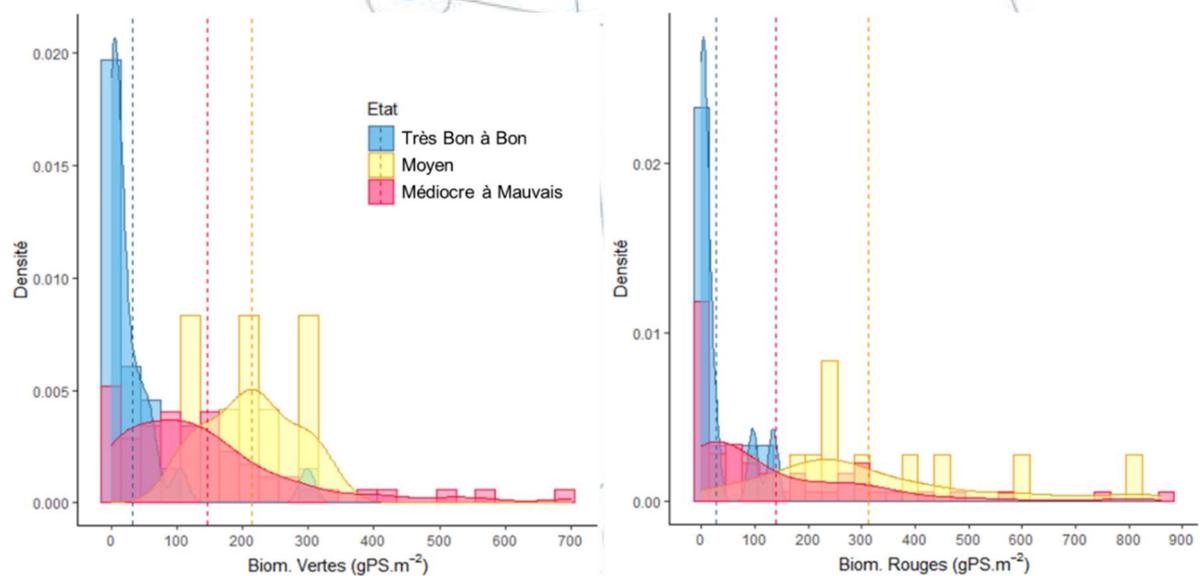


Vers un descripteur du compartiment « Macrophyte » pour le modèle

GAMELag

Note basée sur l'analyse de la base de données
« Macrophyte – RSL »



Rapport final du contrat n° 20/1000831

Fiche documentaire

Titre du rapport : Vers un descripteur du compartiment « Macrophyte » pour le modèle GAMELag. Note basée sur l'analyse de la base de données « Macrophyte – RSL »

Référence interne : ODE/UL/LER/LR/22.16

Diffusion :

libre (internet)

restreinte (intranet) – date de levée d'embargo : AAA/MM/JJ

interdite (confidentielle) – date de levée de confidentialité : AAA/MM/JJ

Date de publication : 2022/09/13

Version : 1.0.0

Référence de l'illustration de couverture

Crédit photo/titre/date

Langue(s) :

Français

Résumé/ Abstract : Le modèle GAMELag est un outil d'analyse et de compréhension du fonctionnement des écosystèmes lagunaires eutrophisés et d'aide à la décision pour tester des actions/aménagements en vue de leur restauration. Des travaux antérieurs ont mis à jour des limites d'utilisation de l'outil, notamment vis-à-vis de la conceptualisation trop simpliste des herbiers à zostère qui, avec les algues opportunistes vertes et rouges, constituent les 3 groupes fonctionnels pris en compte dans le modèle. Les processus d'assimilation des nutriments stockés dans le compartiment sédimentaire par le système racinaire de l'herbier n'étant pas pris en compte dans le modèle, la croissance simulée de l'herbier est fortement sous-estimée. De ce fait, le modèle est dans l'incapacité d'estimer l'état du compartiment « Macrophyte » à partir des indicateurs DCE.

La présente étude a pour objectif de statuer sur la nécessité/pertinence d'affiner la formalisation des processus de croissance de l'herbier au sein du modèle. Dans un objectif de recherche des flux admissibles, il n'apparaît pas nécessaire de reproduire finement l'évolution des herbiers. En revanche, il est nécessaire et suffisant que le modèle soit capable d'établir les liens entre les pressions anthropiques qui s'exercent sur l'écosystème et les conditions environnementales favorables au développement des herbiers (productions primaire et de macroalgues limitées compatibles avec des conditions de lumière suffisante pour le développement de l'herbier). Dans ce contexte, un indicateur de non-prolifération des espèces opportunistes a été recherché à partir de l'analyse des données de biomasse de macrophytes, acquises sur 13 lagunes occitanes entre 2001 et 2006 dans le cadre des diagnostics « Macrophyte-RSL ». Les principales conclusions de cette étude sont les suivantes :

- la prise en compte, au sein du modèle, des deux groupes fonctionnels opportunistes des algues vertes et rouges est suffisante pour évaluer l'état du compartiment « Macrophyte » dans la mesure où elle aboutit à une évaluation correcte des stations en état « Médiocre » ou « Mauvais » dans plus de 90% des cas,
- l'analyse des distributions de biomasse sur les stations où les algues vertes sont dominantes a permis de proposer un seuil de non-prolifération de l'ordre de 80 gPS.m⁻² pour ce groupe fonctionnel. En revanche, la probabilité non négligeable d'observer de faibles biomasses d'algues rouges dans des états « Médiocre à Mauvais » ne permet pas de proposer un seuil de non-prolifération pour ce groupe fonctionnel.
- des plages de valeurs de biomasse d'algues opportunistes, en distinguant ou non les deux groupes fonctionnels, ont été estimées en fonction de l'état du compartiment « Macrophyte ». Celles-ci pourront dorénavant être utilisées, lors de la phase d'optimisation des paramètres du modèle, pour contraindre la production simulée d'algues opportunistes en fonction de l'état d'eutrophisation global de la lagune.

Mots-clés/ Key words : Lagunes méditerranéennes, Outil d'aide à la décision, Compartiment "Macrophyte", Etat d'eutrophisation, Descripteurs

Comment citer ce document :

Disponibilité des données de la recherche : Oui, les bases de données RSL utilisées sont dans Q2

DOI :

Commanditaire du rapport : Agence de l'Eau Rhône Méditerranée Corse	
Nom / référence du contrat : <input type="checkbox"/> Rapport intermédiaire (réf. bibliographique : XXX) <input checked="" type="checkbox"/> Rapport définitif (contrat 20/1000831)	
Projets dans lesquels ce rapport s'inscrit (programme européen, campagne, etc.) : Convention Cadre Ifremer – AE RMC	
Auteur(s) / adresse mail	Affiliation / Direction / Service, laboratoire
FIANDRINO Annie (annie.fiandrino@ifremer.fr)	Ifremer / ODE
CIMITERRA Nicolas (nicolas.cimiterra@ifremer.fr)	Ifremer / ODE / UL / LER-LR
GIRAUD Anaïs (Anais.GIRAUD@eaurmc.fr)	Agence de l'eau Rhône Méditerranée Corse / Délégation de Montpellier
STROFFEK Stéphane (Stephane.STROFFEK@eaurmc.fr)	Agence de l'eau Rhône Méditerranée Corse / Département de la Connaissance et de la Planification
Encadrement(s) :	
Destinataire :	
Validé par :	

Sommaire

Table des matières

1	Rappel du contexte	2
2	Limites actuelles du modèle GAMELag en lien avec le compartiment « Macrophyte »	2
3	Caractérisation de l'état du compartiment « Macrophyte »	3
3.1	Description de la base de données RSL 2001 – 2006	3
3.2	Evaluation de l'état.....	6
3.2.1	Evaluation de l'état en fonction des genres majoritaires	6
3.2.2	Représentativité des genres majoritaires.....	8
4	Recherche de seuils de non-prolifération des algues opportunistes rouges et vertes	9
4.1	Seuils définis à partir d'une relation Etat – Biomasse	9
4.2	Recherche d'autres critères de sélection	10
4.2.1	Critère 1 : fiabilité de l'estimation de l'état à partir des 3 groupes fonctionnels ..	10
4.2.2	Critère 2 : représentativité des groupes fonctionnels opportunistes	12
4.3	Vers des seuils de non-prolifération des groupes fonctionnels opportunistes	13
5	Conclusions et perspectives	15
5.1	Conclusions.....	15
5.2	Perspectives.....	16

1 Rappel du contexte

Le modèle GAMELag est un outil d'analyse et de compréhension du fonctionnement des écosystèmes lagunaires eutrophisés et d'aide à la décision pour proposer/tester des actions/aménagements en vue de leur restauration. Sa finalité est d'établir des bilans pluriannuels d'azote et de phosphore au sein des principaux compartiments biogéochimiques d'une lagune, en fonction des apports de matière par les bassins versants et en tenant compte de la capacité du milieu à exporter la matière vers la mer.

La démarche mise en œuvre en matière de développement de l'outil est volontairement pragmatique en proposant une conceptualisation simple de l'écosystème et en la complexifiant en tant que de besoin au regard des limites d'utilisation de l'outil. Ces limites ont été précisées pour chaque compartiment (Saguet et al., 2019) et intégrées dans un document de synthèse qui présente une description détaillée de l'outil et propose une vision générale, à l'échelle du bassin, des conditions de son déploiement (Fiandrino et al., 2022).

2 Limites actuelles du modèle GAMELag en lien avec le compartiment « Macrophyte »

Une première phase d'optimisation des paramètres du modèle sur le site pilote de la lagune de Bages-Sigean a permis de mettre à jour les limites d'utilisation de l'outil notamment vis-à-vis de l'estimation des indicateurs DCE du compartiment « Macrophyte » basés sur le pourcentage de recouvrement total et le pourcentage relatif des espèces de référence. Cette limitation est en partie liée à la conceptualisation trop simpliste des herbiers à zostères au sein du modèle. La capacité de croissance des herbiers à partir des stocks sédimentaires de nutriment via leur système racinaire n'étant pas prise en compte, la croissance simulée de l'herbier est limitée par la disponibilité en nutriment dans la colonne d'eau, contrairement à ce qui est observé, notamment dans les milieux en phase de restauration.

En outre, la paramétrisation des processus qui gouvernent l'évolution des macrophytes (processus de mortalité notamment) n'a pas permis de reproduire de façon satisfaisante les successions macrophytiques observées sur la lagune de Bages-Sigean en phase de restauration écologique. Cette limitation est liée au fait que la confrontation des biomasses de macrophytes simulées et observées n'a pas pu être réalisée sur ce site pilote.

Les actions entreprises pour améliorer le compartiment « Macrophyte » ont porté sur :

- la capacité du modèle à reproduire les indicateurs DCE – Macrophyte. Des modèles basés sur une conceptualisation plus réaliste des herbiers existent, notamment celui développé pour l'étang de Thau par Plus et al., 2003¹ qui pourrait être introduit dans l'outil GAMELag. Toutefois, au préalable à toute complexification de l'outil, il convient d'évaluer la nécessité/l'intérêt de cette implémentation. Dans un objectif de recherche des flux admissibles, il n'apparaît pas nécessaire de reproduire finement l'évolution des herbiers. En revanche, il est nécessaire et suffisant que le modèle soit capable d'établir les liens entre les pressions anthropiques qui s'exercent sur l'écosystème et les conditions environnementales favorables au développement des herbiers (productions primaire et de macroalgues limitées

¹ Plus M., Chapelle A., Ménesguen A., Deslous-Paoli J.-M., Auby I., 2003. Modelling seasonal dynamics of biomasses and nitrogen contents in a seagrass meadow (*Zostera noltii* Hornem.): application to the Thau lagoon (French Mediterranean coast). *Ecol. Modell.* 161, 213–238. [https://doi.org/10.1016/S0304-3800\(02\)00350-2](https://doi.org/10.1016/S0304-3800(02)00350-2)

compatibles avec des conditions de lumière suffisante pour le développement de l'herbier). Afin d'alimenter la réflexion sur l'utilisation d'autres descripteurs que les métriques DCE pour rendre compte de l'état du compartiment « Macrophytes », un **indicateur de non-prolifération des espèces opportunistes** a été recherché.

- une nouvelle étape d'optimisation de la paramétrisation du modèle intégrant des paramètres du compartiment « Macrophyte » a été réalisée sur la lagune de l'Or en confrontant les biomasses de macroalgues simulées aux résultats obtenus dans la présente note. Les conclusions de ces travaux sont présentés dans la note « Sédiment ».

3 Caractérisation de l'état du compartiment « Macrophyte »

Afin de caractériser la qualité du compartiment « Macrophyte » au sein de l'outil GAMELag sans avoir recours aux métriques basées sur le recouvrement relatif des espèces de référence, un indicateur de non-prolifération des espèces opportunistes est recherché. Les données acquises dans le cadre du RSL entre 2001 et 2006 sur les lagunes méditerranéennes ont été analysées afin de mettre à jour d'éventuels **seuils de biomasse d'algues rouges et vertes opportunistes² à ne pas dépasser** pour garantir le bon état de ce compartiment.

Jusqu'en 2006, l'état du compartiment « Macrophyte » était évalué, sur chacune des stations échantillonnées, à partir des pourcentages de biomasse des espèces de référence comparativement à la biomasse totale présente à la station (Réseau de Suivi Lagunaire, 2011³). Les biomasses des espèces identifiées sur chaque station peuvent donc être analysées au regard de l'état du compartiment « Macrophyte » estimé à la station.

3.1 Description de la base de données RSL 2001 – 2006

La base de données « Macrophyte – RSL » utilisée pour cette analyse regroupe les données acquises sur 13 lagunes occitanes (soit 20 secteurs lagunaires et 253 stations) entre 2001 et 2006 dans le cadre des diagnostics RSL de ce compartiment (Tableau 1).

² Ces deux groupes fonctionnels sont pris en compte dans le modèle GAMELag via les genres *Gracilaria* et *Ulva*.

³ Réseau de Suivi Lagunaire, 2011. Guide de reconnaissance et de suivi des macrophytes des lagunes du Languedoc-Roussillon : 148 p. Ifremer, Cépralmar, Agence de l'Eau RM&C, Région Languedoc-Roussillon.

Tableau 1 : Diagnostics RSL du compartiment « Macrophyte » : Années de suivi, secteurs lagunaires et stations échantillonnées dans ces secteurs. Pour les secteurs lagunaires échantillonnés deux années, les valeurs entre parenthèses correspondent au nombre de stations échantillonnées. La dernière colonne correspond au nombre total de taxons identifiés par lagune.

Lagune	Secteurs	Nombre de stations /secteur	Année	Σ Taxons (Stations et Années)
SALSES-LEUCATE	LEN	23	2004	170
	LES	43		305
LA PALME	LAP	9	2002	31
	BGN	7		22
BAGES-SIGEAN	BGM	9	2005	16
	BGS	6		29
	AYROLLE	AYR		14
GRUISSAN	GRU	3	2005	11
THAU	TE	26	2003	157
	TW	23		158
INGRIL	INN	5	2006	24
	INS	7		17
VIC	VIC	28	2001 (24), 2006 (28)	110
PREVOST	PRE	4	2001 (9), 2006 (8)	21
	PRW	5		36
ARNEL	ARN	7	2001 (7), 2006 (4)	26
GREC	GRC	6	2006	6
OR	ORE	13	2005	24
	ORW	13		22
PONANT	PON	2	2002	4

Au total cette base de données regroupe 1276 individus auxquels sont associées 11 variables descriptives : 5 variables sont définies à l'échelle de la station et 6 à l'échelle du taxon (Tableau 2).

Tableau 2 : Variables descriptives des 1276 individus contenus dans la base de données « Macrophyte – RSL »

Variable	Echelle de description	Descriptif
NomStation	Station	Nom de la station échantillonnée
Annee		Année du suivi
TxRecTot		Taux de recouvrement total par les macrophytes à la station (en % de surface totale)
BiomTot		Biomasse totale à la station (en gPS.m ⁻²)
Etat		Etat du compartiment « Macrophyte » à la station (de bon à Mauvais)
NomTaxon	Taxon	Nom du taxon
Biomasse		Biomasse du taxon (en gPS.m ⁻²)
Groupe		Groupe auquel appartient le taxon (algues rouges, vertes, brunes...)
Genre		Genre auquel appartient le taxon.
I_Reference		Booléen pour distinguer les espèces de référence (booléen = Ref) des autres espèces (booléen = autre)
PcBiom		Pourcentage de biomasse du taxon comparativement à la biomasse totale à la station (en % de la biomasse totale à la station)

Les 19 genres présentant des biomasses totales, sommées sur toutes les stations, supérieures à 200 gPS.m⁻² regroupent 8 genres de référence (Figure 1) : *Cystoseira* (brune), *Lamprothamnium* (charophyte), *Ruppia*, *Stuckenia*, *Zostera* (herbier), *Laurencia* (rouge), *Acetabularia* et *Valonia* (verte) et 11 genres opportunistes (Figure 2) : *Alsidium*, *Chondria*, *Gracilaria*, *Halopithys*, *Rytiphlaea*, *Soleria* (rouge) et *Chaetomorpha*, *Cladophora*, *Monostroma*, *Ulva*, *Ulvaria* (verte).

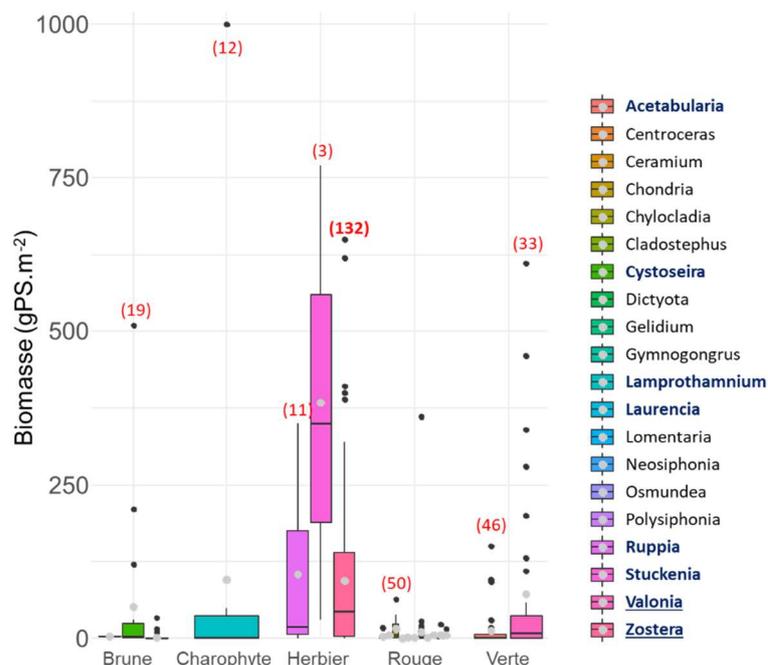


Figure 1 : Distribution de biomasses des espèces de référence. Les 8 genres dont les biomasses totales sont supérieures à 200 gPS.m⁻² sont inscrits en bleu et les chiffres en rouge correspondent au nombre d'échantillons recensés pour ces 8 genres sur toutes les stations entre 2001 et 2006. Les 2 genres dont les biomasses totales sont supérieures à 2000 gPS.m⁻² sont soulignés.

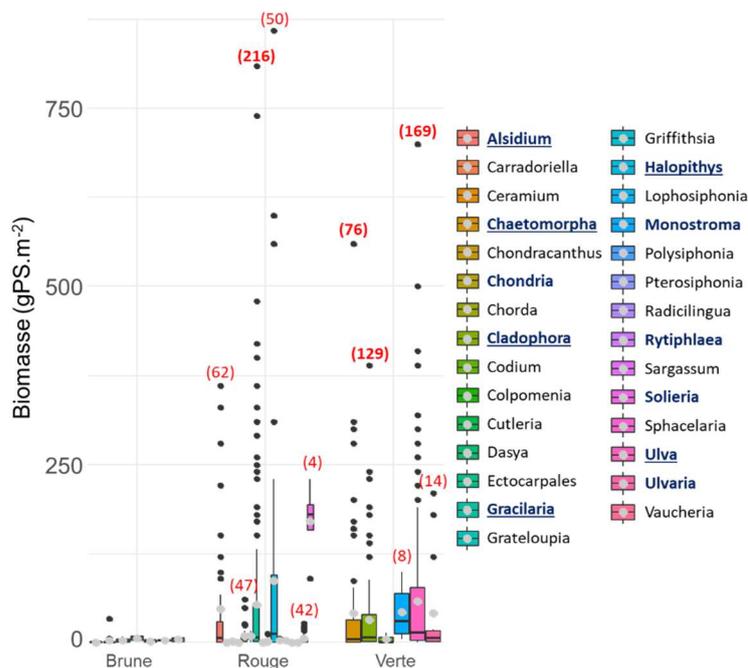


Figure 2 : Distribution de biomasses des espèces autres que les espèces de référence. Les chiffres en rouge correspondent au nombre d'échantillons recensés sur toutes les stations entre 2001 et 2006. Les 11 genres dont les biomasses totales sont supérieures à 200 gPS.m⁻² sont inscrits en bleu, les 6 genres dont les biomasses totales sont supérieures à 2000 gPS.m⁻² sont soulignés.

Les 8 genres dont les biomasses totales (cumulées sur l'ensemble des données) dépassent 2000 gPS.m⁻² sont :

- pour les genres de référence (Figure 1) : *Zostera* (132 ind., biomasse moyenne de 94 gPS.m⁻²) et *Valonia* (33 ind., Biom_{moy}=72 gPS.m⁻²)

- pour les genres opportunistes (Figure 2) : *Gracilaria* (216 ind., $Biom_{moy}=53 \text{ gPS.m}^{-2}$), *Ulva* (169 ind., $Biom_{moy}=57 \text{ gPS.m}^{-2}$), *Halopithys* (50 ind., $Biom_{moy}=85 \text{ gPS.m}^{-2}$), *Cladophora* (129 ind., $Biom_{moy}=31 \text{ gPS.m}^{-2}$), *Chaetomorpha* (76 ind., $Biom_{moy}=41 \text{ gPS.m}^{-2}$), *Alsidium* (62 ind., $Biom_{moy}=47 \text{ gPS.m}^{-2}$).

Les 3 groupes fonctionnels pris en compte dans le modèle GAMELag regroupent 6 genres :

- pour les genres de référence : *Zostera*
- pour les genres opportunistes : *Gracilaria* et *Halopithys* pour les algues rouges et *Ulva*, *Cladophora* et *Chaetomorpha* pour les algues vertes.

3.2 Evaluation de l'état

3.2.1 Evaluation de l'état en fonction des genres majoritaires

L'état du compartiment « Macrophyte » a pu être évalué sur la quasi-totalité des 289 stations échantillonnées entre 2001 et 2006 (seule la station AYR 10 en 2005 présentait un taux de recouvrement total strictement inférieur à 5% (Réseau de Suivi Lagunaire, 2011)). Un quart des stations affichent un état « Très Bon » ou « Bon » et près de 60% sont diagnostiquées en état « Médiocre » ou « Mauvais » (Tableau 3).

Tableau 3 : Effectifs des stations en fonction de l'état du compartiment « Macrophyte »

Etat	Effectif	(%)
Très Bon	55	19.1
Bon	19	6.6
Moyen	43	14.9
Médiocre	80	27.8
Mauvais	91	31.6
TOTAL	288	100

Afin de tester la sensibilité de cet indicateur aux genres pris en compte, l'état du compartiment « Macrophyte » peut être évalué en appliquant la même méthode que celle utilisée jusqu'en 2006 (Réseau de Suivi Lagunaire, 2011) à des sous-échantillons de la base de données complète. Ainsi l'état du compartiment a été calculé en considérant les sous-échantillons suivants :

- Cas 1 : les 19 genres dont les biomasses totales sont supérieures à 200 gPS.m^{-2} ,
- Cas 2 : les 8 genres dont les biomasses totales sont supérieures à 2000 gPS.m^{-2} ,
- Cas 3 : les 3 groupes fonctionnels simulés dans le modèle GAMELag.

Dans le premier cas, la prise en compte des 19 genres majoritaires en termes de biomasse permet **d'évaluer correctement l'état** du compartiment « Macrophyte » **dans plus de 97% des cas** (Tableau 4).

Seules 6 stations présentent un état sous-évalué du fait de la non prise en compte d'espèces de référence spécifiques à ces stations et une station présente un état surévalué (« Très Bon » au lieu de « Bon ») du fait de la non prise en compte d'une espèce opportuniste dominante sur cette station (algue brune *Colpomenia sinuosa* à la station TE).

Tableau 4 : Concordances entre l'état du compartiment « Macrophyte » et l'évaluation faite en considérant les 19 genres majoritaires en termes de biomasses. Les pourcentages entre parenthèse correspondent au % de cas correctement évalués par état.

		Etat évalué à partir des 19 genres majoritaires						TOTAL
		Très Bon	Bon	Moyen	Médiocre	Mauvais	ND	
Etat	Très Bon	54 (98.2%)	1	0	0	0	0	55
	Bon	1	16 (84.2%)	1	0	1	0	19
	Moyen	0	0	40 (93.0%)	2	1	0	43
	Médiocre	0	0	0	76 (95.0%)	4	0	80
	Mauvais	0	0	0	0	91 (100.0%)	0	91
	TOTAL	55	17	41	78	97	0	288

Lorsqu'on ne considère que les **8 genres majoritaires** en termes de biomasse (Tableau 5), **l'évaluation de l'état** du compartiment « Macrophyte » est correcte dans près de 84% des cas. Dans près de 13% des cas (37 stations), l'état est sous-évalué avec en particulier :

- un déclassement des états « Très Bon », « Bon » et « Moyen » d'une ou deux classes (25 stations). Ces déclasserments sont liés à une **forte sous-estimation de la biomasse des herbiers à zostères** qui ne représentent que 6.5 ± 17.2 % de la biomasse totale des genres de référence présents sur ces 25 stations. De même, l'absence d'herbiers à zostère et du genre *Valonia* ne permet pas de rendre compte du « Très Bon » état de 8 stations.
- un déclassement des stations en état « Médiocre » vers un « Mauvais » état (12 stations) du fait de la prise en compte de seulement 8 genres majoritaires et de la réduction de la richesse spécifique qui en découle. Les 11 stations en « Mauvais » état qui ne peuvent être diagnostiquées correspondent à des stations où la seule espèce présente (*Monostroma* ou *Chondria capillaris*) ne fait pas partie des 8 genres majoritaires retenus.

Tableau 5 : Concordances entre l'état du compartiment « Macrophyte » et l'évaluation faite en considérant les 8 genres majoritaires en termes de biomasses. Les pourcentages entre parenthèse correspondent au % de cas correctement évalués par état.

		Etat évalué à partir des 8 genres majoritaires						TOTAL
		Très Bon	Bon	Moyen	Médiocre	Mauvais	ND	
Etat	Très Bon	43 (78.2%)	2	1	0	1	8	55
	Bon	2	12 (63.2%)	1	3	1	0	19
	Moyen	0	0	27 (62.8%)	12	4	0	43
	Médiocre	0	0	1	67 (83.8%)	12	0	80
	Mauvais	0	0	0	0	80 (87.9%)	11	91
	TOTAL	45	14	30	82	98	19	288

Lorsqu'on considère les **3 groupes fonctionnels pris en compte dans le modèle GAMELag** (Tableau 6), **l'évaluation de l'état** du compartiment « Macrophyte » est correcte dans près de 74% des cas. La non prise en compte du genre de référence *Valonia* et de l'algue rouge *Alsidium* modifie peu les conclusions précédentes. On observe :

- un déclassement des états « Très Bon », « Bon » et « Moyen » d'une ou deux classes sur 33 stations lié à une sous-estimation de la biomasse des herbiers à zostères sur ces stations.
- un déclassement des stations en état « Médiocre » vers un « Mauvais » état (18 stations) du fait de la réduction supplémentaire de la richesse spécifique.
- le nombre de stations qui ne peuvent pas être diagnostiquées (8 stations en « Très Bon » état et 11 stations en « Mauvais » état) reste inchangé.

En outre, cette réduction du nombre de genres engendre peu de surévaluation de l'état : seules 4 stations en « Bon » état et 2 stations en état « Médiocre » sont évaluées respectivement en « Très Bon » état et en état « Moyen ». Cette surestimation de l'état est liée à une sous-

estimation des biomasses des genres opportunistes qui ne représentent que $24.9 \pm 23.3\%$ de la biomasse totale des opportunistes présentes sur ces stations.

Tableau 6 : Concordances entre l'état du compartiment « Macrophyte » et l'évaluation faite en considérant les 3 groupes fonctionnels pris en compte dans le modèle GAMELag. Les pourcentages entre parenthèse correspondent au % de cas correctement évalués par état.

		Etat évalué à partir des 3 groupes fonctionnels pris en compte dans le modèle GAMELag						
		Très Bon	Bon	Moyen	Médiocre	Mauvais	ND	TOTAL
Etat	Très Bon	40 (72.7%)	2	2	1	2	8	55
	Bon	4	8 (42.1%)	2	4	1	0	19
	Moyen	0	0	24 (55.8%)	14	5	0	43
	Médiocre	0	0	2	60 (75.0%)	18	0	80
	Mauvais	0	0	0	0	80 (87.9%)	11	91
	TOTAL	44	10	30	79	106	19	288

3.2.2 Représentativité des genres majoritaires

Au sein des genres de référence

La représentativité des herbiers à zostères est analysée au regard du pourcentage de biomasse de ces herbiers comparativement à la biomasse totale des espèces de référence présentes sur chaque station. Ce pourcentage est inférieur à 50% sur près de 40% des 74 stations caractérisées en état « Très Bon » ou « Bon » et il atteint 47% pour les 43 stations diagnostiquées en état « Moyen ». En conséquence, la seule prise en compte des herbiers à zostère dans le modèle GAMELag comme genre de référence aboutit dans près de 30% des cas (35 stations sur les 117 classées en état « Très Bon » / « Bon » / « Moyen ») à une sous-évaluation de la qualité du compartiment « Macrophyte ».

Au sein des genres opportunistes

De la même manière, la représentativité des genres *Gracilaria* et *Halopithys* pour les algues rouges et *Ulva*, *Cladophora* et *Chaetomorpha* pour les algues vertes est analysée, à chaque station, via le pourcentage de biomasse qu'elles représentent comparativement à la biomasse totale des genres opportunistes. Ces deux groupes fonctionnels représentent plus de 50% de cette biomasse totale sur près de 98% des 43 stations en état « Moyen » et près de 89% des 171 stations diagnostiquées en état « Médiocre » ou « Mauvais ». En conséquence, la prise en compte de ces 5 genres pour représenter les deux groupes fonctionnels opportunistes des algues rouges et vertes aboutit à une évaluation correcte des stations en état « Médiocre » ou « Mauvais » dans plus de 92% des cas (158 stations sur les 171).

En résumé

- ✓ La prise en compte dans le modèle GAMELag des genres *Gracilaria* et *Halopithys* pour les algues rouges et *Ulva*, *Cladophora* et *Chaetomorpha* pour les algues vertes est jugée suffisante pour rendre compte de l'état du compartiment « Macrophyte ».
- ✓ En revanche, la prise en compte des herbiers à zostère comme unique espèce de référence n'est pas suffisante pour permettre une évaluation fiable de l'état du compartiment « Macrophytes » à partir de l'indicateur DCE. Dans l'hypothèse où la conceptualisation de l'herbier à zostère au sein du modèle GAMELag devrait être améliorée il serait nécessaire de prendre en compte, en parallèle, d'autres espèces de référence. Au préalable à tout développement de l'outil en lien avec le calcul de l'indicateur DCE Macrophytes, il

conviendrait d'analyser finement les données afin de mettre à jour les espèces de référence à considérer en priorité. En première analyse et à titre indicatif, la prise en compte des 8 genres de référence identifiés comme majoritaires en termes de biomasse (Figure 1) en complément des 5 genres opportunistes déjà retenus aboutirait à une évaluation correcte des stations en état « Très Bon »/ « Bon » / « Moyen » dans 97% des cas.

4 Recherche de seuils de non-prolifération des algues opportunistes rouges et vertes

4.1 Seuils définis à partir d'une relation Etat – Biomasse

La détermination d'un seuil de non-prolifération d'algues vertes et d'algues rouges opportunistes a été faite en première approche en analysant les relations entre Etat et Biomasse pour les deux groupes fonctionnels. Il ressort de cette analyse qu'aucune corrélation significative n'existe entre l'état du compartiment et la biomasse des 2 groupes fonctionnels ($r^2=0.014$ pour la relation entre l'état et la somme des biomasses des algues vertes *Ulva*, *Cladophora* et *Chaetomorpha*) et $r^2=0.006$ pour la relation entre l'état et la somme des biomasses des algues rouges *Gracilaria* et *Halophithys*). Cette absence de corrélation s'explique par la forte variabilité des biomasses de ces 5 genres au sein des 5 classes d'état du compartiment « Macrophyte » (Figure 3).

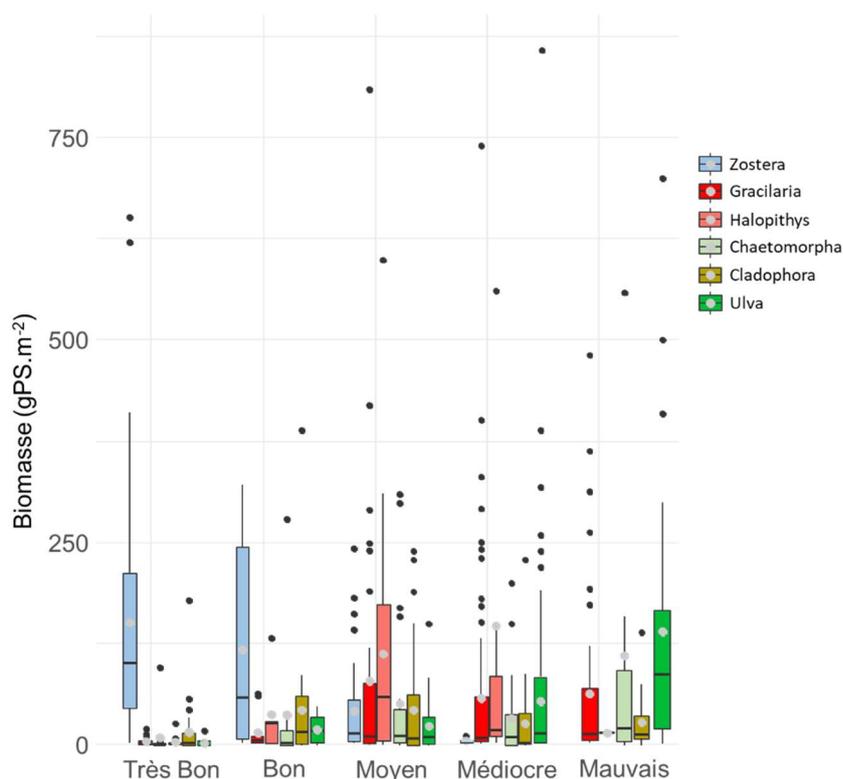


Figure 3 : Distribution de biomasses des 6 genres utilisés pour définir les 3 groupes fonctionnels (référence, algues rouges et algues vertes) en fonction de l'état du compartiment « Macrophyte ».

4.2 Recherche d'autres critères de sélection

Afin de mettre à jour de potentielles différences de biomasse entre les états bons et mauvais, un regroupement des données et différents critères de sélection ont été appliqués.

4.2.1 Critère 1 : fiabilité de l'estimation de l'état à partir des 3 groupes fonctionnels

L'analyse précédente ayant montré que la prise en compte des trois groupes fonctionnels permet d'évaluer correctement l'état du compartiment « Macrophyte » dans 74% des cas (les 212 stations de la diagonale du Tableau 6), une première sélection des données est faite en ne retenant que ces stations. En outre, sur ces 212 stations, seules sont conservées les 206 stations pour lesquelles la biomasse des algues opportunistes (rouges ou vertes) est non nulle.

Par ailleurs, l'objectif étant de mettre en évidence les différences de biomasse entre un bon et un mauvais état du compartiment « Macrophyte », il n'apparaît pas nécessaire de maintenir les distinctions entre les états « Très Bon » et « Bon » d'une part et les états « Médiocre » et « Mauvais » d'autre part. Le choix a été fait en revanche de distinguer l'état « Moyen » qui correspond à un état intermédiaire de transition. Un regroupement des stations est donc fait en ne considérant que 3 états distincts : un état « Très Bon à Bon »⁴, un état « Moyen » (inchangé) et un état « Médiocre à Mauvais »⁵. Ce regroupement, qui permet d'augmenter les effectifs au sein des deux nouvelles classes (n=42 pour l'état « Très Bon à Bon », n=140 pour l'état « Médiocre à Mauvais ») est en outre cohérent avec l'évaluation du bon état des eaux de surface au sens de la DCE qui impose un « Très bon » ou un « Bon » état écologique.

A l'échelle du groupe des algues opportunistes (sans distinguer les algues rouges et les algues vertes) des différences significatives⁶ de biomasses sont mises à jour entre l'état « Très Bon à Bon » (biomasse moyenne : 31.7 ± 57.8 gPS.m⁻²) et les deux autres états (251.7 ± 175.4 gPS.m⁻² pour l'état « Moyen » et 139.3 ± 161.3 gPS.m⁻² pour l'état « Médiocre à Mauvais »). Les distributions de biomasses au sein des états « Moyen » et « Médiocre à Mauvais » ne présentent pas de différence significative (Figure 4 – boxplots gris).

Lorsqu'on considère séparément les groupes des algues vertes et des algues rouges on retrouve, comme pour le groupe des « Opportunistes », des différences significatives entre l'état « Très Bon à Bon » et les deux autres états. En revanche pour chacun de ces deux groupes les différences de biomasse entre les états « Moyen » et « Médiocre à Mauvais » ne sont pas significatives.

⁴ L'état « Très Bon à Bon » ne fait plus la distinction entre les deux états et le critère retenu est un pourcentage de biomasse des espèces de référence supérieur ou égal à 50% de la biomasse totale.

⁵ L'état « Médiocre à Mauvais » ne prend plus en compte la richesse spécifique et le seul critère retenu est un pourcentage de biomasse des espèces de référence supérieur ou égal à 5% et strictement inférieur à 50% de la biomasse totale.

⁶ L'analyse des différences entre les distributions est faite avec un test non paramétrique de Kruskal-Wallis et un test post-hoc

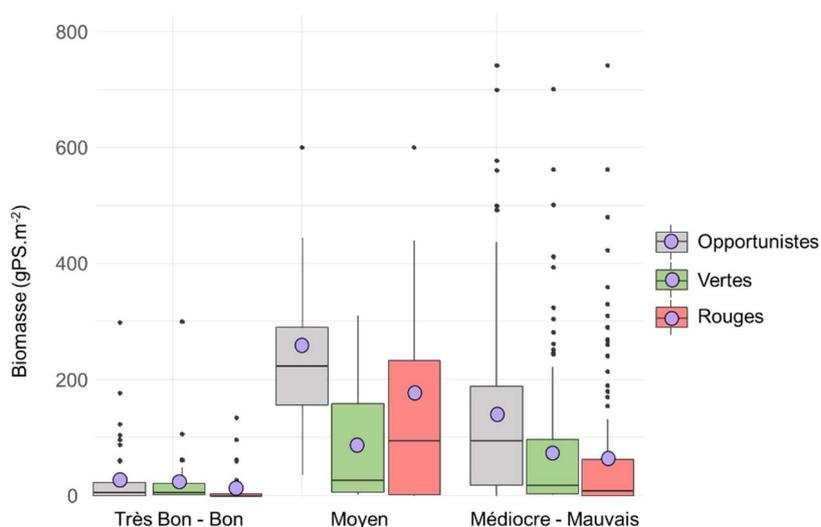


Figure 4 : Distribution de biomasses des 2 groupes fonctionnels (algues rouges et algues vertes) en fonction de l'état du compartiment « Macrophyte ».

Sur les stations en état « Très Bon à Bon » sur lesquelles des algues opportunistes sont présentes (n=42), les biomasses moyennes des algues vertes et rouges sont respectivement de 21.1 ± 49.6 gPS.m⁻² et 10.5 ± 27.6 gPS.m⁻² (Figure 4 – boxplots verts et rouges). Sur les stations en état « Moyen » (n=24), ces biomasses moyennes atteignent les valeurs les plus élevées, respectivement de 82.8 ± 105.1 gPS.m⁻² pour les algues vertes et 168.9 ± 212.8 gPS.m⁻² pour les algues rouges. Enfin, sur les stations en état « Médiocre à Mauvais » (n=140), ces biomasses moyennes diminuent respectivement à 71.1 ± 114.9 gPS.m⁻² pour les algues vertes et 68.1 ± 137.0 gPS.m⁻² pour les algues rouges.

Les densités de probabilité (Figure 5) permettent d'illustrer la représentativité des valeurs moyennes de biomasse comparativement aux secteurs de la distribution où les observations sont les plus nombreuses. Que ce soit pour les algues vertes (Figure 5-gauche) ou les algues rouges (Figure 5-droite), les densités maximales des distributions de biomasse des états « Très bon à bon », « Moyen » et « Médiocre à Mauvais » sont proches les unes des autres et inférieures aux valeurs moyennes de l'état « Très Bon à Bon ». Ces résultats questionnent sur la pertinence de définir des seuils uniquement sur la base des valeurs moyennes définies pour les 3 classes d'état.

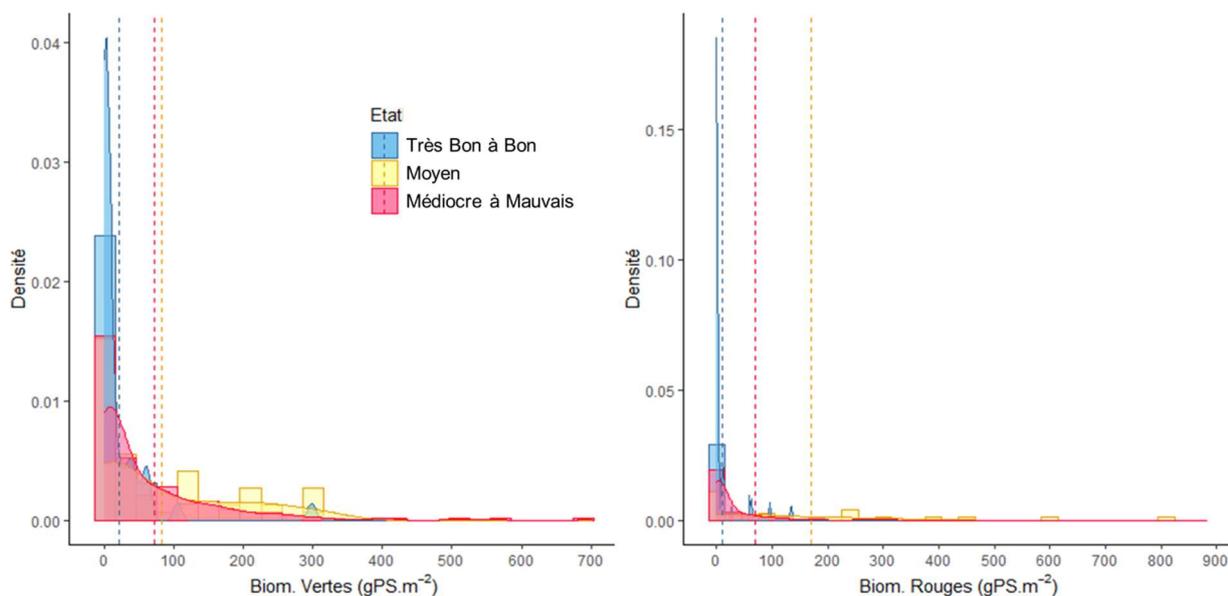


Figure 5 : Histogrammes et courbes de densité de biomasse des genres fonctionnels « Algues vertes » (à gauche) et « Algues rouges » (à droite), en fonction de l'état du compartiment « Macrophyte ». Les lignes verticales de couleur matérialisent les valeurs moyennes de biomasse pour chaque classe d'état.

4.2.2 Critère 2 : représentativité des groupes fonctionnels opportunistes

Une hypothèse supplémentaire est faite en considérant que lorsqu'un groupe fonctionnel donné domine largement la communauté des algues opportunistes, les différences de biomasse entre les classes d'état sont plus marquées dans la mesure où ce genre fonctionnel est le seul genre opportuniste (en association éventuelle avec le groupe fonctionnel de référence représenté par les herbiers) à intervenir dans la définition de l'état.

Une seconde sélection est donc faite en se basant sur la représentativité des groupes fonctionnels des algues rouges et vertes au sein de la communauté des « Opportunistes » présentes à chaque station et deux nouvelles classes de pourcentage de biomasse sont définies :

- Un des deux groupes (algues vertes ou rouges) est dominant, il représente entre 75 et 100% de la biomasse totale des « Opportunistes ». En conséquence, l'autre groupe (algues rouges ou vertes) représente moins de 25% de cette biomasse totale.
- Les deux groupes se répartissent la biomasse de façon relativement équilibrée, ils occupent entre 25 et 75% de la biomasse totale des « Opportunistes ».

Ce second critère, scinde ainsi le jeu de données en 3 sous-groupes :

- 88 stations sur lesquelles la biomasse des algues vertes est dominante et représente plus de 75% de la biomasse totale des opportunistes (sur ces stations, la biomasse des algues rouges y représente moins de 25%),
- 81 stations sur lesquelles la biomasse des algues rouges est dominante et représente plus de 75% de la biomasse totale des opportunistes (sur ces stations, la biomasse des algues vertes y représente moins de 25%),
- 37 stations sur lesquelles la biomasse totale des opportunistes est répartie de façon équilibrée entre les algues vertes et les algues rouges.

Analyse de la dominance du groupe fonctionnel des algues vertes

Sur les 88 stations où les algues vertes sont dominantes (Figure 6 - gauche), les biomasses moyennes des états « Très Bon à Bon » (n=22), « Moyen » (n=8) et « Médiocre à Mauvais » (n=58) sont respectivement de 33.4 ± 64.9 gPS.m⁻², 213.8 ± 69.6 gPS.m⁻² et 147.0 ± 143.5 gPS.m⁻².

Si cette condition supplémentaire ne permet pas de mettre à jour de différence significative entre les états « Moyen » et « Médiocre à Mauvais », elle accentue encore les différences significatives entre l'état « Très Bon à Bon » et les deux autres états.

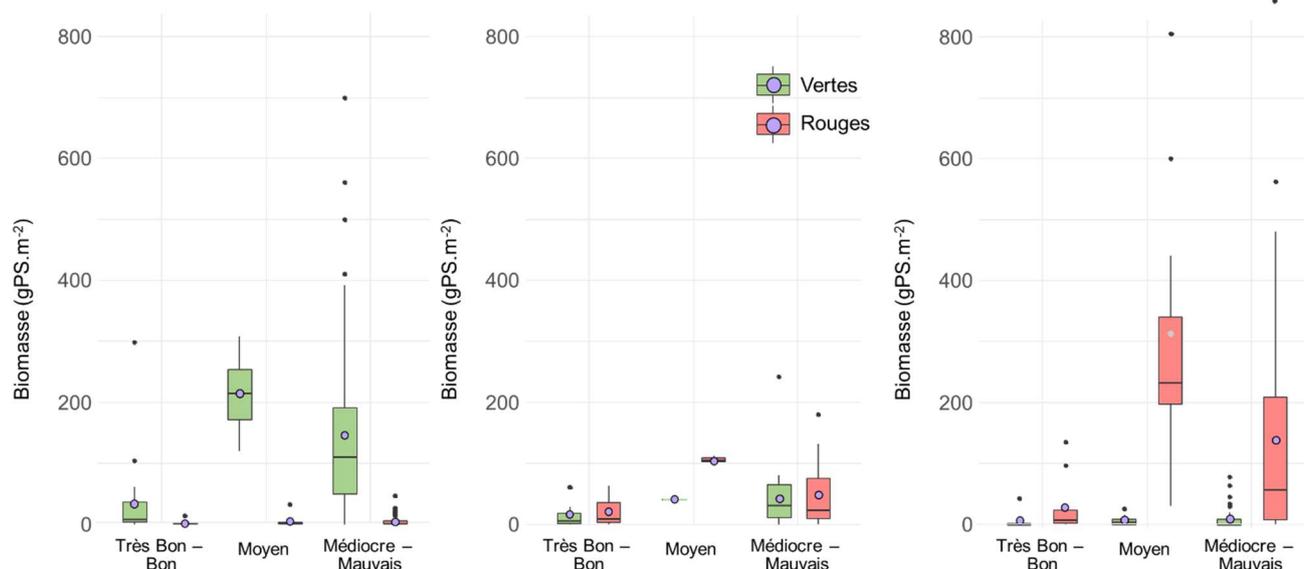


Figure 6 : Distribution de biomasses des 2 groupes fonctionnels opportunistes (algues rouges et vertes) en fonction de l'état du compartiment « Macrophyte » et de la composition des communautés opportunistes : (à gauche) : dominance des algues vertes ; (au centre) : répartition équilibrée entre les algues vertes et rouges ; (à droite) : dominance des algues rouges.

Analyse de la dominance du groupe fonctionnel des algues rouges

Sur les 81 stations où les algues rouges sont dominantes (Figure 6 - droite), les biomasses moyennes des états « Très Bon à Bon » (n=10), « Moyen » (n=12) et « Médiocre à Mauvais » (n=59) sont respectivement de 28.3 ± 47.3 gPS.m⁻², 312.8 ± 218.8 gPS.m⁻² et 138.7 ± 186.2 gPS.m⁻².

De même que pour les algues vertes, cette condition supplémentaire accentue les différences entre l'état « Très Bon à Bon » et les deux autres états et ne met pas à jour de différence significative entre les états « Moyen » et « Médiocre à Mauvais ».

4.3 Vers des seuils de non-prolifération des groupes fonctionnels opportunistes

Les traitements statistiques et les critères de sélection appliqués à la base de données « Macrophyte – RSL » ne permettent pas de mettre à jour des seuils de non-prolifération « sans équivoque », notamment du fait de la dispersion importante des valeurs de biomasse au sein des trois classes d'état. Ceci étant, lorsqu'on prend en compte la représentativité des groupes fonctionnels des algues vertes et rouges au sein de la communautés des « opportunistes », les courbes de densité de probabilité (Figure 7) apportent des renseignements semi-quantitatifs intéressants sur les distributions des biomasses d'algues opportunistes vertes et rouges en fonction de l'état du compartiment « Macrophyte ».

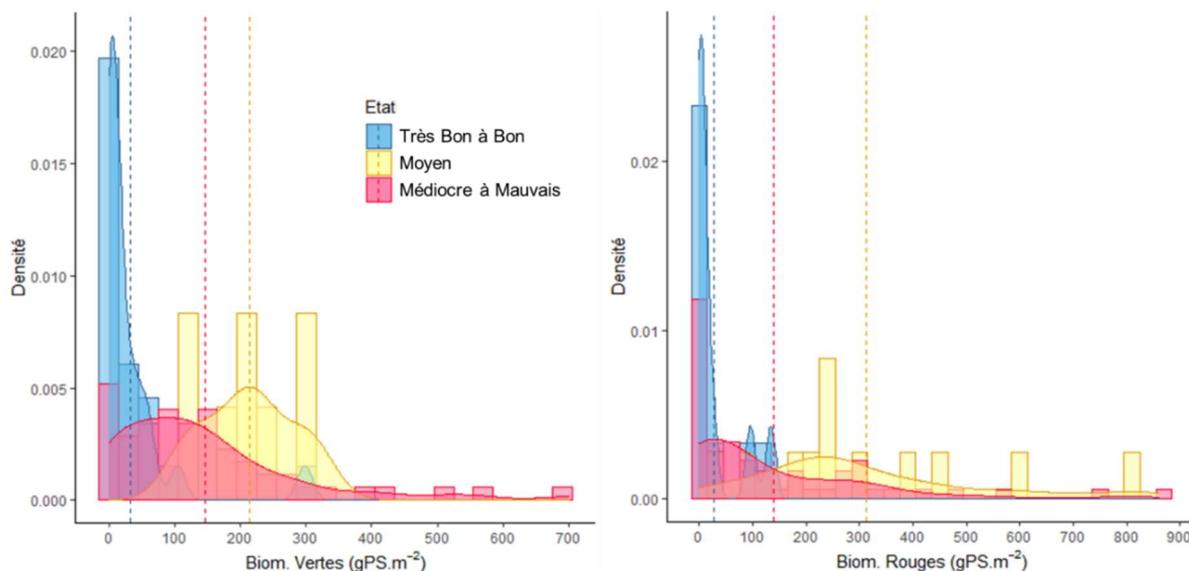


Figure 7 : Histogrammes et courbes de densité de biomasse des groupes fonctionnel en fonction de l'état du compartiment « Macrophyte », (à gauche) : Algues verte ; (à droite) : Algues rouges. Les lignes verticales de couleur matérialisent les valeurs moyennes de biomasse pour chaque classe d'état.

Il apparait que :

- les biomasses d'algues opportunistes (vertes et rouges) des stations en état « Très Bon à Bon » présentent une dispersion relativement modérée autour des valeurs moyennes et sont inférieures à 90 gPS.m⁻² dans plus de 90% des cas,
- les plus fortes biomasses d'algues opportunistes (vertes et rouges) sont observées sur les stations en état « Moyen » avec des densités de probabilité maximales autour de 200 gPS.m⁻². Les biomasses les plus élevées sont associées à des algues rouges,
- les stations en état « Médiocre à Mauvais » affichent en moyenne des biomasses d'algues opportunistes (vertes et rouges) plus faibles que les stations en état « Moyen ». Cette limitation de la production d'algues opportunistes dans des milieux en mauvais état vis-à-vis de l'eutrophisation est une conséquence de la compétition entre les macroalgues et le phytoplancton.

Lorsqu'on considère les 88 stations où les algues vertes sont dominantes, la courbe de densité de probabilité (Figure 7- gauche) met à jour un décalage entre la biomasse moyenne de l'état « Très Bon à Bon » et les densités de probabilité maximales des états « Médiocre à Mauvais » et « Moyen ». En se basant sur la pente décroissante des densités de probabilité des états « Très Bon à Bon » et la densité de probabilité maximale des état « Médiocre à Mauvais », **un seuil de non-prolifération de l'ordre de 80 gPS.m⁻² pourrait être proposé pour les algues vertes.**

En revanche, lorsqu'on considère les 81 stations où les algues rouges sont dominantes, la densité de probabilité maximale des états « Médiocre à Mauvais » reste très proche de la biomasse moyenne de l'état « Très Bon à Bon » (Figure 7- droite). Ainsi, cette forte densité vers de faibles valeurs de biomasse d'algues rouges pour les stations en état « Médiocre à Mauvais » **ne permet pas de proposer un seuil de biomasse d'algues rouges discriminant** entre un bon et un mauvais état.

5 Conclusions et perspectives

5.1 Conclusions

Dans la version actuelle du modèle GAMELag, le compartiment « Macrophyte » est décrit par 3 genres qui représentent trois groupes fonctionnels c'est-à-dire trois types différents de fonctionnement en termes de prise de nutriments et de croissance : le groupe fonctionnel des genres de référence représenté par *Zostera* ; le groupe fonctionnel des algues vertes opportunistes *Cladophora*, *Chaetomorpha* et *Ulva* représenté par le genre *Ulva* ; le groupe fonctionnel des algues rouges *Gracilaria* et *Halopithys* représenté par le genre *Gracilaria*.

La présente étude a confirmé que la prise en compte, au sein du modèle, des deux groupes fonctionnels opportunistes des algues vertes et rouges est suffisante pour évaluer l'état du compartiment « Macrophyte » dans la mesure où elle aboutit à une évaluation correcte des stations en état « Médiocre » ou « Mauvais » dans plus de 90% des cas.

En revanche, du fait de la conceptualisation trop simpliste des herbiers à zostère, qui n'inclut pas l'assimilation par le système racinaire des nutriments stockés dans le compartiment sédimentaire, le modèle sous-estime fortement la croissance de l'herbier lorsque les conditions environnementales sont favorables à son développement. Le modèle est donc dans l'incapacité d'estimer correctement l'état du compartiment « Macrophyte » à partir de l'indicateur DCE. Dans ce contexte, les objectifs de la présente étude étaient :

- de statuer sur la nécessité/pertinence d'affiner la formalisation des processus de croissance de l'herbier au sein du modèle afin d'améliorer l'estimation de l'indicateur DCE Macrophyte à partir des biomasses simulées,
- de proposer un nouveau descripteur du compartiment « Macrophyte » qui, couplé à la métrique DCE basée sur la biomasse phytoplanctonique, permettrait de s'assurer des conditions environnementales favorables au développement des herbiers à zostère (productions primaire et de macroalgues limitées compatibles avec des conditions de lumière suffisante pour la photosynthèse). Un seuil de non prolifération des algues opportunistes a ainsi été recherché.

Pour répondre à ces objectifs les données de biomasse de macrophytes, acquises sur 13 lagunes occitanes (soit 20 secteurs lagunaires et 253 stations) entre 2001 et 2006 dans le cadre des diagnostics RSL de ce compartiment, ont été analysées. Les principales conclusions de cette étude sont résumées ci-dessous.

Concernant le premier objectif, les conclusions sont les suivantes :

- ✓ La contribution des herbiers à zostère à la biomasse totale des espèces de référence est telle que la seule prise en compte de ces herbiers comme genre de référence dans le modèle aboutirait à une sous-évaluation de la qualité du compartiment « Macrophyte » sur près de 30% des stations classées en état « Très Bon », « Bon » ou « Moyen ».
- ✓ En conséquence, la prise en compte au sein du modèle GAMELag des herbiers à zostère comme unique espèce de référence n'est pas suffisante pour permettre une évaluation fiable de l'état du compartiment « Macrophytes » à partir de l'indicateur DCE. Ainsi, l'amélioration de la conceptualisation de l'herbier à zostère au sein du modèle n'aurait qu'un impact positif limité sur la capacité du modèle à reproduire l'indicateur DCE Macrophyte. Dans ce contexte, et compte-tenu de l'investissement en temps important que nécessiterait

ces développements, il n'apparaît pas pertinent de les mettre en œuvre dans le cadre de la démarche Flux Admissibles.

- ✓ En outre, au préalable à tout développement du compartiment « Macrophyte » à visée de recherche, il conviendra d'analyser finement la base de données RSL Macrophyte 2000-2006 afin d'identifier l'ensemble des espèces de référence à considérer en priorité au sein du modèle.

Concernant le second objectif et la recherche d'un seuil de non prolifération des algues opportunistes, les conclusions sont les suivantes :

- ✓ L'analyse des distributions de biomasse sur les stations où les algues vertes sont dominantes permet de proposer un seuil de non-prolifération de l'ordre de **80 gPS.m⁻²** pour ce groupe fonctionnel.
- ✓ En revanche, la probabilité non négligeable d'observer de faibles biomasses d'algues rouges dans des états « Médiocre à Mauvais » ne permet pas de proposer un seuil de non-prolifération pour ce groupe fonctionnel.

5.2 Perspectives

Les analyses réalisées sur l'amélioration du compartiment « Sédiment » du modèle GAMELag (cf. note « Sédiment ») ont mis en évidence le rôle clef du compartiment « Macrophytes » dans le contrôle des blooms estivaux de phytoplancton et des concentrations estivales en phosphate dans la colonne d'eau. Or à l'heure actuelle, en l'absence de données disponibles sur les biomasses d'algues opportunistes présentes dans le milieu, aucun critère de sélection sur ce compartiment n'est pris en compte lors de la phase d'optimisation de la paramétrisation du modèle sur un site nouveau.

Les informations quantitatives fournies par la présente étude permettent, en partie, de combler ces lacunes. Des plages de valeurs de biomasse d'algues opportunistes, en distinguant ou non les deux groupes fonctionnels, ont été estimées en fonction de l'état du compartiment « Macrophytes » (Tableau 7). Celles-ci pourront dorénavant être utilisées pour contraindre la production simulée d'algues opportunistes en fonction de l'état d'eutrophisation global de la lagune.

Tableau 7 : Plage de valeurs des biomasses (moyenne et écart type) d'algues opportunistes (rouges et vertes) et par groupe fonctionnel en fonction des états du compartiment « Macrophytes ». (*) Les valeurs présentées par groupe fonctionnel correspondent aux situations où le groupe est dominant (càd que la biomasse du groupe représente au moins 75% de la biomasse totale des opportunistes).

		ETAT DES MACROPHYTES		
		"Très Bon à Bon"	"Moyen"	"Mauvais à Médiocre"
Biomasse (en gPS.m ⁻²)	Opportunistes	31.7 ± 57.8	251.7 ± 175.4	139.3 ± 161.3
	Algues rouges(*)	28.3 ± 47.3	312.8 ± 218.8	138.7 ± 186.2
	Algues vertes(*)	33.4 ± 64.9	213.8 ± 69.6	147.0 ± 143.5

En outre, les informations qualitatives fournies par les distributions des deux groupes fonctionnels en fonction de l'état du compartiment « Macrophyte » aideront également à l'interprétation des résultats du modèle GAMELag, lors de l'analyse des scénarios de réduction des flux de nutriments où la réponse du compartiment « Macrophyte » et ses « trajectoires » d'évolution devront être analysées en parallèle à celles du compartiment « Phytoplancton ».

L'analyse des scénarios de réduction des flux d'azote et de phosphore construits sur la lagune de l'Or est présentée, à titre d'exemple, dans le rapport de synthèse des caractéristiques techniques et d'utilisation de l'outil (§ 7.2.2) comme illustration d'une analyse couplée de l'évolution des compartiments « Phytoplancton » et « Macrophytes ».