 3: En bleu, les biomasses observées avant la mise en défens (en 2003); en rouge les biomasses moyennes entre les années 10 à 19 d'une simulation avec effort de pêche homogène.

Calibration « Génétique »

Plusieurs tentatives de calibration via un algorithme génétique, réalisées par David Kaplan sur le cluster du CRH à Sète, ont permis de mettre à jours des erreurs qui empêchaient la convergence de biomasse de certaines espèces vers les biomasses cibles (initiales). Par exemple, cela a permis de mettre à jour un problème sur les fécondités, qui nous a amené à redéfinir celles-ci en fonction d'un RGS constant et d'observations de diamètres des œufs. Au moment de la rédaction de ce manuel, les dernières calibrations génétiques sont rendues caduques par des modifications opérées a posteriori sur les méta-espèces afin de mieux faire coller la dynamique observée à la vision des experts de l'équipe (préférendum alimentaire, spectres de tailles, etc.). Cette démarche devra cependant être relancée une fois la phase de paramétrisation entièrement terminée ; elle permettra notamment de vérifier l'unicité de la solution obtenue.

NB : La calibration peut aussi intervenir sur les valeurs d'accessibilité des bas niveaux trophiques ; dans notre cas ces valeurs ont simplement été fixées au départ à 1, puis réajustées une fois à 0,5 pour le meio-benthos et le micro-benthos pour pallier à une impossibilité de calibrer correctement les Mulets et Ethmalose (aucune limitation en nourriture).

3.1) Validation d'une simulation

La disponibilité des données collectées avant et après l'AMP constitue un cadre exceptionnel pour la validation de la dynamique reproduite par le modèle. En effet, un problème courant en modélisation est la disponibilité d'un seul jeu de données pour la calibration et la validation. Ici nous calibrons sur

la situation pré-AMP, et validons sur la situation post AMP, en comparant les biomasses moyennes sur plusieurs années après la mise en défens (tableau 16). En comparant pour chaque espèce les rapports de biomasse avant/après AMP, on voit rapidement quelles sont les espèces pour lesquelles l'effet va dans le même sens entre modèle et observations ($>$ ou $<$ à 1 ; figure 4).

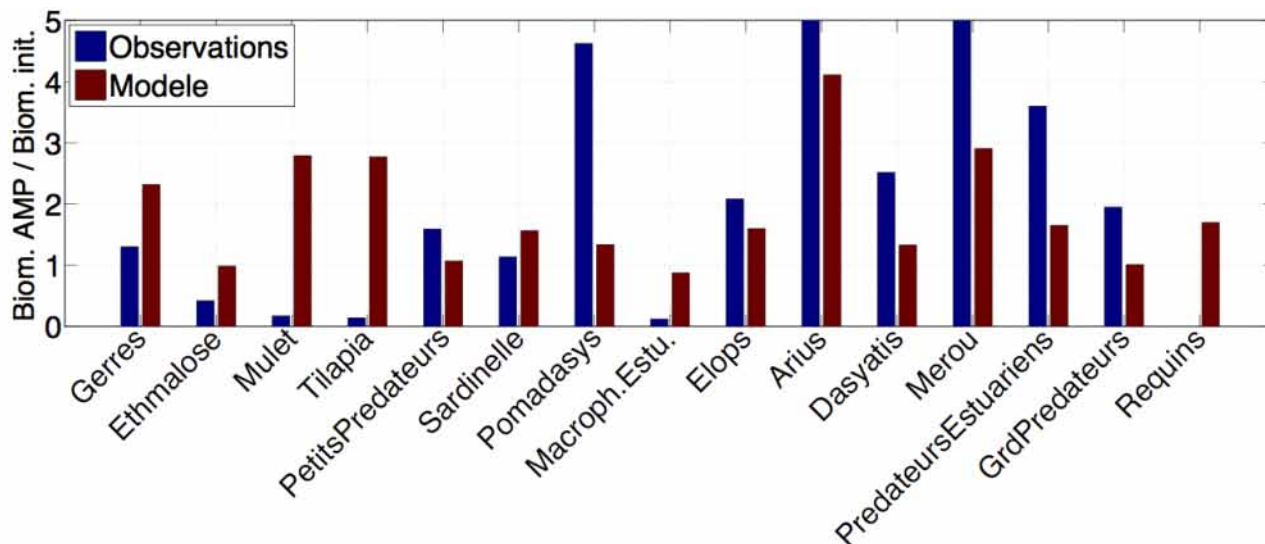


Figure 4: Changements de biomasses entre la situation pré-AMP (2003) et moyenne post AMP (6 premières années), simulation BBG49.

4 – Output

Les fichiers d'output d'osmose BBG sont ceux standart d'OSMOSE, plus la possibilité de faire des diagnostics spatialisés, afin de comparer l'évolution des indicateurs dans l'AMP et en dehors. Les suffixes des fichiers output sont assez parlant : « _AMP », « _horsAMP » et « _PARTOUT ». Les output permettent donc de visualiser les series temporelles de biomasse, d'abondance les spectres de taille, les régimes alimentaires, pression de prédation et niveau trophiques. De plus, il a été ajouté un output spatialisé, développé par Philippe Verley, qui délivres les cartes de distribution des même indicateurs pour chaque pas de temps. Enfin, un fichier « biomass_Spillover » contient une série temporelle du spill-over de biomasse « instantané » de l'AMP par espèce calculé comme suit :

Spill-over « instantané » = Somme des biomasses de poissons quittant définitivement l'AMP (Catégories B et C) + Somme des biomasses de poissons de l'AMP en cours de migration saisonnière.

5 – Remerciements

Aide, conseils et calibration OSMOSE : David Kaplan, Dawit Yemane Ghebrehiwet, Gaspard Bertrand, Philippe Verley, Yunne Shin

Données de terrain : Jacques Panfili, Marc Bouvy, Marc Pagano, Oumar Sadio