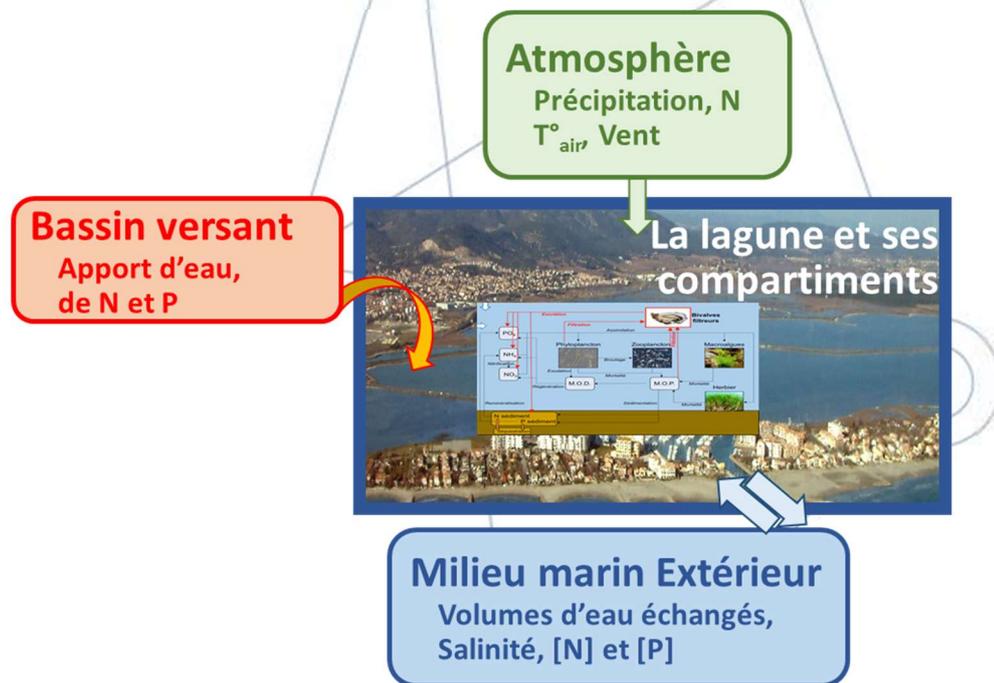


# Le modèle GAMELag pour l'étude du fonctionnement des écosystèmes lagunaires méditerranéens : synthèse

## des caractéristiques techniques et utilisation



Rapport final du contrat n° 20/1000831



## Fiche documentaire

<b>Titre du rapport : Le modèle GAMELag pour l'étude du fonctionnement des écosystèmes lagunaires méditerranéens : synthèse des caractéristiques techniques et utilisation</b>	
<b>Référence interne :</b> ODE/UL/LER/LR/22.15	<b>Date de publication :</b> 2022/09/13 <b>Version :</b> 1.0.0
<b>Diffusion :</b> <input checked="" type="checkbox"/> libre (internet)  <input type="checkbox"/> restreinte (intranet) – date de levée d’embargo : AAA/MM/JJ  <input type="checkbox"/> interdite (confidentielle) – date de levée de confidentialité : AAA/MM/JJ	<b>Référence de l'illustration de couverture</b> Crédit photo/titre/date  <b>Langue(s) :</b>
<p><b>Résumé/ Abstract :</b> 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. Depuis sa conception initiale en 2009, la démarche mise en œuvre en matière de développement de l'outil a volontairement été 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.</p> <p>Le présent document regroupe les éléments de synthèse des connaissances sur l'outil et vise à donner une vision générale, à l'échelle du bassin, des conditions de son déploiement, de ses limites d'utilisation et du soutien technique opérationnel qu'il peut apporter dans la mise en œuvre de la démarche « Flux Admissibles » portée par le Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux (SDAGE) Rhône Méditerranée Corse.</p> <p>Une première version de ce rapport, rédigée en novembre 2019 dans le cadre d'un contrat de collaboration entre l'Agence de l'Eau Rhône méditerranée Corse et l'Ifremer (n°2018 0158 - GAMELag II), proposait une synthèse des connaissances acquises durant les phases de développement de l'outil et de déploiement sur le site pilote de la lagune de Bages-Sigean.</p> <p>Cette seconde version constitue une mise à jour réalisée dans le cadre du Contrat de collaboration entre l'Agence de l'Eau Rhône méditerranée Corse et l'Ifremer (n°20/1000831 – GAMELag III) et intègre les améliorations apportées à l'outil notamment sur les compartiments « Macrophyte » et « Sédiment ». Les nouvelles méthodes d'analyse de scénario élaborées pour la détermination des Flux Admissibles sont également intégrées.</p> <p>Ce document n'est pas un rapport scientifique et technique en tant que tel mais il constitue un point d'étape actualisé sur le contenu du modèle GAMELag et son utilisation. Il pourra également servir de base à l'élaboration de différents documents de communication autour de l'outil.</p>	
<b>Mots-clés/ Key words :</b> Lagunes méditerranéennes, Outil d'aide à la gestion, Eutrophisation, Flux Admissibles	
<b>Comment citer ce document :</b>	
<b>Disponibilité des données de la recherche :</b>	
<b>DOI :</b>	

<b>Commanditaire du rapport :</b> Agence de l'Eau Rhône Méditerranée Corse	
<b>Nom / référence du contrat :</b> <input type="checkbox"/> Rapport intermédiaire (réf. bibliographique : XXX) <input checked="" type="checkbox"/> Rapport définitif (contrat 20/1000831)	
<b>Projets dans lesquels ce rapport s'inscrit</b> (programme européen, campagne, etc.) : Convention Cadre Ifremer – AE RMC	
<b>Auteur(s) / adresse mail</b>	<b>Affiliation / Direction / Service, laboratoire</b>
FIANDRINO Annie (annie.fiandrino@ifremer.fr)	Ifremer / ODE
PETE Romain	
GIRAUD Anaïs (Anais.GIRAUD@eaurmc.fr)	Agence de l'eau Rhône Méditerranée Corse / Délégation de Montpellier
PICARD Lucille	
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

<b>1</b>	<b>Préambule.....</b>	<b>9</b>
<b>2</b>	<b>Enjeux et objectifs .....</b>	<b>11</b>
<b>3</b>	<b>Comment est conceptualisée la lagune dans l’outil de modélisation GAMELag ? .....</b>	<b>13</b>
3.1	Quelques rappels théoriques .....	13
3.2	La lagune et ses interfaces avec le monde extérieur .....	13
3.3	Représentation de la lagune en « boîtes physiques ».....	13
3.4	Représentation de la lagune en « compartiments biogéochimiques ».....	14
<b>4</b>	<b>Que fait le modèle et comment fonctionne-t-il ? .....</b>	<b>15</b>
4.1	Quelques rappels théoriques et illustrations pratiques.....	15
4.1.1	Quelques rappels théoriques .....	15
4.1.2	... et leurs déclinaisons pratiques .....	15
4.2	Les hypothèses du modèle GAMELag .....	17
4.3	Les processus physiques et biogéochimiques pris en compte dans le modèle .....	17
4.3.1	Le module hydrologique.....	17
4.3.1.1	Description générale .....	17
4.3.1.2	Les processus de mélange .....	18
4.3.2	Le module biogéochimique .....	18
4.3.2.1	Le compartiment « Colonne d’eau » .....	19
4.3.2.2	Le compartiment « Phytoplancton ».....	19
4.3.2.3	Le compartiment « Zooplancton » .....	20
4.3.2.4	Le compartiment « Macrophyte ».....	20
4.3.2.5	Le compartiment « Sédiment » .....	20
4.3.2.6	Le compartiment « Détritique » .....	21
4.3.3	Illustration des sorties du modèle : évolution journalière des variables d’état.....	21
4.4	Définition des grandeurs mesurables à partir des variables d’état .....	22
4.4.1	Formes totales de l’azote et du phosphore dans la colonne d’eau .....	22
4.4.2	Chlorophylle <i>a</i> et abondances cellulaires en phytoplancton .....	22
4.4.3	Recouvrement végétal total et recouvrement par les espèces de référence.....	22
<b>5</b>	<b>Comment déployer le modèle sur une lagune ? Quelles étapes préalables ?.....</b>	<b>24</b>
5.1	Définition du nombre de boites .....	24
5.2	Définition des forçages physiques aux interfaces .....	25
5.2.1	Forçages à l’interface « Bassin versant - Lagune ».....	25
5.2.2	Forçages à l’interface « Atmosphère - Lagune » .....	27

5.2.3	Forçages à l'interface « Milieu marin extérieur - Lagune » .....	27
5.3	Définition des forçages biogéochimiques dans la lagune.....	28
5.4	Définition d'une situation « repère ».....	28
5.5	Sites sur lesquels le modèle est appliqué .....	28
<b>6</b>	<b>Quelles sont les limites d'utilisation du modèle ? .....</b>	<b>29</b>
6.1	Sensibilité du modèle à la paramétrisation .....	29
6.2	Confirmation de la capacité du modèle à atteindre les objectifs fixés sur chaque site	29
6.3	Observations <i>in situ</i> utiles à la confirmation du modèle .....	30
6.3.1	Données dans la colonne d'eau .....	30
6.3.2	Données dans les compartiments « Phytoplancton » et « Macrophyte » .....	30
6.4	Confirmation du modèle sur une lagune : exemple d'application sur la lagune de l'Or	30
6.4.1	Détermination des paramétrisations optimales.....	30
6.4.2	Que se cache-t-il derrière les paramétrisations ?.....	31
6.4.3	Incertitudes sur les produits de sortie .....	33
6.5	Limites actuelles d'utilisation du modèle .....	33
6.5.1	Compartiment « Macrophyte » .....	34
6.5.2	Compartiment « Sédiment ».....	35
6.5.3	Pistes d'amélioration des compartiments « Macrophyte » et « Sédiment » .....	36
<b>7</b>	<b>A quelles questions peut répondre le modèle ? .....</b>	<b>36</b>
7.1	Fonctionnement écologique d'une lagune : descripteurs du devenir de la matière (point 1).....	37
7.2	Flux admissibles en azote et phosphore (point 2) .....	39
7.2.1	Estimation des Flux Admissibles sur la lagune de Bages-Sigean.....	40
7.2.2	Analyse de scénarios sur la lagune de l'Or.....	41
7.3	Métriques et indicateurs DCE pour les compartiments « Colonne d'eau » « Phytoplancton », « Macrophyte » (point 3).....	43
<b>8</b>	<b>Conclusions et perspectives .....</b>	<b>43</b>
<b>9</b>	<b>Références bibliographiques .....</b>	<b>45</b>
<b>Annexe 1 : Variables d'état et système d'équations du modèle .....</b>		<b>49</b>
	Variables d'état.....	49
	Equations du module biogéochimique .....	50
	Equations différentielles des variables d'état biogéochimiques .....	50
	Paramètres des processus biogéochimiques par compartiments.....	62
<b>Annexe 2 : Méthodes de calcul du volume de mélange .....</b>		<b>67</b>
<b>Annexe 3 : Fiches de renseignement des données de forçage du modèle.....</b>		<b>69</b>
<b>Annexe 4 : Structure du modèle, arborescence, installation sur un PC et lancement .....</b>		<b>74</b>





## 1 Préambule

Ce document regroupe les éléments de synthèse des connaissances sur l'outil GAMELag, modèle dédié à l'étude du fonctionnement des écosystèmes lagunaires méditerranéens. Il vise à donner une vision générale, à l'échelle du bassin, des conditions de son déploiement.

Une première version de ce rapport, rédigée en novembre 2019, constituait le livrable de l'Axe 4 du Contrat de collaboration entre l'Agence de l'Eau Rhône méditerranée Corse et l'Ifremer (n°2018 0158 - GAMELag II) et proposait une synthèse des connaissances acquises dans le cadre du développement de l'outil et de son déploiement sur le site pilote de la lagune de Bages-Sigean.

Cette seconde version, rédigée en septembre 2022, constitue une mise à jour réalisée dans le cadre du Contrat de collaboration entre l'Agence de l'Eau Rhône méditerranée Corse et l'Ifremer (n°20/1000831 – GAMELag III) et intègre les améliorations apportées à l'outil ainsi que les nouvelles méthodes d'exploitation des résultats de simulation élaborées lors de l'application de l'outil sur différents sites et notamment sur la lagune de l'Or en 2021.

Ce document n'est pas un rapport scientifique et technique en tant que tel mais il constitue un point d'étape actualisé sur le contenu du modèle GAMELag et son utilisation. Il pourra également servir de base à l'élaboration de différents documents de communication autour de l'outil.



## 2 Enjeux et objectifs

Les écosystèmes lagunaires sont des milieux fragiles, au fonctionnement complexe et particulièrement exposés aux pollutions (notamment nutriments) et à l'artificialisation du fait de la forte anthropisation de leurs bassins versants. Compte tenu de leur faible connexion avec la mer via des canaux artificiels ou des graus naturels, elles accumulent les polluants dans la colonne d'eau et les sédiments. Ces derniers relarguent les nutriments, dans certaines conditions, ce qui réalimente le système. Ainsi plus de 80 % des masses d'eau lagunaires des bassins Rhône-Méditerranée et Corse ne sont pas en bon état (Derolez *et al.*, 2018), avec un enjeu particulier sur l'eutrophisation clairement identifié dans les SDAGE des deux bassins.

Que ce soit pour des enjeux liés à la pérennité des usages nécessitant un milieu de bonne qualité (conchyliculture, pêche, baignade, loisirs nautiques, etc.) ou liés à leur caractère patrimonial, la reconquête du « bon état » écologique des lagunes est une priorité.

La capacité de restauration de ces milieux vis-à-vis de l'eutrophisation dépend : i) des apports du bassin versant ; ii) de la structure et du fonctionnement des communautés biologiques (rôle dans le cycle de la matière, stockage des nutriments) ; iii) des échanges entre le compartiment benthique et la colonne d'eau (relargage sédimentaire en particulier) ; iv) de la capacité à exporter définitivement l'azote et le phosphore excédentaires.

Ainsi, répondre à la question de la capacité d'un milieu à se restaurer, ou encore du temps nécessaire à cette restauration, revient à :

- déterminer le poids, en termes de flux de matière échangés, des principales interfaces (bassin versant / lagune, mer / lagune, compartiment benthique / colonne d'eau),
- déterminer la capacité des compartiments biologiques (Phytoplancton, Zooplancton, Macrophytes) à stocker plus ou moins durablement la matière.

**Une telle description du fonctionnement du système fournit alors les bases solides essentielles à la gestion de ces milieux en permettant d'identifier les axes sur lesquels doivent porter les efforts de restauration et de suivi des écosystèmes.**

A l'heure actuelle, pour la plupart des lagunes en mauvais état touchées par l'eutrophisation, le poids de l'interface « Bassin versant » est prépondérant. Les apports polluants issus des bassins versants naturels et/ou artificiels de ces lagunes dégradées sont trop importants et supérieurs aux quantités qu'elles sont capables « d'absorber » sans remettre en cause leur équilibre. Ainsi, la caractérisation du poids de l'interface « Bassin versant / Lagune » passe par la notion de flux admissibles.

Le flux admissible par (...) une lagune (...) est la charge polluante maximale provenant de son bassin versant ne remettant pas en cause le respect de son objectif de qualité. Il correspond ainsi au cumul maximal, pour une substance, de rejets et émissions de polluants ponctuels et diffus dans son bassin versant permettant de respecter les objectifs de qualité (état écologique, état chimique, objectif spécifique aux usages eau potable, conchyliculture, baignade ...) du milieu (Disposition 5A-02 de l'orientation fondamentale 5 du SDAGE 2022-2027 du bassin Rhône-Méditerranée)

**La caractérisation des flux admissibles doit être engagée dans le cadre d'une démarche concertée, décidée par les acteurs locaux pour définir des objectifs adaptés de réduction/suppression des apports et mettre en œuvre les actions qui permettront de les atteindre.**

Le modèle GAMELag<sup>1</sup> est dédié à l'étude du fonctionnement des écosystèmes lagunaires en phase de restauration. Il est développé depuis 2009 dans le cadre de partenariats techniques et financiers entre l'UMR MARBEC et l'Agence de l'Eau Rhône Méditerranée Corse (Le Noc *et al.*, 2012 ; Pete *et al.*, 2017 ; Saguet *et al.*, 2019). Ses fondements s'inscrivent dans une démarche de recherche des échelles d'intégration des processus physiques et biogéochimiques pertinentes au regard des indicateurs mesurables de l'état des milieux lagunaires.

La restauration des milieux lagunaires eutrophisés est un processus lent (plusieurs années) qui concerne l'ensemble des compartiments biologiques de l'écosystème ; le modèle GAMELag a donc été conçu afin de rendre compte des trajectoires écologiques des lagunes sur des échelles de temps longues. **Il est basé sur une représentation de l'écosystème en « boîtes physiques » interconnectées, au sein desquelles le fonctionnement écologique de l'écosystème est décrit par l'évolution temporelle des stocks d'azote et de phosphore dans les principaux « compartiments biogéochimiques ».** La conceptualisation des interactions entre ces compartiments intègre les connaissances acquises ces dernières années dans les différents projets de recherche et les thèses<sup>2</sup> sur le fonctionnement des lagunes méditerranéennes eutrophisées ou en phase de restauration.

---

<sup>1</sup> Modèle d'aide à la Gestion des Aménagements sur les Milieux Eutrophisés Lagunaires

<sup>2</sup> Projets RESTOLAG, DEPART, MARESII, CAPATHAU, ORIGINS, RETRALAG, Thèse d'Ines Le Fur – Ifremer / AE RM&C, Thèse A. Lerustre UM/UMR MARBEC.

## 3 Comment est conceptualisée la lagune dans l'outil de modélisation GAMELag ?

### 3.1 Quelques rappels théoriques

Au sein d'un modèle numérique, la conceptualisation d'une réalité observée passe en premier lieu par la délimitation du « **système à étudier** », c'est-à-dire par la définition i) : du système dont on veut reproduire l'évolution et ii) : de son « **environnement extérieur** » dont l'évolution n'est pas simulée par le modèle mais qui interagit avec le système étudié et influe sur son évolution.

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.

**En tant que « système à étudier », la lagune est décrite dans le modèle GAMELag comme des « boîtes physiques » échangeant de l'azote et du phosphore avec l'environnement extérieur via différentes interfaces et abritant des « compartiments biogéochimiques » susceptibles de stocker plus ou moins durablement cette matière, voire de l'exporter définitivement.**

Le modèle d'écosystème a été initialement développé sur la lagune de Bages-Sigean qui constitue le site pilote d'application de l'outil. Par suite, une version du modèle dédiée à l'étude du fonctionnement des écosystèmes lagunaires exploités par la conchyliculture a été développée sur la lagune de Thau (Pete *et al.*, 2018a, b).

### 3.2 La lagune et ses interfaces avec le monde extérieur

L'« environnement extérieur » d'une lagune est représenté par les trois interfaces « **Atmosphère** », « **Bassins versants** », « **Milieu marin extérieur** ». Les interactions entre ces interfaces et la lagune sont décrites via **des données de forçage** qui doivent être définies en complément et en parallèle à toute mise en œuvre du modèle sur un site donné. Ces données de forçage permettent de caractériser les flux d'eau, de sel et de matière (azote et phosphore) aux trois interfaces en communication avec la lagune (cf. §.5.2).

### 3.3 Représentation de la lagune en « boîtes physiques »

Dans le modèle GAMELag, la description de la lagune (« système à étudier ») est basée sur un modèle en boîtes. Ce type d'outil est, en première approche, approprié pour traiter des questions du temps de restauration et des charges admissibles qui nécessitent de réaliser un grand nombre de simulations sur le moyen-long terme. Ces modèles d'écosystème en boîtes produisent des bilans de matière à l'échelle annuelle peu différents des modèles à haute résolution spatiale et temporelle (Ménesguen *et al.*, 2007) si, aux échelles de temps caractéristiques des processus impliqués dans la restauration, chaque boîte peut être considérée comme homogène.

L'hétérogénéité des masses d'eau au sein de l'écosystème peut être liée aux **propriétés intrinsèques** de la lagune ou à **des facteurs extérieurs**. Ceci étant, quelle que soit l'origine de l'hétérogénéité observée de façon durable dans un écosystème lagunaire, celle-ci conditionne le nombre de « boîtes physiques » qu'il conviendra d'introduire dans le modèle pour caractériser la lagune (cf. §.5.1). Ainsi une lagune sera représentée par une ou plusieurs boîtes (Figure 1).

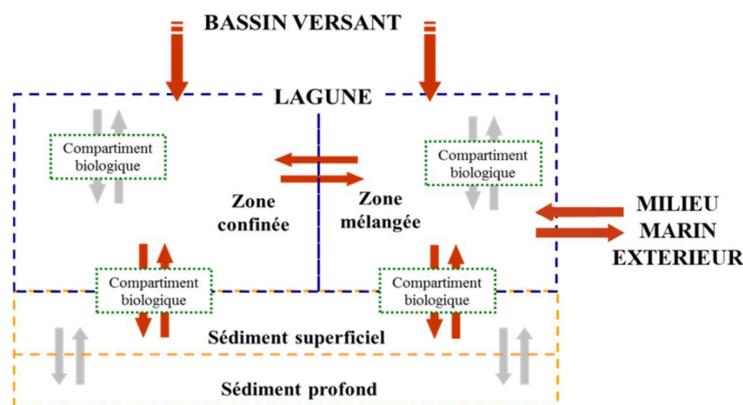


Figure 1 : Représentation schématique d'une lagune en « boîtes physiques » et « compartiments biologiques » et de ses interfaces

### 3.4 Représentation de la lagune en « compartiments biogéochimiques »

Au sein de chaque boîte, le fonctionnement écologique de la lagune est décrit en considérant les principaux compartiments de l'écosystème : « Colonne d'eau », « Phytoplancton », « Zooplancton », « Macrophyte », « Matière organique détritique », « Sédiment » (Figure 2).

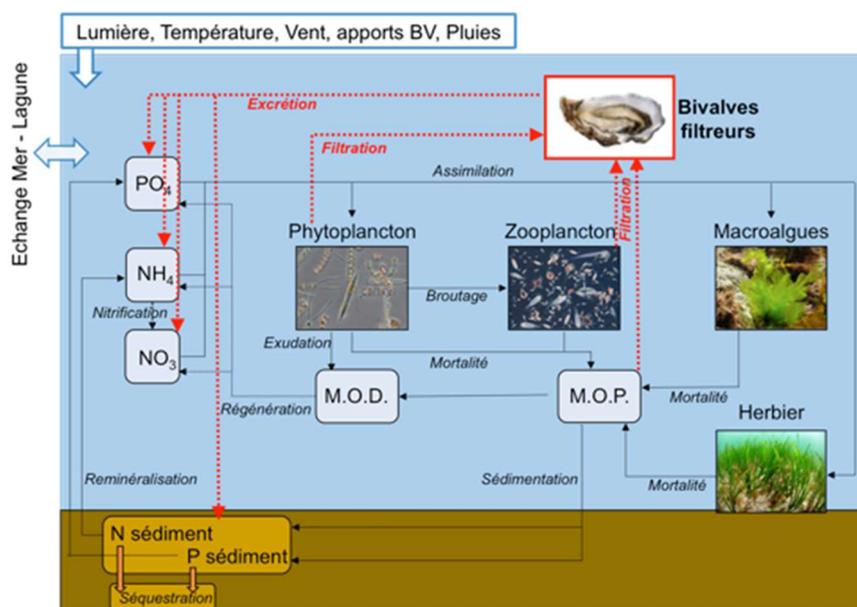


Figure 2 : Schéma conceptuel du module biogéochimique GAMELag présentant les compartiments et leurs interactions. Le modèle DEB-Huîtres et les interactions avec les autres compartiments de l'écosystème sont matérialisés en rouge.

Afin de décrire le fonctionnement des écosystèmes exploités par la conchyliculture, un compartiment « Huitres », basé sur un modèle de bilan énergétique de l'animal (modèle DEB)<sup>3</sup>, a été développé sur la lagune de Thau (Pete *et al.*, 2018a,b) et peut être couplé, si nécessaire, au modèle d'écosystème (compartiment et couplage optionnel matérialisés en rouge sur la Figure 2). La description du module « Huitres » et les modalités de couplage avec le module biogéochimique ne sont pas présentés dans le présent document.

<sup>3</sup> DEB = Dynamic Energy Budget

## 4 Que fait le modèle et comment fonctionne-t-il ?

Le modèle simule l'évolution des quantités d'azote et de phosphore stockées au sein des principaux compartiments de l'écosystème (compartiment benthique, phytoplancton, macrophytes, colonne d'eau) en fonction des flux de nutriments apportés par les bassins versants et échangés (exportés et importés) avec le milieu marin extérieur.

Les stocks de nutriments au sein des compartiments « Colonne d'eau », « Phytoplancton » et « Macrophyte » sont traduits en effets sur les métriques DCE et rendent compte de l'état de l'écosystème vis-à-vis de l'eutrophisation.

En faisant le lien entre l'état du milieu et les pressions auxquelles il est soumis, le modèle permet donc de travailler à la définition des flux admissibles et de tester l'impact de scénarios de réduction des apports sur les éléments de qualité (physico-chimie de l'eau, phytoplancton et macrophytes).

### 4.1 Quelques rappels théoriques et illustrations pratiques

#### 4.1.1 Quelques rappels théoriques ...

Au sein d'un modèle, le comportement du « système à étudier » est décrit à partir de **variables d'état** dont on est capable de formaliser l'évolution dans le temps et l'espace. Pour chaque variable d'état, une **équation d'évolution** traduit les liens entre cette variable et certaines **données de forçage** et/ou d'autres variables d'état. Ces liens sont formalisés via des **paramètres** dont les valeurs sont prédéfinies et invariables au cours d'une simulation. La résolution du système complet d'équations permet de décrire l'évolution du système dans un contexte donné (notamment en fonction de l'évolution des données de forçage). Cette formalisation du système est faite sous certaines hypothèses simplificatrices qui conditionnent, *in fine*, les limites d'utilisation du modèle.

#### 4.1.2 ... et leurs déclinaisons pratiques

La lagune, en tant que « système à étudier », est décrite par :

- les variables d'état du module hydrologique dont le nombre dépend du nombre de boîtes ( $2.n_B$ ). Un modèle à 2 boîtes est donc décrit par 4 variables d'état hydrologiques : la salinité journalière dans chaque boîte, le volume d'eau net journalier échangé avec la mer (bilan net des Entrées/Sorties), le volume d'eau net journalier échangé entre les boîtes,
- les 26 variables d'état du module biogéochimique. Concrètement, **ces variables d'état correspondent aux stocks journaliers d'azote** et si nécessaire **de phosphore** dans les compartiments biogéochimiques. La liste et la signification de ces variables d'état sont précisées au § 4.3.

Les relations entre ces variables d'état et leurs évolutions journalières sont formalisées via un système d'équations détaillé en Annexe 1. Concrètement **ces relations correspondent aux flux journaliers d'azote et de phosphore échangés entre les compartiments**, qui ont pour conséquence d'augmenter ou diminuer les stocks de matière au sein de ces différents compartiments.

A titre d'exemple, la Figure 3 illustre les processus qui agissent sur **la variable d'état associée au stock journalier d'azote dans la colonne d'eau sous forme de  $NH_4$**  (en grenat sur la Figure 3). Les flux qui alimentent ce stock de  $N_{NH_4}$  sont notés en rouge et concernent :

- les apports exogènes par les bassins versants et l'atmosphère. Ces apports sont définis par les conditions de forçage à ces deux interfaces (cf. §.5.2),

- la reminéralisation de l'azote par le zooplancton lors du broutage du phytoplancton. Les stocks d'azote dans ces deux compartiments biologiques sont représentés par les variables d'état :  $N_{Zoo}$  (en orange sur la Figure 3) et  $N_{Phyto}$  (en vert foncé),
- la reminéralisation de la matière organique (en brique). Quatre variables d'état sont nécessaires pour représenter les stocks d'azote dans ce compartiment détritique (cf. §.4.3.2.6),
- la reminéralisation de l'azote sédimentaire représenté par une variable d'état  $N_{Sed}$  (en marron).

Les flux qui ont tendance à réduire ce stock d'ammonium sont notés en bleu et concernent l'assimilation par le phytoplancton, les macroalgues (en vert clair sur la Figure 3) et les herbiers à zostère (en bleu).

Les flux échangés avec le milieu marin extérieur, engendrés par les phénomènes de mélange entre les eaux lagunaires et les eaux du milieu marin extérieur sont bidirectionnels avec l'exportation de l'ammonium stocké dans la colonne d'eau de la lagune et l'importation de l'ammonium contenu dans les eaux du milieu marin extérieur. Ces phénomènes sont décrits par les conditions de forçage définies pour le volume de mélange (cf. §.4.3.1.2 et Annexe 2) et les concentrations de matière dans le milieu marin extérieur (cf. §.5.2.3).

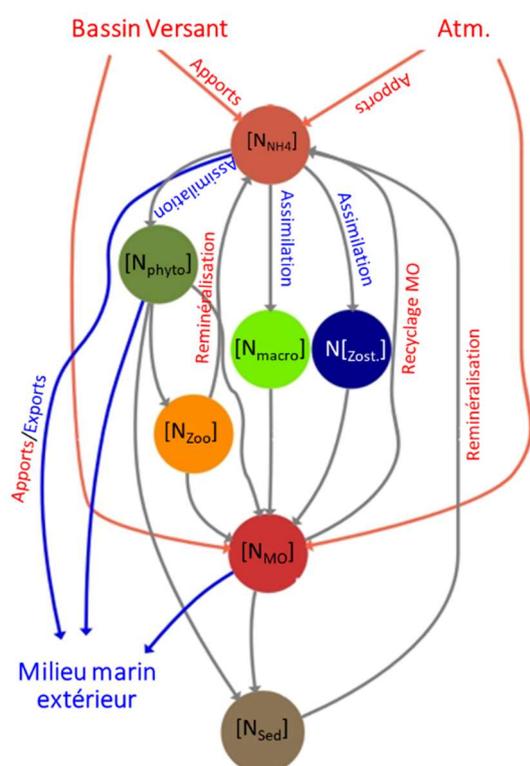


Figure 3 : Représentation schématique des processus qui agissent sur la variable d'état  $[NH_4]$  correspondant au stock journalier d'ammonium dans la colonne d'eau (grenat). Les autres disques matérialisent les variables d'état associées aux stocks d'azote dans les compartiments : Phytoplancton (vert foncé), Zooplancton (orange), Macroalgues opportunistes (vert clair), Herbiers à zostère (bleu), Matière organique détritique (rouge), Sédiment (marron). Les flèches matérialisent les flux entre ces différents compartiments et sont orientées dans le sens du compartiment « Emetteur » vers le compartiment « Récepteur ».

Le système complet d'équations du modèle fait intervenir **120 paramètres** qui contrôlent l'intensité des liens entre les variables d'état. Ces paramètres sont au nombre de : 2 pour le compartiment « Colonne d'eau » ; 18 pour le compartiment « Phytoplancton » ; 20 pour le compartiment « Zooplancton » ; 54 pour le compartiment « Macrophyte » ; 20 pour le compartiment « Détritique » ; 6 pour le compartiment « Sédiment » (cf. liste détaillée des paramètres en Annexe 1). Avant toute simulation, les valeurs de ces paramètres sont fixées et restent invariables durant toute la simulation. **Une telle combinaison de valeurs pour les 120 paramètres du modèle constitue une paramétrisation.**

La phase de calibration du modèle va consister à modifier une partie des valeurs des 120 paramètres pour trouver la meilleure paramétrisation possible, c'est-à-dire celle qui minimise les écarts entre les résultats de simulation et les observations *in situ* (cf. §.6.4).

## 4.2 Les hypothèses du modèle GAMELag

Dans le modèle GAMELag, la conceptualisation du fonctionnement hydrodynamique et biogéochimique de la lagune est basée sur plusieurs hypothèses simplificatrices :

*Du point de vue spatial :*

- l'écosystème est considéré comme homogène au sein de « boîtes physiques » prédéfinies et la colonne d'eau dans chacune de ces boîtes est supposée parfaitement mélangée,
- dans le cas où la lagune est découpée en plusieurs boîtes physiques, une **seule boîte peut être en connexion avec le milieu marin extérieur** et une boîte ne peut pas avoir plus de deux interfaces avec les autres boîtes (y compris le « milieu marin extérieur »).

*Du point de vue temporel :*

- le volume des boîtes reste constant au cours du temps. Cette hypothèse apparaît comme une simplification pertinente si on s'intéresse à des variations annuelles, saisonnières, voire hebdomadaires. Elle n'est, en revanche, pas valable sur des durées courtes (infra-journalière - type des variations semi-diurnes induites par la marée, ou de quelques jours - type événements pluvieux, propagation de panache de cours d'eau en crue) ou pour les lagunes dont le grau a un fonctionnement naturel, susceptible de se fermer sur de longues périodes.

*Du point de vue des processus hydrologiques :*

- L'interface « Bassin Versant » regroupe les bassins versants naturels, qui alimentent la lagune en eaux douces, et les canaux artificiels qui peuvent apporter des eaux de salinité non nulle.
- A l'interface avec le « **Milieu marin extérieur** » les échanges se font dans les deux sens via les phénomènes de mélange (cf. §.4.3.1.2 et Annexe 2), avec l'exportation **d'eaux saumâtres et importations d'eaux marines**.

*Du point de vue des processus biogéochimiques :* les principales hypothèses simplificatrices concernent les compartiments « Macrophyte » et « Sédiment » (cf. § 4.3.2.4 et 4.3.2.5 pour plus de détails).

## 4.3 Les processus physiques et biogéochimiques pris en compte dans le modèle

La résolution des processus hydrologiques et biogéochimiques qui gouvernent l'évolution des  $2 \times n_B$  variables d'état hydrologiques et des 26 variables d'état biogéochimiques est découplée au sein du modèle c'est-à-dire que le modèle gère les processus hydrologiques à un pas de temps journalier et les processus biogéochimiques à un pas de temps de 20 minutes.

### 4.3.1 Le module hydrologique<sup>4</sup>

#### 4.3.1.1 Description générale

**Le module hydrologique pilote tout ce qui concerne les échanges d'eau et de salinité** (Figure 4).

En fonction des apports d'eau douce par le bassin versant naturel, les canaux artificiels, les précipitations et des exportations par évaporation, le module hydrologique calcule les variables d'état correspondant aux **volumes résiduels échangés avec la mer ( $V_R$ ) et entre les boîtes ( $V_R^{Int}$ )<sup>5</sup>**. Ces volumes correspondent aux bilans nets journaliers échangés à ces deux interfaces et sont exprimés en  $m^3$ .

<sup>4</sup> Pour une question de simplicité, le nombre de boîte ( $n_B$ ) est fixé à 2 dans tout ce qui suit.

<sup>5</sup> Le nombre de variables d'état correspondantes aux volumes résiduels échangés entre les boîtes est égal au nombre de boîtes  $n_B-1$

En fonction de ces volumes résiduels journaliers et du **volume de mélange** (cf. §. 4.3.1.2), le module hydrologique calcule la variable d'état **Salinité** dans les deux boîtes ( $S_{bi}$ ).

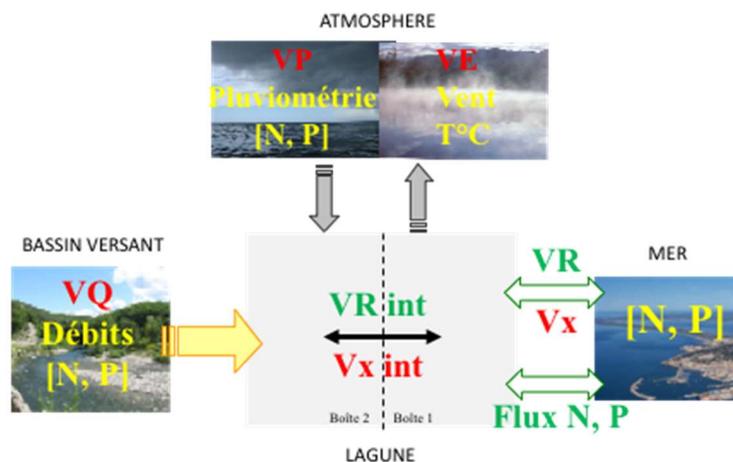


Figure 4 : Représentation des « boîtes physiques » de la lagune et des échanges aux interfaces via les données de forçage (rouge et jaune) et les variables d'état du modèle (vert). Les volumes  $VP$ ,  $VE$ ,  $VQ$  correspondent respectivement aux volumes apportés par les précipitations, évaporés et apportés par les cours d'eau. Les volumes  $Vx$  et  $Vx_{int}$  correspondent respectivement aux volumes de mélange avec la mer et interne à la lagune. Les volumes  $VR$  et  $VR_{int}$  correspondent respectivement aux volumes nets échangés avec la mer et entre les boîtes.

La température de l'eau, qui contrôle de nombreux processus biogéochimiques, n'est pas une variable d'état du modèle. Les variations temporelles de cette grandeur hydrologique sont décrites dans le modèle par des données de forçage.

#### 4.3.1.2 Les processus de mélange

La notion de « volume de mélange » a été introduite par Gordon *et al.*, (1996) dans le modèle LOICZ de bilan de matière. Cette variable conceptuelle ( $V_x$ ) correspond au volume d'eau qui oscille journalièrement entre la mer et la lagune, en admettant que ce volume entre dans la lagune sous forme d'eau de mer, se mélange parfaitement avec un volume équivalent d'eau lagunaire, pour ressortir sous forme d'eaux saumâtres. Cette variable conceptuelle traduit notamment les entrées/sorties d'eau sous l'action de la marée, échanges qui se compensent exactement à l'échelle d'un cycle de marée (la journée) et ne sont pas pris en compte dans le volume résiduel journalier ( $V_R$ ).

De façon équivalente, lorsque la lagune est décrite par plusieurs boîtes, il est nécessaire de définir les volumes de mélange internes ( $V_x^{int}$ ) qui correspondent aux volumes d'eau qui oscillent entre deux boîtes adjacentes et se compensent exactement à l'échelle de la journée.

Dans la version actuelle du modèle, nous ne disposons pas d'équations d'évolution pour ces variables « volume de mélange ». Elles sont donc décrites par des données de forçage qui doivent être définies en amont du modèle GAMELag. Différentes méthodes de calcul de séries temporelles de volume de mélange sont décrites en Annexe 2.

#### 4.3.2 Le module biogéochimique

**Le module biogéochimique pilote la biologie, la physico-chimie de l'eau et celle du sédiment. Il rend compte des interactions entre les différents compartiments susceptibles de stocker la matière** (Figure 5).

Les évolutions temporelle et spatiale des 26 variables d'état dédiées à la description du fonctionnement biogéochimique de la lagune sont régies par les modules hydrologique et biogéochimique pour les 13 variables d'état susceptibles d'être échangées entre les boîtes et avec la mer (Annexe 1) et par le module biogéochimique uniquement pour les variables d'état fixées dans les boîtes. Le pas de temps du module

biogéochimique est de 10 minutes, cette échelle infra-journalière permet de rendre compte des processus nycthéméraux<sup>6</sup>.

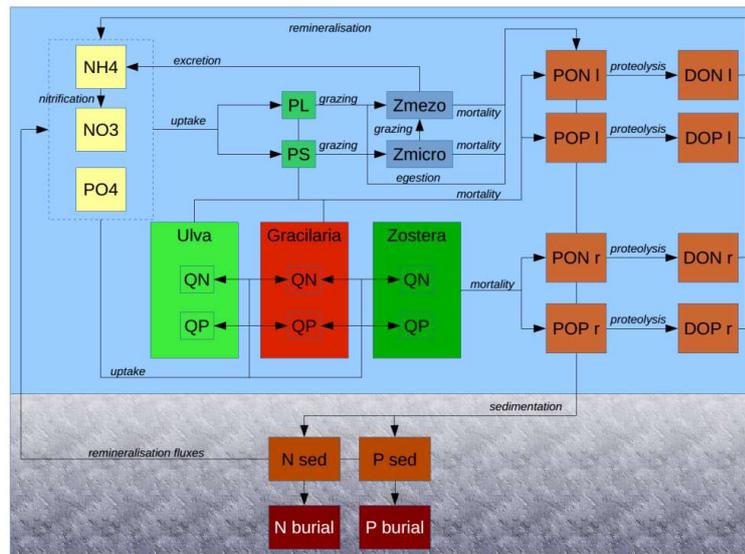


Figure 5 : Variables d'état du modèle biogéochimique GAMELag et leurs interactions

#### 4.3.2.1 Le compartiment « Colonne d'eau »

Les **nutriments** dans la colonne d'eau sont décrits par trois variables d'état (**NH<sub>4</sub>**, **NO<sub>3</sub>**, **PO<sub>4</sub>**). Elles sont exprimées respectivement en  $\text{mmolN.m}^{-3}$  et  $\text{mmolP.m}^{-3}$ . Ce sont principalement sous ces trois formes que les nutriments sont apportés par les bassins versants. Cette distinction entre les deux formes minérales de l'azote permet d'exploiter des caractéristiques différentes chez les organismes (phytoplancton et macrophytes) utilisant cette matière minérale en termes de quantité incorporée et de vitesse d'incorporation de ces nutriments.

#### 4.3.2.2 Le compartiment « Phytoplancton »

Le phytoplancton est décrit par deux variables d'état (**PS** et **PL**) correspondant à deux classes de taille : le **petit phytoplancton** (PS < 3-5  $\mu\text{m}$ , appelé pico et nanophytoplancton) et le **grand phytoplancton** (PL > 5  $\mu\text{m}$ , microplancton). Ces variables correspondent au contenu en azote du phytoplancton et sont exprimées en  $\text{mmolN.m}^{-3}$ . Le contenu en phosphore de ces deux classes de taille est obtenu à partir des variables d'état (PS et PL) et du rapport de Redfield ( $\text{N:P}_{\text{Phyto}}$ ).

Ces deux variables bénéficient d'une paramétrisation adaptée aux espèces lagunaires : leurs réponses à des apports de matière sont spécifiques (selon la quantité ou la forme - **NO<sub>3</sub>**, **NH<sub>4</sub>** ou **PO<sub>4</sub>** - ou selon le type d'apport soudain ou continu) et les phénomènes de compétition pour les ressources disponibles au sein du compartiment phytoplancton sont également simulés.

Les processus physiologiques du phytoplancton explicitement reproduits dans le modèle sont les limitations par la lumière, la température, la prise d'azote et de phosphore sous leurs formes minérales, l'exudation (relargage de matière organique dissoute), la lyse cellulaire et la sédimentation du grand phytoplancton. Une préférence du petit phytoplancton pour l'ammonium est introduite dans le modèle ce qui lui confère un avantage sur le grand phytoplancton en fonction des saisons.

<sup>6</sup> Processus dépendant du cycle biologique correspondant à une période de vingt-quatre heures et comprenant une nuit et un jour.

#### 4.3.2.3 Le compartiment « Zooplancton »

Le zooplancton est décrit par deux variables d'état (**ZS** et **ZL**) correspondant à deux classes de taille : le **micro-** et le **méso-zooplancton**. Ces variables correspondent au contenu en azote du zooplancton et sont exprimées en  $\text{mmolN.m}^{-3}$ . Le contenu en phosphore de ces deux classes de taille est obtenu à partir des variables d'état (ZS et ZL) et du rapport N:P dans le zooplancton ( $\text{N:P}_{\text{Zoo}}$ ).

Ce compartiment régule et contraint la quantité de phytoplancton et constitue une voie de transfert de matière vers les échelons trophiques supérieurs (non pris en compte dans le modèle). Le microzooplancton (ZS) exerce une pression de broutage sur le petit phytoplancton (PS) alors que le mésozooplancton (ZL) est capable de se nourrir de petit et de grand phytoplancton (PS et PL) et de microzooplancton (ZS). Lorsqu'ils exercent cette pression de broutage, ces deux compartiments zooplanctoniques reminéralisent l'azote sous forme de  $\text{NH}_4$  et participent à la production de matière détritique particulaire (cf. §.4.3.6). La croissance de ces deux classes de zooplancton est également contrôlée par la température de l'eau.

#### 4.3.2.4 Le compartiment « Macrophyte »

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 la variable d'état **Zostera** ; le groupe fonctionnel des algues vertes opportunistes *Cladophora*, *Chaetomorpha* et *Ulva* représenté par la variable d'état **Ulva** ; le groupe fonctionnel des algues rouges *Gracilaria* et *Halopithys* représenté par la variable d'état **Gracilaria**. Ces trois variables d'état **Ulva**, **Gracilaria** et **Zostère** correspondent aux biomasses de chaque espèce et sont exprimées en  $\text{gPS.m}^{-3}$  pour les ulves et les gracilaires et en  $\text{pPS.m}^{-2}$  pour les zostères. Ces trois espèces de macrophytes témoignent d'un rôle différent dans les cycles de l'azote et du phosphore au sein de la lagune (Le Fur *et al.*, 2018b ; Le Fur *et al.*, 2019).

Parmi les spécificités données à ces trois types de macrophytes, il faut retenir leur capacité à stocker de la matière en fonction de quotas cellulaires (correspondant à six variables d'état supplémentaires **Q<sub>N</sub>ULva**, **Q<sub>N</sub>Gracilaria**, **Q<sub>N</sub>Zost** et **Q<sub>P</sub>ULva**, **Q<sub>P</sub>Gracilaria**, **Q<sub>P</sub>Zost**) avant de la transformer en biomasse. Elles sont respectivement exprimées en  $\text{mmolN.gPS}^{-1}$  et  $\text{mmolP.gPS}^{-1}$ . Ces trois macrophytes bénéficient de quotas cellulaires différents (paramétrisation distincte), leur permettant de répondre spécifiquement à différentes conditions environnementales comme la limitation nutritive ou la possibilité de stockage lors d'apports en nutriments plus importants.

A noter toutefois que la capacité de l'herbier à puiser l'azote et le phosphore dans le sédiment via ses racines n'est pas prise en compte.

#### 4.3.2.5 Le compartiment « Sédiment »

Le compartiment benthique est décrit par deux variables d'état **Nsed** et **Psed** qui correspondent aux quantités d'azote et de phosphore dans le sédiment. Elles sont exprimées respectivement en  $\text{mmolN.m}^{-2}$  et des  $\text{mmolP.m}^{-2}$ . Les processus pris en compte dans l'évolution des stocks d'azote et de phosphore dans le sédiment sont les flux des formes minérales et organiques à l'interface avec la colonne d'eau. Deux méthodes peuvent être utilisées dans le modèle pour estimer ces flux de matière : i) : prise en compte des processus de reminéralisation de la matière organique qui dépendent de la température de l'eau, des stocks sédimentaires d'azote et de phosphore et permettent d'en reminéraliser une partie vers la colonne d'eau, sous forme de  $\text{NH}_4^+$  et de  $\text{PO}_4$  respectivement (Cugier *et al.*, 2005 ; Ménesguen *et al.*, 2019) ; ii) : des flux saisonniers constants mesurés dans des carottes sédimentaires prélevées aux quatre saisons dans différentes lagunes languedociennes selon un gradient d'eutrophisation (Ouisse *et al.*, 2013 ; Ouisse *et al.*, 2014). Par souci de simplicité, dans la suite de ce document, la méthode basée sur la modélisation du cycle

de l'azote et du phosphore dans les sédiments sera notée modèle « simple » et la méthode basée sur les flux mesurés sera notée formalisme « Flux mesurés ».

#### 4.3.2.6 Le compartiment « Détritique »

Ce compartiment est décrit par six variables d'état qui distinguent les formes de l'azote et du phosphore organique particulaire (PON, POP) et dissous (DON, DOP) et considèrent des voies de recyclage avec des cinétiques distinctes selon que la matière organique est considérée comme labile (dégradation rapide) ou réfractaire (dégradation lente) :  $PON = PON_L + PON_R$ ,  $POP = POP_L + POP_R$  et  $DON = DON_L + DON_R$ ,  $DOP = DOP_L + DOP_R$  (Figure 6).

A l'échelle de l'année, ces processus permettent le retour d'une partie des nutriments assimilés par les différents compartiments biologiques vers les formes minérales de l'azote  $NO_3$ ,  $NH_4$  et du phosphore  $PO_4$ .

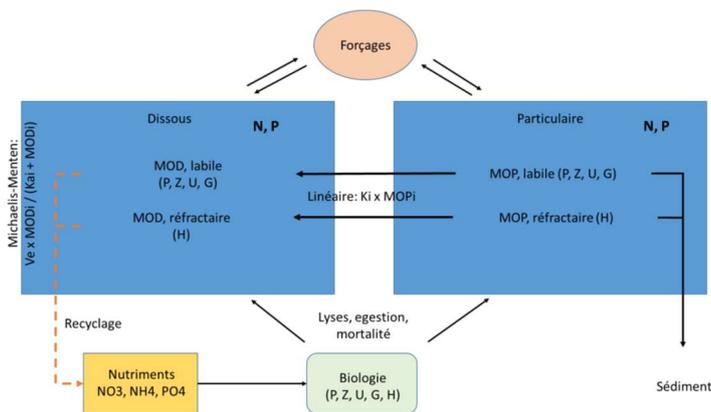


Figure 6 : Schéma conceptuel du recyclage de la matière organique particulaire (POM) et dissoute (DOM) produite dans la lagune. Cette matière se distingue en fraction labile (dégradation rapide) et réfractaire (dégradation lente). Elle est ensuite recyclée en nutriments à nouveau disponibles pour la biologie ( $K_i$  : constante d'hydrolyse ;  $K_{ai}$  : constante de demi-saturation ;  $VE$  : vitesse maximale d'hydrolyse, avec  $i = l$  ou  $r$ , pour les formes labiles et réfractaires).

#### 4.3.3 Illustration des sorties du modèle : évolution journalière des variables d'état

Les résultats de simulations correspondent aux valeurs journalières des variables d'état du modèle, sur toute la durée de la simulation et dans chaque boîte. Les résultats obtenus sur la lagune de Bages-Sigean pour la salinité et les 26 variables du module biogéochimique sont présentés à titre d'exemple sur la Figure 7.

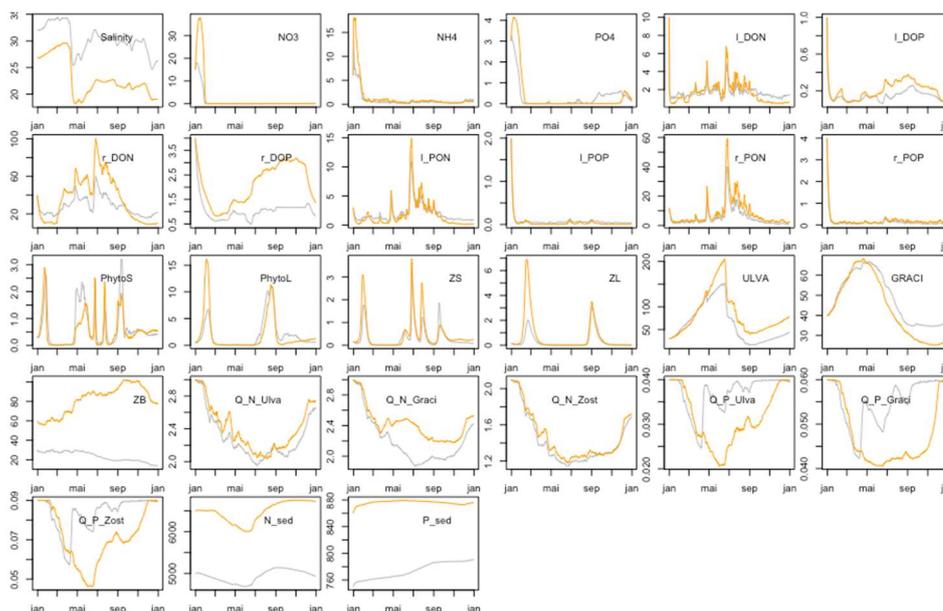


Figure 7 : Evolution temporelle sur l'année 2002, sur la lagune de Bages-Sigean, de la salinité et des 26 variables d'état du module biogéochimique. Les bassins sud et nord sont représentés en gris et orange respectivement.

## 4.4 Définition des grandeurs mesurables à partir des variables d'état

Les grandeurs mesurables nécessaires au calcul des indicateurs DCE sont estimées, lorsque cela est possible, à partir des variables d'état du modèle.

### 4.4.1 Formes totales de l'azote et du phosphore dans la colonne d'eau

Les formes totales de l'azote (respectivement du phosphore) dans la colonne d'eau sont obtenues en sommant les formes inorganiques dissoutes, les formes organiques dissoutes et particulaires et l'azote (respectivement le phosphore) stocké dans les deux classes de taille de phytoplancton.

$$N_T = NH_4 + NO_3 + DON_L + DON_R + PON_L + PON_R + PS + PL$$

$$P_T = PO_4 + DOP_L + DON_R + PON_L + PON_R + (PS + PL)/N:P_{\text{Phyto}}$$

### 4.4.2 Chlorophylle *a* et abondances cellulaires en phytoplancton

#### *Chlorophylle a*

La concentration en chlorophylle *a* (exprimée en  $\mu\text{g.L}^{-1}$ ) est estimée à partir de la somme des concentrations des deux classes de phytoplancton (PS et PL) et d'un facteur de conversion :

$$1 \text{ mmolN.m}^{-3} \text{ contenue dans le phytoplancton} = 1\text{-}4 \mu\text{g.L}^{-1} \text{ de chlorophylle } a.$$

Les concentrations en chlorophylle *a* sont utilisées pour calculer la métrique « Biomasse phytoplanctonique » intervenant dans l'EQR Phytoplancton (cf. §.).

#### *Abondances phytoplanctoniques*

Une étude portant sur 24 lagunes méditerranéennes (Bec *et al.*, 2011) a mis à jour des relations non linéaires entre les abondances cellulaires en picophytoplancton (pico-eucaryote autotrophe), et nanophytoplancton (exprimées en  $10^6$  cellules.L<sup>-1</sup>) et la chlorophylle *a* (exprimée en  $\mu\text{g.L}^{-1}$ ) :

$$\text{abondance(PEUK)} = \text{chlo } \alpha^{1,23} \times 10^{1,62}$$

$$\text{abondance(NANO)} = \text{chlo } \alpha^{0,88} \times 10^{-0,38}$$

Ces relations ont été utilisées sur la lagune de Bages-Sigean pour calculer la métrique « Abondance » (Saguet *et al.*, 2019) intervenant dans l'EQR Phytoplancton. Cette méthode s'est avérée trop simpliste et non satisfaisante car elle n'a pas permis de reproduire correctement les abondances phytoplanctoniques mesurées sur la lagune de Bages-Sigean. En conséquence, seule la chlorophylle *a* est utilisée pour caractériser l'évolution du compartiment « Phytoplancton ».

### 4.4.3 Recouvrement végétal total et recouvrement par les espèces de référence

Les indicateurs DCE du compartiment « Macrophyte » sont basés le recouvrement algal total et le recouvrement par les espèces de référence (en %). Afin de simuler ces indicateurs à partir des variables d'état de ce compartiment (cf. §4.3.4), une relation « Biomasse / Recouvrement » a été proposée pour les différentes espèces de macrophytes (Saguet *et al.*, 2019).

De même que pour la métrique EQRa du phytoplancton, les travaux menés sur la lagune de Bages-Sigean ont mis à jour les limites d'utilisation de l'outil vis-à-vis de l'estimation de l'indicateur DCE Macrophytes. Cette incapacité du modèle à évaluer l'état du compartiment « Macrophyte » est en partie liée à la conceptualisation trop simpliste des herbiers à zostères au sein du modèle. Les processus de croissance de l'herbier simulés sont uniquement basés sur la disponibilité en nutriment dans la colonne d'eau. La capacité de croissance à partir des stocks sédimentaires de nutriment via le système racinaire de l'herbier n'est pas prise en compte. Or, dans les milieux oligotrophes ou en phase de restauration, ce second

processus est dominant. Ainsi, lorsque les conditions environnementales sont favorables au développement des herbiers (disponibilité en lumière), la croissance simulée des zostères est sous-estimée par le modèle avec pour conséquences directes une sous-évaluation du pourcentage de recouvrement des espèces de référence et *in fine* une mauvaise évaluation de l'état du compartiment « Macrophyte ».

A l'heure actuelle, aucun descripteur du compartiment « Macrophyte » basé sur les espèces de référence n'a pu être défini. En revanche, l'analyse des données de biomasse de macrophytes acquises sur 13 lagunes occitanes entre 2001 et 2006 dans le cadre des diagnostics RSL<sup>7</sup> a permis d'estimer des plages de valeurs de biomasse d'algues opportunistes 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 biomasse simulée d'algues opportunistes en fonction de l'état d'eutrophisation global de la lagune (cf. § 6.5 « *Limites actuelles d'utilisation du modèle* » du présent rapport et la note dédiée<sup>8</sup>).

---

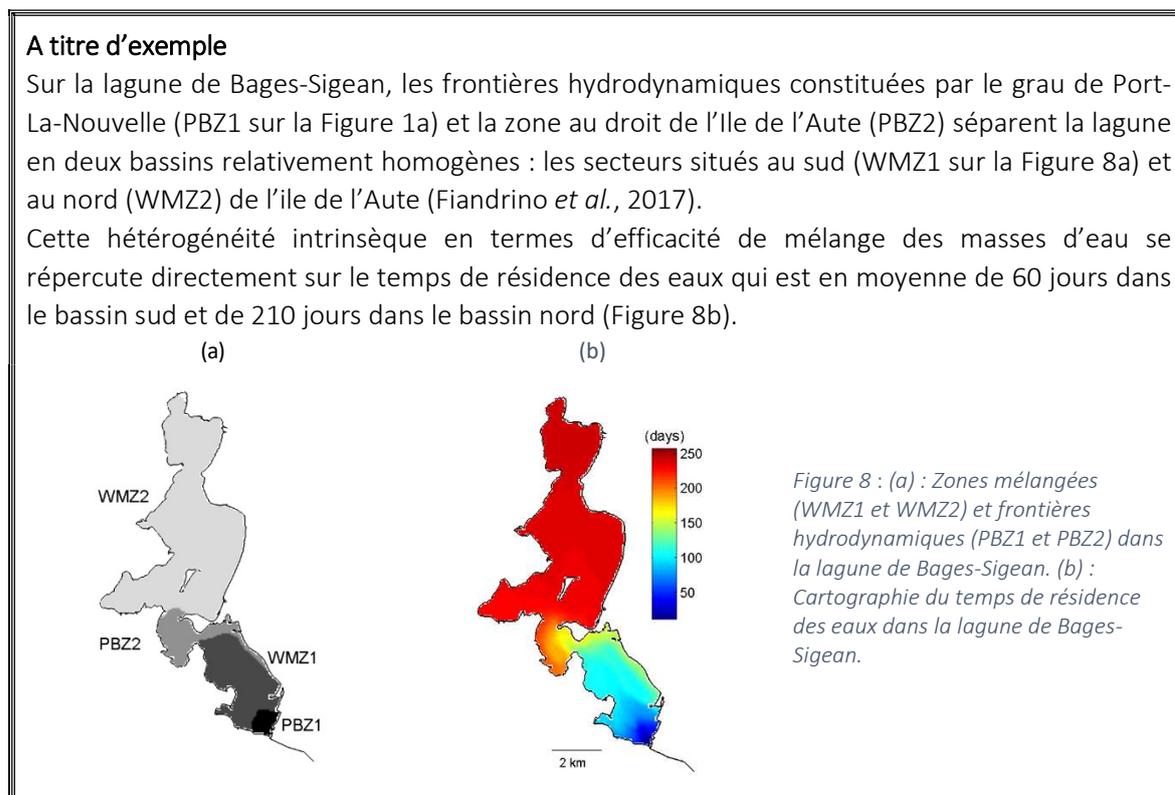
<sup>7</sup> Vers un descripteur du compartiment « Macrophyte » pour le modèle GAMELag. Note basée sur l'analyse de la base de données « Macrophyte – RSL. Rapport final.

## 5 Comment déployer le modèle sur une lagune ? Quelles étapes préalables ?

### 5.1 Définition du nombre de boîtes

Le nombre de « boîtes physiques » au sein du modèle est là pour rendre compte de l'hétérogénéité des masses d'eau au sein de l'écosystème. Cette hétérogénéité peut être liée aux propriétés intrinsèques de la lagune ou à des facteurs extérieurs.

La sinuosité du trait de côte, les caractéristiques morpho dynamiques font qu'une lagune peut être constituée d'une succession de bassins, séparés par des frontières hydrodynamiques qui limitent l'efficacité de mélange des masses d'eau des différents bassins.



Lorsqu'une lagune est alimentée par des canaux artificiels, les apports permanents d'eaux douces sont de nature à engendrer et entretenir des gradients de salinité au sein de la lagune. Ainsi, les hétérogénéités observées ne dépendent pas uniquement de l'efficacité de mélange des masses d'eau et la relation entre gradient de salinité et temps de résidence des eaux dans la lagune n'est pas directe.

### A titre d'exemple

Sur la lagune de l'Or (Symbo, 2019), la Canalette du Languedoc qui se jette dans une anse au nord-est de la lagune engendre un gradient de salinité croissant d'est en ouest (Figure 9a) alors que la variabilité du temps de résidence des eaux est plus en lien avec la distance aux passes avec le canal du Rhône à Sète (b).

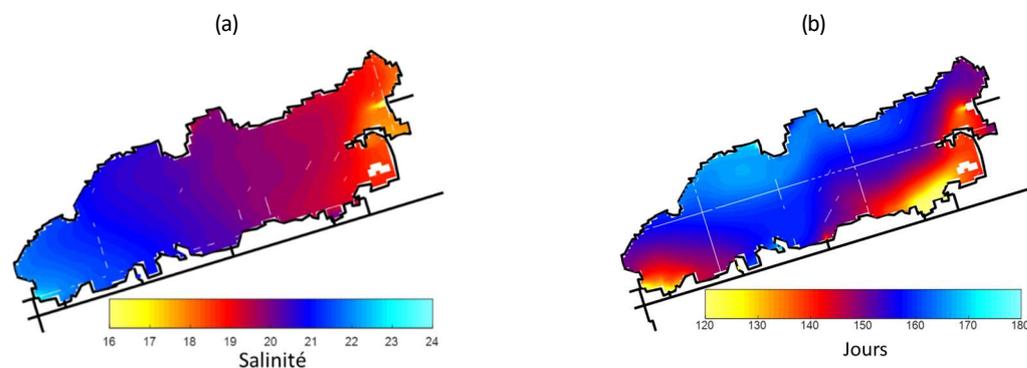


Figure 9 : (a) : Cartographie de la salinité moyenne de la lagune de l'Or sur la période du 1er avril 2017 au 31 mars 2018. (b) : Cartographie du temps de résidence des eaux dans la lagune de l'Or.

Dans les lagunes profondes soumises à des apports importants d'eau douce via des canaux permanents, des différences de salinité peuvent également s'établir au sein de la colonne d'eau entre la surface et le fond (sur la lagune de Berre, les apports par le canal de la Durance sont tels qu'ils engendrent des dessalures marquées et relativement stables dans la couche de surface).

Enfin, dans les lagunes à vocation conchylicole, les coquillages exercent une pression de prédation sur les compartiments « Phytoplancton » et « Zooplancton » dans les zones de production. La présence de ces secteurs d'élevage engendre ainsi une hétérogénéité « biologique » dans l'écosystème.

A l'issue de cette étape, les « boîtes physiques » sont caractérisées par leur surface (exprimée en  $m^2$ ) et leur volume (exprimé en  $m^3$ ).

## 5.2 Définition des forçages physiques aux interfaces

Les échanges d'eau, de sel et de matière entre la lagune et les interfaces « Bassin versant », « Atmosphère » et « Mer » sont décrits via les **données de forçage**. Elles correspondent aux flux d'eau, de sel et de matière (azote et phosphore) échangés à ces interfaces mais dont les évolutions temporelles ne sont pas simulées par le modèle. Ces données de forçage, qui interviennent dans les équations des variables d'état qu'elles impactent, doivent être définies en complément et en parallèle à toute mise en œuvre du modèle sur un site donné. La synthèse des données de forçage du modèle est présentée en Annexe 3.

### 5.2.1 Forçages à l'interface « Bassin versant - Lagune »

Les données de forçage à l'interface « Bassin versant – Lagune » concernent d'une part les flux hydriques qui vont impacter les volumes résiduels et la salinité de la lagune et d'autre part les flux d'azote et de phosphore qui vont impacter différents compartiments biologiques.

#### NOTA BENE

Sur chaque site, un inventaire de toutes les sources d'eau et de matière présentes sur le bassin versant doit être réalisé au préalable à l'application du modèle. Pour chacune de ces sources, les données de débit et de qualité disponibles sont regroupées au sein de la base de données « Bassin versant » (cf. Annexe 4).

##### 5.2.1.1 Flux d'eau : débits des cours d'eau naturels, des canaux artificiels et des STEU, apports sous-terrain

Les flux d'eau douce issus des bassins versants agissent sur les volumes résiduels échangés avec la mer ( $V_R$ ) et entre les boîtes ( $V_R^{Int}$ ) et sur la salinité de chaque boîte ( $S_{bi}$ ). Ces flux sont définis sous la forme de **série temporelle de volume d'eau** (exprimés en  $m^3.j^{-1}$ ) et interviennent directement dans l'équation d'évolution des variables d'état  $V_R$  et  $V_R^{Int}$  et indirectement (via  $V_R$  et  $V_R^{Int}$ ) dans l'équation d'évolution des variables d'état  $S_{bi}$  dans chaque boîte (cf. 4.2.1).

Un fichier Excel (cf. exemple fourni en Annexe 4) regroupe les données de volumes d'eau journaliers apportés à la lagune par les différentes sources répertoriées sur les bassins versants (cours d'eau naturels, canaux artificiels, STEU). L'analyse de sensibilité globale réalisée avec le modèle de la lagune de Bages-Sigean (Pete *et al.*, 2017) a montré que la plupart des produits de sorties du modèle sont particulièrement sensibles à la précision temporelle des données de débits des cours d'eau naturels. Ainsi, une description fine (à l'échelle de la journée) des apports d'eau douce lors des épisodes de crue est recommandée sur les cours d'eau naturels intermittents pour lesquels la majorité des apports d'eau (et de matière) se fait suite à des événements pluvieux.

##### 5.2.1.2 Flux d'azote et de phosphore : concentrations dans les cours d'eau naturels, les canaux artificiels, les rejets de STEU, les apports sous-terrain.

Les flux d'azote et de phosphore issus des bassins versants agissent sur les variables d'état des compartiments « colonne d'eau » et « Détritique » de chaque boîte. Ces flux sont définis à partir de **séries temporelles de volume d'eau** (exprimés en  $m^3.j^{-1}$ ) et de **concentrations en azote et phosphore** ( $mmolN.m^{-3}$ ,  $mmolP.m^{-3}$ ). Ils interviennent directement dans l'équation d'évolution des variables d'état correspondant aux formes minérales dissoutes ( $NH_4$ ,  $NO_3$  et  $PO_4$ ) et organiques dissoutes et particulaires (NOD, NOP et POD, POP) de chaque boîte.

Un fichier Excel (cf. exemple fourni en Annexe 4) regroupe les données de concentrations en azote et phosphore acquises, généralement de façon ponctuelle, dans les différentes sources répertoriées sur les bassins versants (cours d'eau naturels, canaux artificiels, STEU). Ces concentrations en azote et phosphore peuvent être données sous différentes formes : sous leur forme totale ou en distinguant les nutriments et les formes organiques.

Un module de mise en forme des données, intégré à l'outil, traite les données « brutes » fournies par l'utilisateur pour générer les données de forçage utilisables par le modèle. En particulier, afin de disposer des débits et des flux d'azote et de phosphore au pas de temps de calcul du modèle (journalier) sur la période simulée, ce module interpole les données de débits et de concentrations au pas de temps journalier et crée des séries temporelles de flux d'azote et de phosphore en multipliant les concentrations par les débits.

Dans le cas où les concentrations sont exprimées en azote total ( $N_T$ ) et phosphore total ( $P_T$ ) - qui ne sont pas des variables d'état du modèle - l'azote et le phosphore sont répartis entre les formes inorganiques et organiques dissoutes. Les flux des différentes formes de l'azote et du phosphore sont ensuite calculés en multipliant les concentrations par les débits des sources correspondantes.

### 5.2.1.3 Données « débits et qualité » disponibles sur les affluents des lagunes méditerranéennes

L'Agence de l'Eau Rhône Méditerranée et Corse a mis en place, en septembre 2016, le Réseau « Flux polluants aux lagunes » sur les principaux affluents des lagunes.

Pour les « petits affluents » sur lesquels aucune donnée n'est disponible, les flux hydriques pourront être estimés à partir des surfaces drainées et de la pluviométrie et les concentrations en azote et phosphore extrapolées à partir de mesures acquises sur des cours d'eau ayant les mêmes caractéristiques, en termes de sources présentes sur les bassins versants.

L'ensemble des analyses et préconisations sur les apports du bassin versant aux lagunes sont disponibles dans un rapport dédié (Hydriad/Agence de l'eau, 2022).

## 5.2.2 Forçages à l'interface « Atmosphère - Lagune »

Les données de forçage à l'interface « Atmosphère – Lagune » concernent d'une part les apports d'eau douce par les précipitations et les processus d'évaporation qui vont impacter les volumes résiduels et la salinité de la lagune et d'autre part les flux d'azote apportés par les précipitations qui vont impacter différents compartiments biologiques.

### 5.2.2.1 Précipitations

Les précipitations journalières (exprimées en  $\text{mm.j}^{-1}$ ) acquises par Météo-France sur différentes stations météorologiques réparties le long du littoral méditerranéen sont sauvegardées dans l'outil et mise à jour annuellement. Lorsque le modèle est mis en place sur une lagune, il convient de choisir la station météorologique la plus proche de la lagune (la liste des stations météorologiques est fournie en Annexe 4). Le module de mise en forme des données, intégré à l'outil, génère les volumes journaliers précipités (exprimés en  $\text{m}^3.\text{j}^{-1}$ ) à la surface de chaque boîte à partir des données journalières de pluviométrie (transformées en  $\text{m.j}^{-1}$ ) multipliées par la surface de chaque boîte (exprimées en  $\text{m}^2$ ).

Peu de données de concentrations en azote dans l'eau de pluie sont disponibles. Des valeurs ponctuelles acquises lors d'une étude réalisée sur l'étang de La Marette en été 2009 (le Noc *et al.*, 2012) sont utilisées comme un paramètre constant dans le modèle.

### 5.2.2.2 Evaporation

Le module de mise en forme des données, intégré à l'outil, génère les volumes journaliers évaporés (exprimés en  $\text{m}^3.\text{j}^{-1}$ ) à la surface de chaque boîte à partir de la formulation de Penman (1948). Cette formulation, détaillée en Annexe 1, estime l'évaporation en fonction de la **température de l'air** (exprimée en °C), de la **pression atmosphérique** (exprimée en mbar), de l'**humidité relative** (exprimée en %), de la **vitesse du vent** (exprimée en  $\text{m.s}^{-1}$ ) et du **rayonnement global** (exprimé en  $10^6.\text{J.m}^2.\text{j}^{-1}$ ).

De même que pour la pluviométrie ces données météorologiques, acquises aux stations Météo-France sont sauvegardées dans l'outil et mise à jour régulièrement.

## 5.2.3 Forçages à l'interface « Milieu marin extérieur - Lagune »

Les données de forçage à l'interface « Mer – Lagune » concernent le volume de mélange, les flux sels, qui vont impacter la salinité de la lagune et les flux d'azote et de phosphore qui vont impacter différents compartiments biologiques.

Les flux de sels, d'azote et de phosphore sont calculés à partir des volumes résiduels journaliers (qui sont une variable d'état du modèle), du **volume de mélange** (cf. Annexe 2) et respectivement de la salinité et des concentrations en azote et phosphore en mer.

Les données de salinité acquises dans le cadre du REPHY tous les 15 jours aux stations Sète et Barcarès sont sauvegardées dans l'outil et mise à jour annuellement. Depuis janvier 2016, les données mensuelles de nutriments (NID, PO<sub>4</sub>) sont également disponibles aux mêmes stations.

### 5.3 Définition des forçages biogéochimiques dans la lagune

Les processus biogéochimiques de croissance et de mortalité des organismes vivants (phytoplancton, zooplancton, macrophytes) sont conceptualisés au sein du modèle en fonction de différentes variables d'état associées aux compartiments « Colonne d'eau » et « Détritique » et de données de forçage telles que la **température de l'eau** (exprimée en °C) et l'**intensité lumineuse** (exprimée en W.m<sup>-2</sup>.s<sup>-1</sup>).

La température de l'eau est calculée à partir d'une relation empirique avec la température de l'air (données Météo France). Cette relation a été définie à partir des données de température de l'eau acquises en haute fréquence dans le cadre du projet DEPART dans la lagune de Bages-Sigean (Ouisse *et al.*, 2014).

L'intensité lumineuse est une donnée fournie par Météo France et acquise aux différentes stations météorologiques réparties le long du littoral méditerranéen (cf. liste Annexe 4).

#### NOTA BENE

A l'issue de l'étape de définition des forçages, on aboutit à la mise en place d'une base de données qui regroupe des séries temporelles i) : de données communes à l'ensemble des lagunes (données météorologiques, données hydrologiques en mer et i) : de données spécifiques à chaque lagune (données de débit et de qualité des sources d'eau douce et de matière inventoriées sur les bassins versants). Par suite, les simulations ne pourront être réalisées que sur des périodes pour lesquelles toutes les séries temporelles de données de forçage existent.

### 5.4 Définition d'une situation « repère »

Suite à la mise en place de l'outil sur une lagune (définition des boîtes physiques et des volumes de mélange) et à la construction de la base de données de forçage, une **situation « repère »** peut être définie pour servir de base d'une part à la validation du modèle et d'autre part à l'analyse de scénarios, notamment dans une optique d'estimation des flux admissibles. Cette situation « repère » correspond à la **situation la plus réaliste possible** sur une période de temps donnée<sup>8</sup>. Elle doit couvrir à minima une année hydrologique (de septembre à aout) et idéalement, peut s'étendre sur les dix dernières années. La représentativité de cette situation « repère » dépend directement de la qualité des données de forçage.

### 5.5 Sites sur lesquels le modèle est appliqué

Les principaux développements ont été réalisés sur le site pilote de la lagune de Bages-Sigean. Par suite, il a été appliqué sur les lagunes de :

- Thau : en 2018 dans le cadre du projet CAPATHAU avec pour objectif d'étudier la capacité de charge de la lagune et de tester l'impact de scénarios de gestion de la ressource conchylicole dans un contexte de changement climatique (Pete *et al.*, 2020a ; Pete *et al.*, 2018a ; Pete *et al.*, 2018b)

<sup>8</sup> Il est préférable que la situation « repère » corresponde à la situation actuelle. Toutefois, en l'absence de données récentes, une autre période peut être choisie par l'utilisateur

- Biguglia : en 2019 dans le cadre du projet INTERREG RETRALAGS avec pour objectif de développer des descripteurs opérationnels du fonctionnement hydrologique et écologique à destination des gestionnaires des milieux lagunaires. (Pete *et al.*, 2020b)
- Or : en 2021 dans le cadre de « l'étude du devenir des nutriments dans l'étang de l'Or » portée par le Symbo (Picard, 2021) avec pour objectif de i) : tester l'impact de différents scénarios (gestion des passes, modification des apports hydriques) sur le fonctionnement biogéochimique de la lagune ; ii) : estimer les flux admissibles (Symbo, *in prep.*).

## 6 Quelles sont les limites d'utilisation du modèle ?

### Quelques rappels théoriques

La capacité d'un modèle à reproduire la réalité observée est dépendante des hypothèses simplificatrices faites lors de la formalisation du système et de la qualité des données de forçages. Au préalable à toute utilisation de l'outil il convient donc d'analyser la sensibilité du modèle à la paramétrisation, de confirmer la capacité de l'outil à répondre aux objectifs fixés et d'en définir les limites d'utilisation, notamment en confrontant les résultats des simulations aux observations *in situ*.

L'optimisation de la paramétrisation de l'outil consiste à rechercher les meilleures combinaisons possibles des valeurs des paramètres du modèle (cf. §.4.1). Il s'agit ici d'identifier les paramètres du modèle qui ont une forte influence sur les sorties du modèle car c'est en priorité sur ces paramètres que se fera la phase d'optimisation.

### 6.1 Sensibilité du modèle à la paramétrisation

Des méthodes d'analyse de sensibilité globale ont été mises en œuvre pour opérer cette hiérarchisation des facteurs incertains du modèle sur le site pilote (lagune de Bages-Sigean). Les 50 paramètres les plus influents du module biogéochimique (sur les 120 paramètres du modèle – Annexe 1) ont ainsi pu être déterminés.

Cette étape qui porte sur les caractéristiques intrinsèques du modèle (formalisation du système étudié, hypothèses simplificatrices ...), est indépendante de la lagune sur laquelle le modèle est appliqué. La hiérarchisation des paramètres faite sur le site pilote est générique, pour une version du modèle donnée, et il n'est donc pas nécessaire de la refaire lors de l'application de cette même version, sur d'autres sites. En revanche, il conviendra de réitérer cette étape de hiérarchisation lors du déploiement d'une version de l'outil basée sur une formalisation différente de l'écosystème (par exemple, la version intégrant le module « Huîtres » développé pour la lagune de Thau).

### 6.2 Confirmation de la capacité du modèle à atteindre les objectifs fixés sur chaque site

Lors de l'application de l'outil sur un site, il convient, en premier lieu, de caractériser la capacité de l'outil à reproduire (ou pas) les observations *in situ*. Cette étape généralement qualifiée de « validation de l'outil » est plus justement considérée par Chapra (2003) comme une **confirmation** de l'outil dans la mesure où il ne s'agit pas de « valider que le modèle est "vrai" (ce qui ne pourra jamais être démontré) mais plutôt de s'assurer que les prévisions du modèle peuvent être considérées comme suffisamment crédibles pour aider à la prise de décision ».

Cette étape de confirmation, basée sur la confrontation des résultats de simulation aux observations *in situ*, est spécifique à chaque lagune et devra être réalisée à chaque nouvelle application de l'outil sur un site. Il s'agit ici de rechercher les paramétrisations (en se focalisant sur les paramètres plus influents, les valeurs des autres paramètres sont définies à partir de la littérature) qui réduisent au maximum les écarts entre les résultats du modèle les mesures *in situ*. Une méthode de détermination des paramétrisations optimales a été définie spécifiquement pour l'outil GAMELag (Saguet *et al*, 2019).

### 6.3 Observations *in situ* utiles à la confirmation du modèle

Les données de confirmation de l'outil correspondent aux observations *in situ* associées aux variables d'états du modèle (Figure 7) ou à des combinaisons de ces variables d'état, sur la période simulée.

#### 6.3.1 Données dans la colonne d'eau

Les données de salinité acquises sur plusieurs années en plusieurs stations dans une lagune dans le cadre de réseaux d'observations (FILMED, DCE, REPHY) constituent des jeux de données particulièrement intéressants pour l'outil puisqu'ils permettent de « caler » le module hydrologique. Cette première étape de validation sur le paramètre « Salinité » assure que les échanges physiques (transport) de matière entre les différentes boîtes et entre la lagune et la mer sont correctement reproduits par le modèle (Annexe 2).

Les mesures des formes inorganiques dissoutes de l'azote NID ( $\text{NO}_3 + \text{NH}_4$ ) et du phosphore PID ( $\text{PO}_4$ ) constituent également des jeux de données intéressants puisqu'ils permettent de vérifier la capacité de l'outil à reproduire le fonctionnement écologique de la lagune en termes de limitation de la production par l'un ou l'autre des nutriments.

Les concentrations en azote et phosphore total ( $\text{N}_T$ ,  $\text{P}_T$ ) permettent de vérifier la capacité de l'outil à reproduire les ordres de grandeur et l'évolution temporelle des stocks de matière dans la colonne. En complément, les concentrations en azote et phosphore organique dissous NO ( $\text{DON}_L + \text{DON}_R$ ) et PO ( $\text{DOP}_L + \text{DOP}_R$ ) permettent, lorsqu'elles sont disponibles, de préciser la part du compartiment « détritique » dans ce stock. Ces données sont riches d'information puisqu'elles permettent, indirectement, de vérifier la capacité de l'outil à reproduire le fonctionnement du compartiment sédimentaire en tant que source ou puits d'azote et de phosphore.

#### 6.3.2 Données dans les compartiments « Phytoplancton » et « Macrophyte »

Les données de chlorophylle a peuvent être confrontées à la somme des variables d'état  $\text{P}_S + \text{P}_L$  afin de vérifier la capacité de l'outil à reproduire les ordres de grandeur et l'évolution temporelle des stocks de matière dans les producteurs primaires. En complément, des données de biomasses algales et d'herbiers permettent de préciser la capacité de l'outil à reproduire la compétition entre les micro et les macroalgues.

## 6.4 Confirmation du modèle sur une lagune : exemple d'application sur la lagune de l'Or

### 6.4.1 Détermination des paramétrisations optimales

La recherche des combinaisons de paramètres qui limitent au maximum les écarts entre les résultats du modèle les mesures *in situ* sur la lagune de l'Or a abouti à 8 paramétrisations différentes pour lesquelles 35 paramètres diffèrent de leur valeur de référence (Annexe 1). Une représentation en niveaux de couleurs

des valeurs des 35 paramètres centrés et réduits<sup>9</sup> (en colonne) pour les 8 paramétrisations retenues (en lignes) est présentée sur la Figure 10.

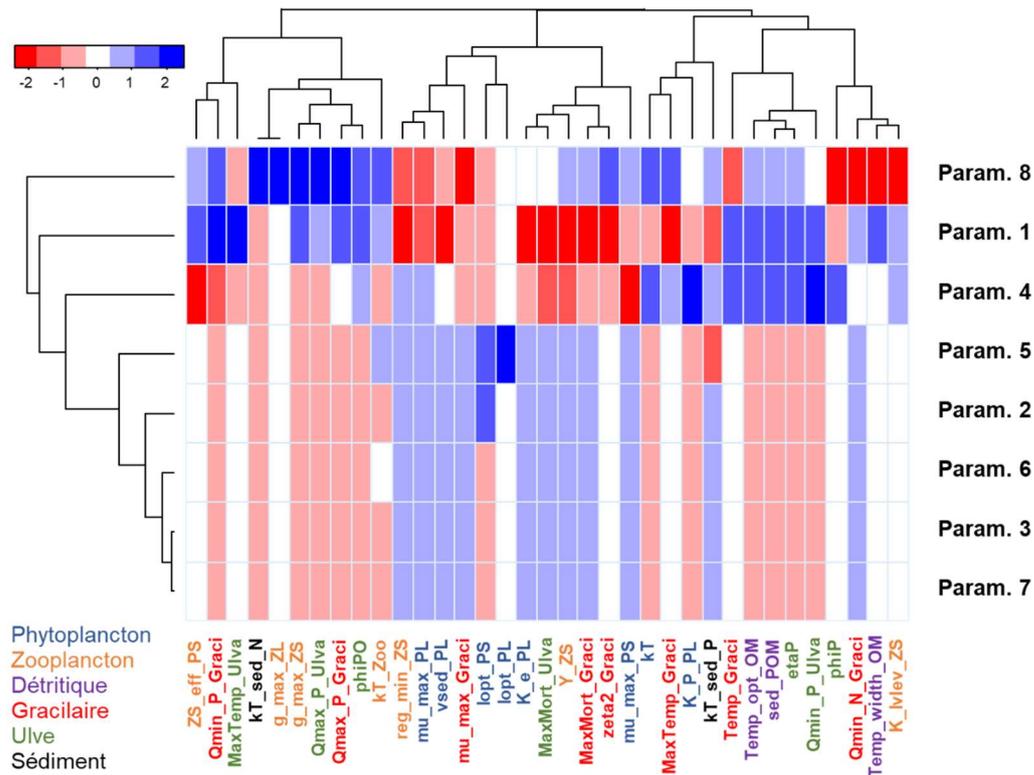


Figure 10 : Carte de couleur des valeurs centrées réduites des 36 paramètres pour les 9 paramétrisations optimales définies sur la lagune de l'Or.

#### 6.4.2 Que se cache-t-il derrière les paramétrisations ?

Afin d'illustrer les spécificités des différentes paramétrisations retenues sur la lagune de l'Or, une simulation a été faite avec chaque paramétrisation en considérant les apports de matière nuls par les interfaces « Bassin versant »<sup>10</sup> et « Milieu marin extérieur ». Les conditions initiales dans le sédiment sont celles mesurées en 2019 ( $N_{\text{sed}} = 10023.8 \text{ mmolN.m}^{-2}$  ;  $P_{\text{sed}} = 686 \text{ mmolN.m}^{-2}$ ). La Figure 11 schématise les stocks et les flux d'azote et de phosphore dans et entre les compartiments pour deux paramétrisations distinctes (paramétrisations 4 et 8 - Figure 10).

La paramétrisation 4 favorise la croissance du phytoplancton (en vert foncé) et des gracilaires (au détriment des ulves – le cercle vert clair représente la somme des deux groupes fonctionnels) dans des proportions relativement limitées. Dans cette paramétrisation la production est limitée par l'azote et les concentrations en phosphore dans la colonne (en grenat) sont excédentaires. C'est avec cette paramétrisation que les quantités d'azote et de phosphore stockées dans les compartiments de la lagune sont les plus faibles.

<sup>9</sup> Cette transformation des valeurs des paramètres dont les ordres de grandeur peuvent être très différents (de  $10^{-6}$  à  $10^2$ ) permet de les comparer entre eux en les contraignant à varier dans une plage de valeur standardisée. Les valeurs des paramètres sont centrées autour de la valeur moyenne et réduite par rapport à l'écart type.

<sup>10</sup> Les valeurs non nulles des flux « Bassin versant » correspondent aux apports par les STEU

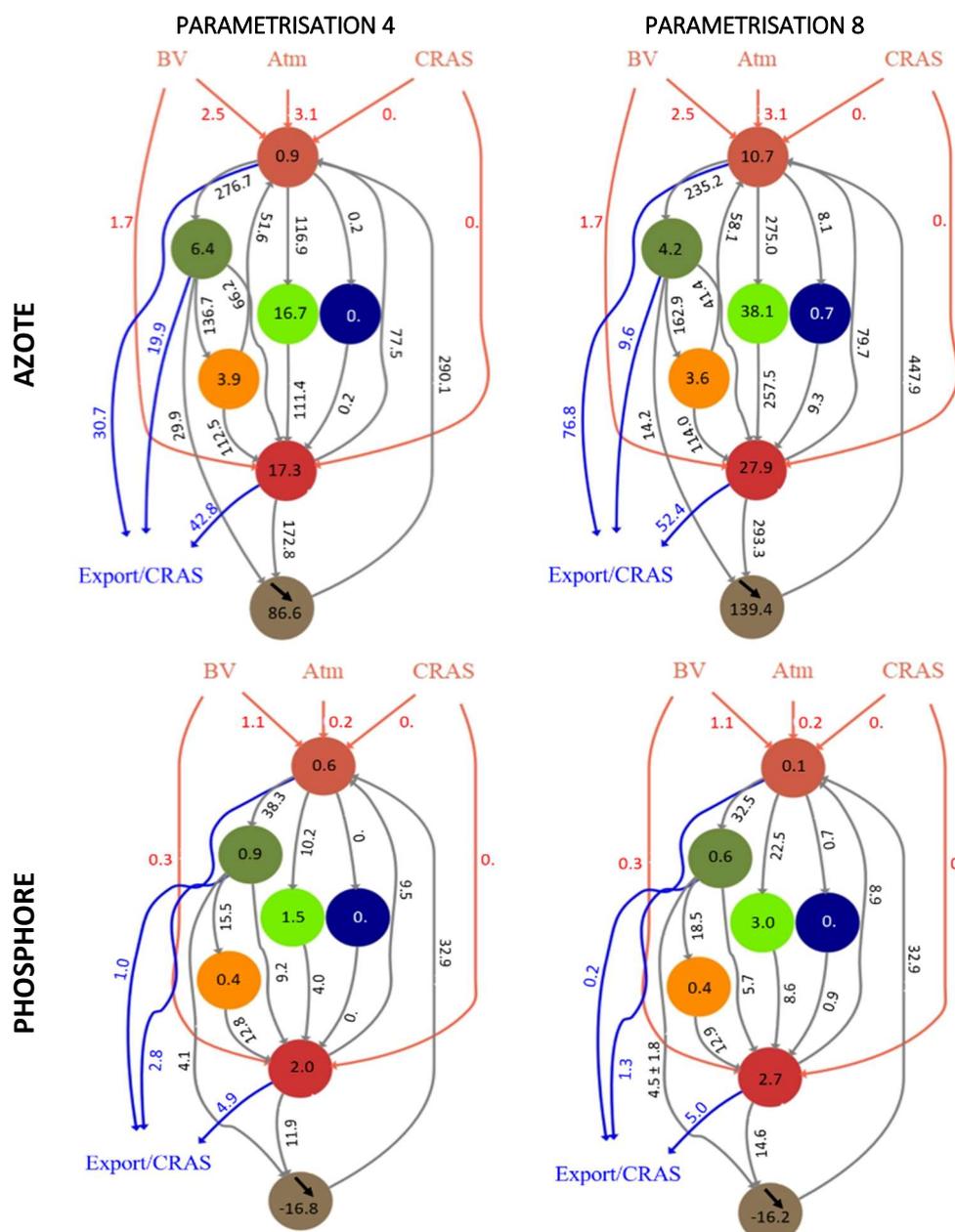


Figure 11 : Représentation des stocks et des flux d'azote (à gauche) et de phosphore (à droite) simulés dans la lagune de l'Or pour l'année 2017 avec deux paramétrisations différentes (paramétrisations 4 et 8). Les flèches représentent les flux cumulés annuels (exprimés en tonnes) entre les différents compartiments. Les valeurs dans les cercles correspondent aux stocks estivaux moyens (exprimés en tonnes) dans les compartiments « Colonne d'eau » en grenat ; « Phytoplancton » en vert foncé, « Macrophytes opportunistes » en vert clair, « Herbier » en bleu, « Zooplancton » en orange, « Matière organique détritique » en rouge. Dans le compartiment sédimentaire (en marron) les valeurs correspondent à la différence entre le stock en début et en fin d'année.

La paramétrisation 8 génère d'importants flux d'azote inorganique dissous à l'interface eau/sédiment. Ces flux engendrent un stock d'azote inorganique dissous fortement excédentaire dans la colonne d'eau (cercle grenat), une exportation importante d'azote inorganique dissous vers le milieu marin extérieur et une diminution massive du stock d'azote dans le sédiment (en marron). Dans ces conditions (probablement non réalistes), seules les gracilaires poussent (les ulves sont fortement limitées) et le phytoplancton est fortement consommé par le zooplancton.

Chaque paramétrisation traduit des hypothèses simplificatrices particulières faites lors de l'étape de formalisation et a, de ce fait, des répercussions spécifiques sur le fonctionnement simulé de l'écosystème.

Ainsi, la prise en compte des 8 paramétrisations retenues à l'issue de l'étape de confirmation du modèle aboutit à 8 « fonctionnements possibles » et compatibles, en partie, avec la réalité observée.

### 6.4.3 Incertitudes sur les produits de sortie

Ainsi, les 8 paramétrisations considérées comme optimales pour la lagune de l'Or sont utilisées pour évaluer les incertitudes sur les produits de sortie du modèle. Ces incertitudes peuvent être estimées pour tous les produits de sortie du modèle (variables d'état - cf. §.4.1 et 4.3 - ou grandeurs mesurables définies à partir de ces variables d'état - cf. §.4.4) et sont calculées via les valeurs moyennes et les intervalles de confiance à 95% estimés à partir des simulations réalisées avec les 8 paramétrisations sélectionnées.

A titre d'exemple, la Figure 12 illustre les incertitudes associées aux valeurs moyennes de l'azote total, du phosphore total et de la chlorophylle a simulées dans la lagune l'Or sur la période 2017-2018. Ces distributions peuvent être comparées aux seuils définis par la DCE pour ces métriques en période estivale. En outre, elles permettent de préciser les périodes de l'année où ces incertitudes sont les plus élevées.

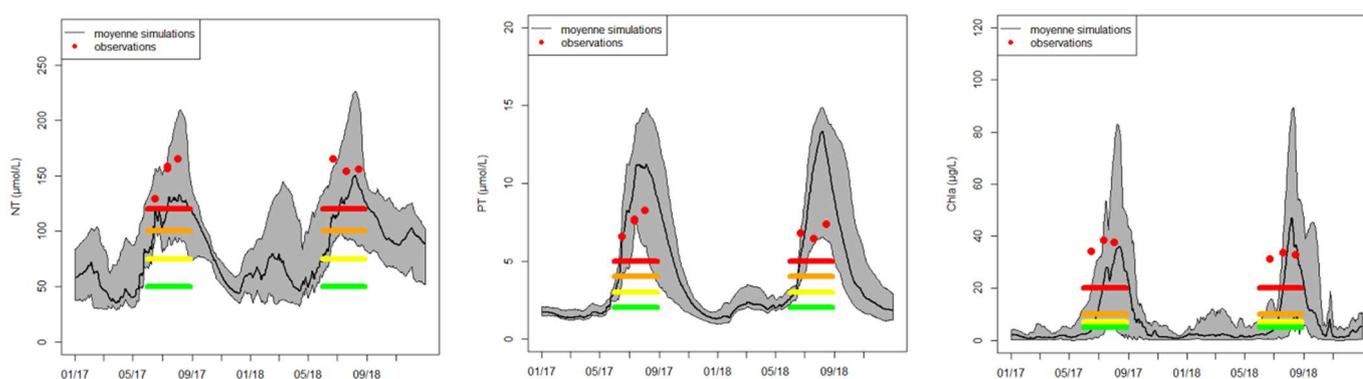


Figure 12 : Evolution temporelle sur la période de janvier 2017 à décembre 2018 des concentrations en NT (gauche), PT (centre) et Chlorophylle a (droite) simulées sur la lagune de l'Or. Les courbes continues grises représentent les moyennes des 9 paramétrisations et les enveloppes grises les intervalles de confiance à 95%. Les points rouges symbolisent les mesures DCE et les lignes de couleurs les seuils des classes d'état

## 6.5 Limites actuelles d'utilisation du modèle

La phase d'optimisation des paramètres du modèle sur le site pilote de Bages-Sigean puis son application sur la lagune de l'Or ont permis de mettre à jour les points forts de l'outil et ses limites actuelles d'utilisation. Concernant les performances du modèle :

- « **Fonctionnement hydrodynamique** » : la capacité du modèle à reproduire le fonctionnement hydrodynamique d'une lagune à l'échelle spatiale des boîtes est aujourd'hui assurée et validée via sa capacité à restituer les évolutions temporelles de la salinité au sein de ces boîtes.
- « **Phytoplancton** » : la méthode utilisée pour estimer les abondances en nano et picophytoplancton à partir des concentrations en chlorophylle a (cf. §.4.3.2) n'est pas satisfaisante. Cette incapacité du modèle à calculer les métriques associées aux abondances phytoplanctoniques ne constitue toutefois pas une limite d'utilisation de l'outil dans la mesure où l'évolution de l'état du compartiment « Phytoplancton » peut être analysée au regard de l'évolution des biomasses phytoplanctoniques (via la variable Chl.a).

Les limites d'utilisation de l'outil concernant principalement les compartiments « Macrophyte » et « Sédiment » et des pistes d'amélioration ont été proposées.

### 6.5.1 Compartiment « Macrophyte »

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.

Une étude a été menée afin de statuer sur la nécessité/pertinence d'affiner la formalisation des processus de croissance de l'herbier au sein du modèle. En effet, 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). Afin d'alimenter la réflexion sur l'utilisation d'autres descripteurs que les métriques DCE pour rendre compte de l'état du compartiment « Macrophyte », 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 (soit 20 secteurs lagunaires et 253 stations) entre 2001 et 2006 dans le cadre des diagnostics RSL de ce compartiment. Les résultats de ces analyses sont détaillés dans une note dédiée<sup>11</sup>. Les principales conclusions de cette étude sont résumées ci-dessous :

- 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<sup>12</sup> a permis de proposer un seuil de non-prolifération de l'ordre de **80 gPS.m<sup>-2</sup>** 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 » (Tableau 1). 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 (cf. § 6.5.3).

Ces informations 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 » (cf. § 7.2.2).

---

<sup>11</sup> *Vers un descripteur du compartiment « Macrophyte » pour le modèle GAMELag. Note basée sur l'analyse de la base de données « Macrophyte – RSL. Rapport final.*

<sup>12</sup> Stations sur lesquelles les biomasses d'algues vertes opportunistes représentent plus de 75% de la biomasse totale des algues opportunistes.

Tableau 1 : 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 « Macrophyte ». (\*) 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 <sup>-2</sup> )	<b>Opportunistes</b>	31.7 ± 57.8	251.7 ± 175.4	139.3 ± 161.3
	<b>Algues rouges</b> (*)	28.3 ± 47.3	312.8 ± 218.8	138.7 ± 186.2
	<b>Algues vertes</b> (*)	33.4 ± 64.9	213.8 ± 69.6	147.0 ± 143.5

## 6.5.2 Compartiment « Sédiment »

Deux approches peuvent être utilisées pour simuler les échanges de matière entre la colonne d'eau et le sédiment (méthode basée sur les « Flux mesurés » ou un modèle « simple » - cf. §.4.3.2.5) Dans les deux cas, les équations qui régissent le devenir de la matière dans le sédiment et les échanges avec la colonne d'eau, sont trop simplistes pour rendre compte de l'évolution des stocks sédimentaires d'azote et de phosphore.

Les travaux menés sur l'application du modèle sur la lagune de l'Or ont fourni un cadre à une étude dont l'objectif était de proposer une stratégie pour améliorer la description du compartiment « Sédiment » au sein de l'outil. Cette étude a permis de choisir l'approche de modélisation à privilégier, d'en identifier les principales limites et de proposer des pistes d'amélioration<sup>13</sup>.

Le « modèle simple » a été privilégié pour décrire l'évolution des stocks sédimentaires d'azote et de phosphore. Il rend compte de façon satisfaisante i) : de l'évolution des stocks sédimentaires de phosphore ; ii) : de l'évolution annuelle des paramètres de la colonne d'eau ; iii) : du contrôle de la production primaire estivale par la disponibilité en azote dès le mois de juin ; iv) : de l'intensité du bloom phytoplanctonique estival.

En revanche, ce modèle i) : surestime le stockage de l'azote dans le compartiment sédimentaire ; ii) : surestime les concentrations estivales en phosphate et phosphore total dans la colonne d'eau ; iii) : sous-estime les concentrations estivales en azote organique et azote total dans la colonne d'eau ; iv) : prévoit un démarrage un peu tardif du bloom phytoplanctonique estival. Plusieurs causes possibles de ces estimations erronées ont été identifiées :

- L'évolution du compartiment « Macroalgues opportunistes » joue un rôle clef à la fois sur le contrôle du démarrage du bloom planctonique estival et sur les concentrations en phosphate dans la colonne d'eau. Or à l'heure actuelle, en l'absence de données disponibles sur les biomasses d'algues opportunistes présentement dans le milieu, i) : peu de paramètres intervenant dans la conceptualisation de ce compartiment sont intégrés à l'analyse de sensibilité globale et ii) : aucun critère de sélection sur le compartiment « Macrophyte » n'est pris en considération lors de la phase d'optimisation de la paramétrisation du modèle sur un site nouveau.
- Le relargage de NID (et possiblement de PID) à l'interface eau-sédiment est mal estimé du fait des hypothèses simplificatrices utilisées dans le modèle « simple ». A l'heure actuelle, la couche de sédiment simulée est supposée oxique, c'est-à-dire que les processus de reminéralisation de la matière organique dans le sédiment ne sont pas limités par la disponibilité en oxygène dissous. Cette hypothèse

<sup>13</sup> Les résultats sont détaillés dans une note dédiée : *Note sur la description du compartiment sédiment au sein du modèle GAMELag*. Rapport final.

n'est pas vérifiée, notamment en période estivale où l'épaisseur de la couche oxique de sédiment est très faible (quelques millimètres).

### 6.5.3 Pistes d'amélioration des compartiments « Macrophyte » et « Sédiment »

Les travaux récents ont mis en évidence les liens étroits entre les compartiments « Macrophyte » et « Sédiment » et la nécessité d'affiner la paramétrisation du compartiment « Macrophyte » pour améliorer la capacité de l'outil à décrire le fonctionnement global de l'écosystème. Ainsi, lors de l'application du modèle sur un site nouveau, il conviendra dans les phases d'analyse de sensibilité globale (ASG) et d'optimisation de la paramétrisation du modèle :

- de considérer, en complément des paramètres déjà pris en compte dans les ASG, les principaux paramètres qui contrôlent les flux de phosphore et d'azote entre le compartiment « Macroalgues opportunistes » et les autres compartiments. Ces paramètres concernent notamment la mortalité et relargage de matière vers la colonne d'eau et le compartiment « Matière organique détritique ».
- de prendre en compte les descripteurs du compartiment « Macroalgues opportunistes » en fonction de l'état d'eutrophisation de la lagune (Tableau 1) afin de contraindre la production d'algues opportunistes dans les plages de valeurs qui peuvent, en l'état actuel des connaissances, être considérées comme « acceptables ».

Concernant les conditions d'oxygénation du sédiment, différents modèles du cycle de l'azote et du phosphore dans le sédiment, qui prennent en compte les conditions d'oxygénation du sédiment de façon plus ou moins réalistes, pourraient être implémentés dans l'outil moyennant de nouveaux développements.

## 7 A quelles questions peut répondre le modèle ?

Le modèle permet, selon une démarche d'analyse de scénarios exploratoires<sup>14</sup>, d'apporter des éléments de réponse aux questions en lien avec :

- L'évolution des stocks d'azote et de phosphore dans les principaux compartiments de l'écosystème en fonction de l'évolution des apports par les bassins versants (points 1 et 3 - Figure 13)
- Les flux d'azote et de phosphore compatibles avec un fonctionnement écologique équilibré de l'écosystème (point 2 - Figure 13).

---

<sup>14</sup> Scénario exploratoire c-à-d « Que **peut-il** se passer » par distinction avec le scénario prédictif « Que **va-t-il** se passer » (Borjeson et al., 2006)

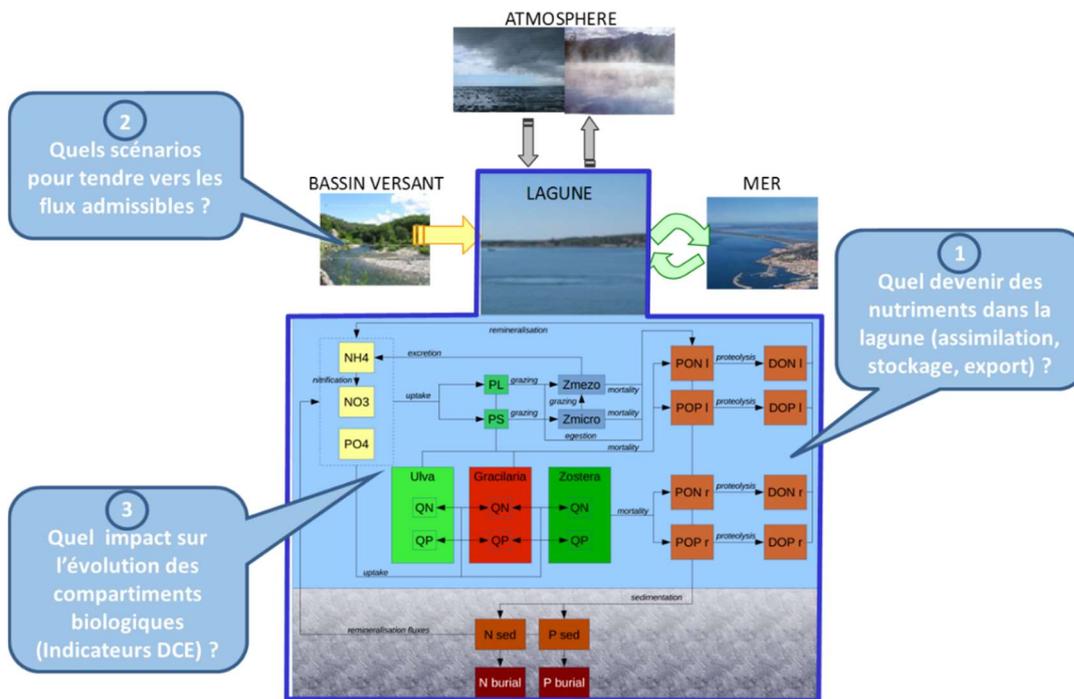


Figure 13 : Schématisation des problématiques abordées avec l'outil GAMELag

## 7.1 Fonctionnement écologique d'une lagune : descripteurs du devenir de la matière (point 1)

Notre compréhension du fonctionnement écologique d'une lagune passe par la caractérisation, à minima à l'échelle annuelle, du devenir des nutriments, d'origine exogène et endogène, dans les différents compartiments de l'écosystème. **Il convient en effet de comprendre comment « circule » la matière entre les différents compartiments, où se stocke-t-elle préférentiellement et sur quelles échelles de temps, quelle part est exportée définitivement vers la mer et sous quelles conditions hydro-climatiques ?**

Par suite, les conséquences d'éventuelles modifications des forçages sur ce fonctionnement écologique pourront être évaluées via l'analyse de scénarios exploratoires (réduction des apports anthropiques de nutriments, augmentation de la température, modification des régimes pluviométriques et hydrologiques des cours d'eau...).

Pour répondre à ces questions, **des descripteurs globaux sont calculés à l'échelle de la lagune** (en intégrant les résultats obtenus dans les boîtes physiques) à partir de résultats obtenus sur une année hydrologique à minima (Saguet *et al.*, 2019). Dix descripteurs concernent la production et le stockage de la matière dans les principaux compartiments de l'écosystème (Tableau 2). Ces descripteurs sont calculés sur les périodes d'échantillonnage des différents compartiments, à savoir la fin du printemps pour les macrophytes et l'été pour la colonne d'eau et le phytoplancton, période durant laquelle la production phytoplanctonique est la plus importante et où l'écosystème est le plus sensible aux conditions environnementales.

Tableau 2 : Descripteurs du fonctionnement écologique de la lagune

<i>Descripteurs</i>	<i>Signification</i>	<i>Unité</i>
[NID] <sub>Lag</sub>	Moyenne estivale des concentrations en azote inorganique dissous	mmolN.m <sup>-3</sup>
[PID] <sub>Lag</sub>	Moyenne estivale des concentrations en phosphore inorganique dissous	mmolP.m <sup>-3</sup>
[NT] <sub>Lag</sub>	Moyenne estivale des concentrations en azote total	mmolN.m <sup>-3</sup>
[PT] <sub>Lag</sub>	Moyenne estivale des concentrations en phosphore total	mmolP.m <sup>-3</sup>
[Chlo.A] <sub>Lag</sub>	Moyenne estivale des concentrations en ChloA	mg ChloA.m <sup>-3</sup>
[Opport] <sub>Lag</sub>	Moyenne printanière des biomasses d'espèces opportuniste	gPS.m <sup>-3</sup>
[ΔNT] <sub>Sed</sub>	Evolution annuelle des concentrations d'azote dans le sédiment	mmolN.m <sup>-2</sup> .y <sup>-1</sup>
[ΔPT] <sub>Sed</sub>	Evolution annuelle des concentrations de phosphore dans le sédiment	mmolP.m <sup>-2</sup> .y <sup>-1</sup>
NT <sub>Out MME</sub>	Quantité annuelle d'azote exportée vers le milieu marin extérieur	tonnesN.y <sup>-1</sup>
PT <sub>Out MME</sub>	Quantité annuelle de phosphore exportée vers le milieu marin extérieur	tonnesP.y <sup>-1</sup>

Ces descripteurs du fonctionnement de l'écosystème sont mis en relation avec les flux aux interfaces « Bassin versant » et « Milieu marin extérieur » en considérant quatre descripteurs supplémentaires (Tableau 3).

Tableau 3 : Descripteurs des pressions exercées sur l'écosystème

<i>Descripteurs</i>	<i>Signification</i>	<i>Unité</i>
NT <sub>In BV</sub>	Quantité annuelle d'azote importée dans la lagune via le bassin versant	tonnesN.y <sup>-1</sup>
PT <sub>In BV</sub>	Quantité annuelle de phosphore importée dans la lagune via le bassin versant	tonnesP.y <sup>-1</sup>
NT <sub>In MME</sub>	Quantité annuelle d'azote importée dans la lagune via le milieu marin extérieur	tonnesN.y <sup>-1</sup>
PT <sub>In MME</sub>	Quantité annuelle de phosphore importée dans la lagune via le milieu marin extérieur	tonnesP.y <sup>-1</sup>

### A titre d'exemple

L'évolution des descripteurs « Bassin versant » de la lagune de Bages-Sigean entre 2002 et 2015 est présentée sur la Figure 14. Depuis 2002, Les apports annuels en azote sont passés d'environ 200 tonnes en 2002 à moins de 80 tonnes en 2015. De même, les apports de phosphore, qui étaient d'environ 20 tonnes en 2002, ont été considérablement réduits pour atteindre environ 2 tonnes en 2015 (Figure 14).

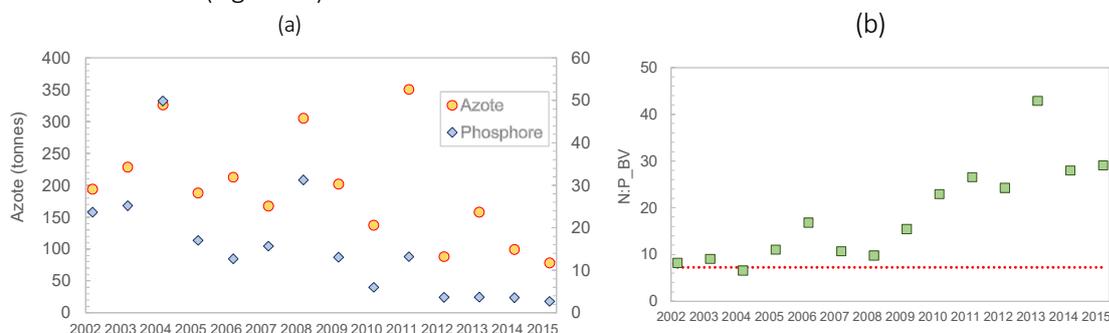


Figure 14 : (a) : Estimation des apports annuels d'azote et de phosphore à la lagune de Bages-Sigean par son bassin versant de 2002 – 2015. (b) : Rapport massique N:P correspondant. La ligne horizontale rouge correspond au rapport massique de Redfield dans le phytoplancton (~ 7.23).

Depuis 2004, le rapport N:P des apports « bassin versant » à la lagune de Bages-Sigean augmente et tend, sur les dernières années, à être de plus en plus limité par le phosphore.

## 7.2 Flux admissibles en azote et phosphore (point 2)

Les flux d'azote et de phosphore admissibles par une lagune sont définis comme la charge polluante maximale provenant de son bassin versant ne remettant pas en cause le respect de son objectif de qualité. Il correspond ainsi au cumul maximal, pour une substance, de rejets et émissions de polluants ponctuels et diffus dans son bassin versant permettant de respecter les objectifs de qualité (état écologique, état chimique, objectif spécifique aux usages eau potable, conchyliculture, baignade ...) du milieu. (Disposition OF 5A-02 SDAGE 2022 – 2027 du SDAGE du bassin Rhône-Méditerranée).

La restauration écologique des milieux lagunaires passe par un basculement du fonctionnement de l'écosystème d'une limitation par l'azote à une limitation par le phosphore ou une co-limitation par l'azote et le phosphore. **La méthode d'estimation des flux admissibles**, basée sur l'analyse exploratoire de scénarios normatifs<sup>15</sup>, vise à mettre à jour **un fonctionnement écologique équilibré de l'écosystème**. On considère qu'un tel fonctionnement est atteint lorsque i) : les indicateurs physico-chimique de la colonne d'eau ([NID], [PID], [NT], [PT]) et la métrique associée à la biomasse phytoplanctonique (basée sur les concentrations en Chlo.a) respectent les seuils DCE de « bon état » ; ii) : la biomasse d'algues opportunistes est compatible avec les valeurs observées dans des lagunes en bon état écologique (Fiandrino et al., 2022) ; iii) : à l'échelle d'une année, l'écosystème ne stocke pas de phosphore et peu d'azote dans les sédiments. Différents scénarios d'apports de matière exogènes et éventuellement endogènes via le compartiment sédimentaire sont construits à partir des conditions de forçage de la situation « repère ». Une analyse exploratoire des résultats de simulations, basée sur du clustering, permet de mettre à jour des fonctionnements type de l'écosystème. La combinaison des clusters obtenus et des contraintes de bon état imposées aux paramètres de la colonne d'eau, aux biomasses de phytoplancton et de macroalgues et à l'évolution des stocks sédimentaires aboutit à un abaque qui permet de quantifier les

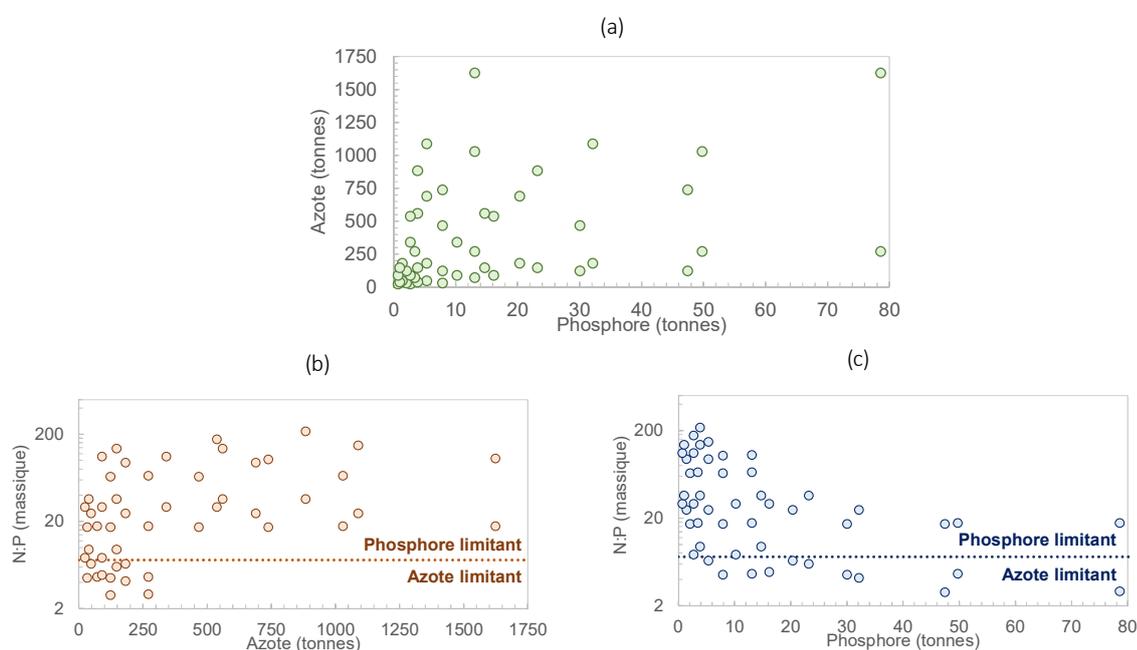
<sup>15</sup> Scénario normatif c-à-d « Comment peut-on atteindre un but fixé » (Borjeson et al., 2006)

Flux Admissibles par l'écosystème, c'est-à-dire les flux exogènes qui permettent/assurent un fonctionnement de l'écosystème compatible avec un bon état écologique (Fiandrino et al., *en prep*).

Cette méthode a été développée initialement sur la lagune de Bages-Sigean. Elle a par suite été complétée et affinée lors de sa mise en œuvre sur la lagune de l'Or, notamment pour mieux prendre en compte les sources endogènes (sédiment) de nutriments.

### 7.2.1 Estimation des Flux Admissibles sur la lagune de Bages-Sigean

Différentes conditions d'apports de matière ont été construites à partir de la situation « repère » en multipliant (par un facteur constant sur toute la période simulée) les concentrations en azote et phosphore dans les cours d'eau du bassin versant. Le plan d'expérience mis en place sur la lagune de Bages-Sigean (50 situations présentées sur la Figure 15) permet de sonder un large « domaine des possibles » en termes de limitation du fonctionnement écologique de l'écosystème par l'azote et le phosphore pour différents niveaux de quantité de matière apportée.



**Figure 15 :** (a) : Conditions d'apports en azote et phosphore (en tonnes) par le bassin versant de la lagune de Bages-Sigean pour les 50 situations testées. Valeurs associées des rapports N:P dans les apports en fonction des apports d'azote (b) et de phosphore (c). Les lignes en pointillé matérialisent le rapport massique de Redfield.

La plage de variation des quantités de matière apportées varie de [23 ; 1625] tonnes d'azote et de [0.7 ; 79] tonnes de phosphore (Figure 15haut). La plage de variation des rapports massiques N:P associés varie de [2.9 ; 216] (Figure 15bas). Afin d'étudier les conditions de restauration écologique, les situations testées privilégient les conditions pour lesquelles la production de biomasse est soit limitée par le phosphore, soit co-limitée par l'azote et le phosphore (78% des cas).

L'application de cette méthode sur la lagune de Bages-Sigean a permis d'estimer des flux admissibles en azote et en phosphore avec une plage d'incertitude associée. Si la variabilité est importante ( $FA_N = 120 \pm 99$  tonnes et  $FA_P = 3.2 \pm 2.7$  tonnes), les valeurs moyennes de ces flux sont compatibles avec les ordres de grandeurs des flux bassin versant qui alimentent la lagune de Bages-Sigean, lagune qui affiche aujourd'hui un bon état écologique.

## 7.2.2 Analyse de scénarios sur la lagune de l'Or

Les bilans annuels d'apports d'azote et de phosphore définis sur la lagune de l'Or pour la situation « repère » sur la période 2015 – 2018 (Picard, 2021) varient, en fonction de la pluviométrie, entre 342 Tonnes d'azote en année sèche (telle que 2017) et 465 Tonnes de N en année humide (telle que 2018) et entre 27 Tonnes et 32 Tonnes de phosphore (Figure 16). La part du Bassin Versant, qui regroupe le bassin versant naturel Nord et la Canalette, représente entre 35% (en année sèche) et 64% (en année humide) des apports d'azote et entre 32% (en année sèche) et 52% (en année humide) des apports de phosphore. Le complément est apporté par le Canal du Rhône à Sète (CRAS), qui pour cette lagune, représente le milieu marin extérieur vers lequel la matière est également exportée.

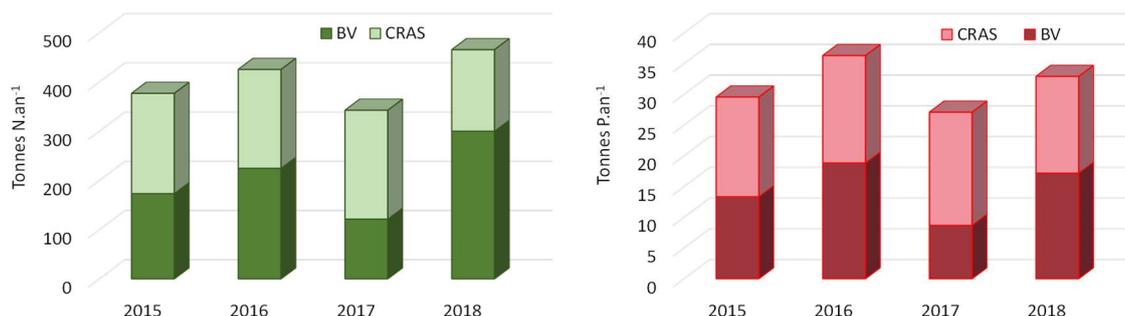


Figure 16 : Apports annuels d'azote (gauche) et de phosphore (droite) à la lagune de l'Or sur la période 2015-2018 en distinguant les contributions du Bassin Versant (somme du BV Nord et de la Canalette) et du CRAS.

Un plan d'expérience a été construit à partir de ces forçages afin de tester différents scénarios en termes de réduction des apports en provenance des 3 pôles d'apports exogènes (la Canalette, le bassin versant Nord, le canal du Rhône à Sète) et du compartiment sédimentaire. Les diminutions des apports d'azote et de phosphore (comparativement à la situation « repère actuelle ») par les sources exogènes ont été faites avec des pourcentages d'abattement allant de 0,1 % à 100 % et en considérant soit une diminution proportionnelle en azote et en phosphore, soit une diminution plus forte en phosphore afin d'augmenter le rapport N:P.

Concernant le compartiment sédimentaire, les stocks utilisés en condition initiale dans la situation « repère » sont ceux évalués en 2010 ( $NSed = 12\ 000\ mmol.m^{-2}$  et  $PSed = 724.6\ mmol.m^{-2}$ ) par Ouisse et al., 2013). Ils correspondent à un mauvais état pour l'azote et un état médiocre pour le phosphore. Des scénarios d'évolution des stocks ont été construits avec i) : une diminution de moitié et ii) : des valeurs correspondant à « un très bon état », ( $NSed = 2720,7\ mmol.m^{-2}$  et  $PSed = 484\ mmol.m^{-2}$  définis à partir de Ouisse et al., 2020). Au total 52 situations (incluant la situation actuelle) ont été simulées.

A titre d'exemple, l'analyse de scénarios possibles d'évolution de l'écosystème en réponse à des réductions d'apports exogènes et endogènes est présentée ici.

Les apports exogènes et les stocks sédimentaires actuels d'azote et de phosphore (scénarios P4 et O4 sur la Figure 8) aboutissent à un état dégradé de l'écosystème avec une production biologique excessive dominée préférentiellement soit par le phytoplancton (scénario P4) soit par les algues opportunistes (scénario O4). Une réduction des apports exogènes peut engendrer différentes réponses de l'écosystème en fonction de la compétition entre les micro et macroalgues sur la ressource en nutriments.

- **Scénario « Phytoplancton dominant »** (Figure 8-droite) : Avec la réduction des apports exogènes, les biomasses de phytoplancton diminuent d'un état « Mauvais » (scénarios P4 et P3) à un état « Médiocre » (scénario P2). En parallèle, la production d'algues opportunistes reste relativement limitée et les biomasses diminuent pour tendre vers le seuil « Très Bon à Bon ». Une réduction supplémentaire

importante des apports exogènes ( $N_T=125$  Tonnes.an<sup>-1</sup> et  $P_T=6.2$  Tonnes.an<sup>-1</sup>, scénario Sed\_ME - Figure 8-gauche :) permettrait d'atteindre des biomasses d'algues opportunistes compatibles avec un bon état pour ce compartiment et un état « Moyen » pour le phytoplancton. Même si ce scénario ne permet pas d'atteindre un bon état des compartiments « Phytoplancton » et « Colonne d'eau » (résultats non illustrés), une telle réduction des apports exogènes favorisent un déstockage massif de l'azote et du phosphore sédimentaires (résultats non illustrés). Cette diminution de la charge interne jusqu'à l'atteinte du bon état du compartiment « Sédiment » (scénario Sed-BE) est une condition préalable à la restauration de l'écosystème dans sa globalité.

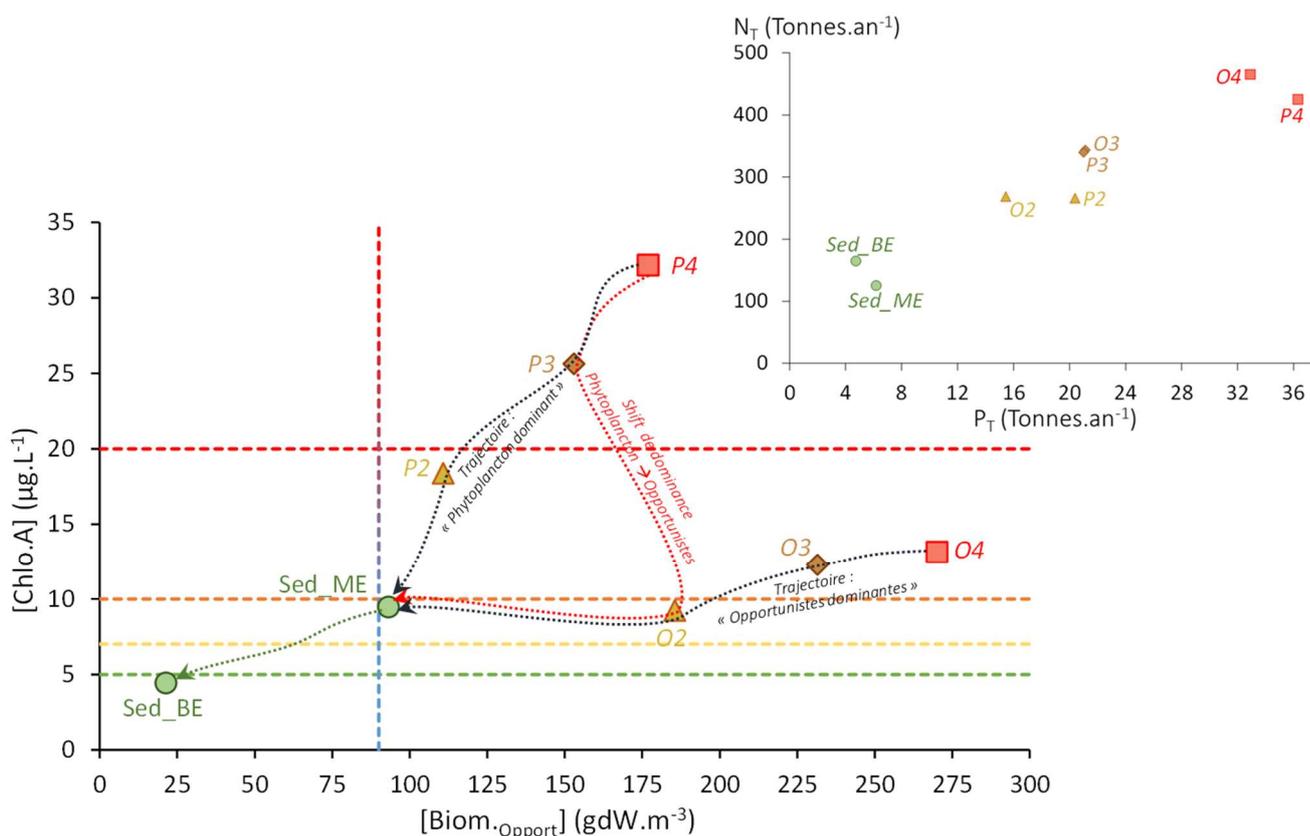


Figure 17 : (en haut à droite) : valeurs des descripteurs des apports d'azote et de phosphore à la lagune de l'Or par le bassin versant naturel Nord, la Canalette et le CRAS, pour 8 scénarios différents d'apports exogènes et endogènes. Les conditions initiales des stocks sédimentaires des scénarios P et O et du scénario Sed\_ME sont celles mesurées en 2010. Le scénario Sed\_BE correspond à des stocks sédimentaires initiaux d'azote et de phosphore en bon état. (en bas) : valeurs des descripteurs des compartiments « Phytoplancton » vs « Macrophyte » pour ces mêmes scénarios. La ligne verticale correspond à la limite supérieure de la plage des valeurs de biomasses algales pour l'état « Très Bon à Bon » ( $89.5 \text{gdW.m}^{-3}$ ).

- Scénario « Opportunistes dominantes » (Figure 8-droite) : la réduction des apports entraîne une diminution des biomasses algales (scénarios O3 et O2) qui restent toutefois bien supérieures au seuil « Très Bon à Bon ». La production phytoplanctonique est relativement limitée (proche du seuil « Médiocre »). Un tel fonctionnement, où les nutriments en excès alimentent préférentiellement les algues opportunistes, est rencontré sur la lagune du Grec et décrit par Le Fur et al. (2019).
- Shift de dominance du phytoplancton vers les algues opportunistes (Figure 8-droite) : la production biologique est dominée par le phytoplancton (scénario P4) et la diminution des apports initie, dans un premier temps, une réduction de cette production (scénario P3). Dans de telles conditions (notamment de pénétration de la lumière) la croissance des algues opportunistes peut être favorisée au détriment de la production phytoplanctonique qui est alors fortement limitée passant d'un état « Mauvais » à « Médiocre » (shift du scénario P3 vers le scénario O2). Un tel basculement a notamment été observé

sur la lagune du Méjean entre 2006 et 2009 après la mise en service de l'émissaire en mer de la station de traitement des eaux usées de Maera (Le Fur et al., 2019).

L'application de cette méthode sur la lagune de l'Or est en cours, en collaboration avec le Symbo (Fiandrino et al., *en prep*), et devrait aboutir à la construction d'un abaque qui fait le lien entre les apports exogènes et endogènes de nutriments et le fonctionnement écologique de l'écosystème. En renseignant sur les Flux Admissibles pour la lagune de l'Or, l'abaque ainsi obtenu aidera à la définition de leviers d'action efficaces.

### 7.3 Métriques et indicateurs DCE pour les compartiments « Colonne d'eau » « Phytoplancton », « Macrophyte » (point 3)

Plusieurs métriques, bases de calcul des indicateurs DCE, peuvent être estimées à partir des résultats de simulation et des relations mises à jour entre les variables d'état et les grandeurs observables (cf. §.4.3) :

- Les descripteurs hydrologiques des formes minérales de l'azote et du phosphore sont conformes à la réalité et reproduisent les tendances observées ;
- L'évolution de l'état du compartiment « Phytoplancton » peut être analysée uniquement au regard de l'évolution des biomasses phytoplanctoniques (via la variable Chlo.a) : le modèle reproduit les tendances à la diminution des concentrations en chlorophylle a observées sur le site pilote de Bages-Sigean depuis 2007 ainsi que l'hétérogénéité spatiale existant sur cette lagune (gradient décroissant du Nord au Sud). Sur la lagune de l'Or, l'intensité des blooms estivaux est également bien reproduite par le modèle. L'incapacité du modèle à reproduire les métriques DCE associées aux abondances ne constitue pas une limite d'utilisation de l'outil ;
- 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 est dans l'incapacité d'estimer correctement l'état du compartiment « Macrophyte » à partir de l'indicateur DCE. 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). L'analyse de données in situ a permis de proposer des plages de valeurs de biomasse d'algues opportunistes en fonction de l'état des macrophytes (Tableau 1, p. 32). Celles-ci seront utilisées pour rendre compte de l'évolution du compartiment « Macrophyte ».

## 8 Conclusions et perspectives

**Le modèle GAMELag constitue un outil d'intégration des connaissances acquises sur les écosystèmes lagunaires qui permet désormais de simuler l'évolution des flux / stocks de nutriments et de tester des scénarios de gestion. Il peut, en ce sens, constituer un support technique solide pour engager les démarches de définition des flux admissibles sur les lagunes qui souhaitent la mettre en œuvre.**

La version actuelle de l'outil est le fruit d'un long travail collectif qui a permis de :

- identifier et hiérarchiser les données d'entrée nécessaires au modèle,
- paramétrer les processus clés,
- quantifier les incertitudes sur les produits de sortie,
- définir les limites d'utilisation du modèle, notamment dans sa capacité (ou non) à reproduire les indicateurs DCE. Lorsque le modèle ne permet pas de calculer ces indicateurs (EQR abondances

phytoplanctoniques, EQR Macrophyte) des descripteurs « alternatifs » ont été élaborés et proposés pour, malgré tout, permettre l'évaluation de l'état simulé de ces compartiments.

- proposer des pistes d'amélioration de la conceptualisation de certains processus clé au sein du module biogéochimique (cycle de vie des macrophytes – dégradation de la matière organique dans les sédiments). Celles-ci permettront de réduire les incertitudes du modèle et d'affiner l'estimation des flux admissibles.

Ceci étant, **ce modèle se veut « simple » dans le sens où sa construction a toujours été guidée par l'utilisation des données disponibles et la production de sorties opérationnelles.** Les produits de sortie recherchés ne sont pas des données fines ou précises mais plutôt des proxys, des tendances et des fourchettes solides qui permettent aux acteurs de discuter et de progresser sur la recherche de leviers d'actions efficaces. Pour autant, il ne s'agit pas d'une interface « presse bouton » et sa mise en œuvre nécessite un niveau d'expertise important.

Dans ce contexte, le modèle GAMELag constitue aujourd'hui un outil opérationnel en appui à mise en œuvre de la démarche « Flux Admissibles » portée par le Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux (SDAGE) Rhône Méditerranée Corse<sup>16</sup> et déclinée dans la plupart des SAGE « lagunes » des bassins Rhône-Méditerranée et de Corse. Pour accompagner les structures de gestion des lagunes dans la mise en œuvre de cette démarche, une mission d'« *Appui au déploiement de la démarche des Flux Admissibles en nutriments pour les lagunes des bassins Rhône-Méditerranée et de Corse* » est aujourd'hui portée par la Tour du Valat, fondation reconnue pour son expertise et ses compétences techniques et scientifiques sur l'écologie des lagunes, en particulier les lagunes oligo et méso-halines et la modélisation.

Dans le cadre de cette mission d'appui, la Tour du Valat assurera une expertise de conseil sur les mesures (moyens techniques, stratégies d'échantillonnage, méthodes de calcul) à réaliser pour quantifier les flux de nutriments et mettra en œuvre l'outil GAMELag. Cette mission permettra ainsi progressivement de mutualiser les compétences et de capitaliser les retours d'expériences.

En outre, l'expertise de la Tour du Valat sur les masses d'eau oligo et méso-halines lui permettra d'améliorer l'outil en adaptant la formalisation de certains processus spécifiques aux milieux dessalés et notamment i) : l'introduction d'espèces de macrophytes spécifiques aux milieux dessalés, ii) : l'effet des matières en suspension sur l'abatement de la lumière dans la colonne d'eau; iii) : l'adaptation des flux sédimentaires.

---

<sup>16</sup> <https://rhone-mediterranee.eaufrance.fr/gestion-de-leau/sdage-2016-2021-en-vigueur/documents-dappui-pour-la-mise-en-oeuvre-du-sdage-2016>

## 9 Références bibliographiques

- Bec B., Collos Y., Souchu P., Vaquer A., Lautier J., Fiandrino A., Benau L., Orsoni V., Laugier T. (2011). Distribution of picophytoplankton and nanophytoplankton along an anthropogenic eutrophication gradient in French Mediterranean coastal lagoons. *Aquat. Microb. Ecol.* 63, 29–45.  
<https://doi.org/10.3354/ame01480>
- Börjeson L., Höjer M., Dreborg K.-H., Ekvall T., Finnveden G. (2006). Scenario types and techniques: Towards a user's guide. *Future* 38, 723-739. doi:10.1016/j.futures.2005.12.002
- Chang F. H., Bradford-Grieve J. M., Vincent W. F., Woods P. H. (1995) Nitrogen uptake by the summer size-fractionated phytoplankton assemblages in the Westland, New Zealand, upwelling system, New Zealand *Journal of Marine and Freshwater Research*, 29:2, 147-161, DOI: 10.1080/00288330.1995.9516650
- Chapelle A., Mesnage V., Mazouni N., Deslous-Paoli J.-M., Picot B. (1994). Modélisation des cycles de l'azote et du phosphore dans les sédiments d'une lagune soumise à une exploitation conchylicole. *Oceanologica Acta*, 17(6), 609-620. Open Access version : <https://archimer.ifremer.fr/doc/00039/15026/>
- Chapelle A. (1995). A preliminary model of nutrient cycling in sediments of a Mediterranean lagoon. *Ecological Modelling*, 80(2-3), 131-147 . [https://doi.org/10.1016/0304-3800\(94\)00073-Q](https://doi.org/10.1016/0304-3800(94)00073-Q)
- Chapelle A., Ménesguen A., Deslous-Paoli J.M., Souchu P., Mazouni N., Vaquer A., Millet B. (2000). Modelling nitrogen, primary production and oxygen in a Mediterranean lagoon. Impact of oysters farming and inputs from the watershed. *Ecol. Modell.* 127, 161–181. [https://doi.org/10.1016/S0304-3800\(99\)00206-9](https://doi.org/10.1016/S0304-3800(99)00206-9)
- Chapra S. C. (2003). Engineering Water Quality Models and TMDLs. *J. Water Resour. Plan. Manage.* 129(4), 247-256.
- Cugier P., Ménesguen A., Guillaud J.-F. (2005). Three-dimensional (3D) ecological modelling of the Bay of Seine (English Channel, France). *Journal Of Sea Research*, 54(1), 104-124.  
<https://doi.org/10.1016/j.seares.2005.02.009>
- Derolez V., Bec B., Munaron D., Foucault E., Fiandrino A., Ouisse V., Messiaen G., Hatey E., Connes C., Soudant D., Brun M., Fortune M., Mortreux S., Serais O., Crottier A., Malet N. (2019). OBSLAG 2018 - volet eutrophisation. Lagunes méditerranéennes (période 2013-2018). Etat DCE de la colonne d'eau et du phytoplancton, tendance et variabilité des indicateurs. RST/LER/LR/19.12.  
<https://archimer.ifremer.fr/doc/00507/61862/>
- Edwards K. F., Thomas M. K., Klausmeier C. A., Litchman E. (2012). Allometric scaling and taxonomic variation in nutrient utilization traits and maximum growth rate of phytoplankton. *Limnol. Oceanogr.*, 57(2), 554–566. doi:10.4319/lo.2012.57.2.0554
- Fiandrino A., Ouisse V., Dumas F., Lagarde F., Pete R., Malet N., Le Noc S., de Wit R. (2017). Spatial patterns in coastal lagoons related to the hydrodynamics of seawater intrusion. *Mar. Pollut. Bull.* 119, 132–144.  
<https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.03.006>.
- Gohin F., Loyer S, Lunven M., Labry C., Froidefond J, Delmas D., Huret M., Herbland A. (2005). Satellite-derived parameters for biological modelling in coastal waters: Illustration over the eastern continental shelf of the Bay of Biscay. *Remote Sensing of Environment*, 95(1), 29-46. Publisher's official version : <https://doi.org/10.1016/j.rse.2004.11.007> , Open Access version : <https://archimer.ifremer.fr/doc/00000/1172/>

Golz A. L., Burian A., Winder M. (2015). Stoichiometric regulation in micro and mesozooplankton. *J. Plankton Res.* (2015) 37(2): 293–305. doi:10.1093/plankt/fbu109

Gordon JR., D.C., Boudreau P.R., Mann K.H., Ong J.-E., Silvert W.L., Smith S.V., Wattayakorn G., Wulff F., Yanagi T. (1996). LOICZ biogeochemical modelling guidelines. LOICZ/R&S/95-5, VI +96 pp. LOICZ, Texel, The Netherlands.

Hydriad/Agence de l'eau (2022). Calculs de flux polluants sur les tributaires des lagunes du bassin Rhône Méditerranée. Juin 2022

Le Fur I., de Wit R., Plus M., Oheix J., Derolez V., Simier M., Malet N., Ouisse V. (2019). Re-oligotrophication trajectories of macrophyte assemblages in Mediterranean coastal lagoons based on 17-year time-series. *Marine Ecology Progress Series*, 608, 13-32. Publisher's official version:

<https://doi.org/10.3354/meps12814>, Open Access version: <https://archimer.ifremer.fr/doc/00474/58555/>.

Le Fur I., de Wit R., Plus M., Oheix J., Simier M., Ouisse V. (2018b). Submerged benthic macrophytes in Mediterranean lagoons: distribution patterns in relation to water chemistry and depth. *Hydrobiologia*, 808(1), 175-200. <https://doi.org/10.1007/s10750-017-3421-y>.

Le Fur I. (2018a). Rôle des macrophytes dans la restauration des milieux lagunaires : successions écologiques / Role of macrophytes in the restoration of lagoon environments : ecological succession. PhD Thesis, Université de Montpellier. <https://archimer.ifremer.fr/doc/00498/60959/>

Le Noc S., de Wit R., Malet N., Fiandrino A. (2012). Réseau de Suivi Lagunaire : outils d'aide à la gestion des milieux eutrophisés, les lagunes du Languedoc-Roussillon. Guide méthodologique.

Ménesguen A., Dussauze M., Dumas F., Thouvenin B., Garnier V., Lecornu F., Repecaud M. (2019). Ecological model of the Bay of Biscay and English Channel shelf for Environmental Status assessment Part 1: Nutrients, phytoplankton and oxygen. *Ocean Modelling*, 133, 56-78. Publisher's official version : <https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2018.11.002>, Open Access version : <https://archimer.ifremer.fr/doc/00469/58098/>

Ménesguen A., Cugier P., Loyer S., Vanhoutte-Brunier A., Hoch T., Guillaud J.-F., Gohin F. (2007). Two- or three-layered box-models versus fine 3D models for coastal ecological modelling ? A comparative study in the English Channel (Western Europe), 64, 47–65. <http://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2006.03.017>

Ouisse V., Fiandrino A., Giraud A. (2020). Expertise sur les stocks SEdimentaires en milieu lagunairE. Rapport du Projet EXSEDE. R.ODE/UL/LER/LR 20.13. <https://doi.org/10.13155/75435>

Ouisse V., Fiandrino A., de Wit R., Giraud A., Malet N. (2014). DEvenir du Phosphore et de l'Azote dans un contexte de ResTauratIon des milieux lagunaires méditerranéens - DEPART - . R.INT.ODE/UL/LER-LR 2014-14-22

Ouisse V., Fiandrino A., de Wit R., Malet N. (2013). Restauration des écosystèmes lagunaires : évaluation du rôle du sédiment et des herbiers à phanérogames. RST/LELR 13-09. <https://archimer.ifremer.fr/doc/00166/27774/>

Pete R., Guyondet T., Bec B., Derolez V., Cesmat L., Lagarde F., Pouvreau S., Fiandrino A., Richard M. (2020a). A box-model of carrying capacity of the Thau lagoon in the context of ecological status regulations and sustainable shellfish cultures. *Ecological Modelling*, 426, 109049 (17p.). Publisher's official version: <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2020.109049>, Open Access version: <https://archimer.ifremer.fr/doc/00622/73395/>.

Pete R., Fiandrino A., Malet N. (2020b). Fonctionnement écosystémique de la lagune de Biguglia. Partie 2 : Déploiement du modèle écosystémique GAMELag sur la lagune de Biguglia. ODE/UL/LER-PAC/20-01. <https://archimer.ifremer.fr/doc/00604/71564/>

Pete R., Guyondet T., Cesmat L., Fiandrino A., Bec B., Richard M. (2018a). Projet CAPATHAU : CAPAcité trophique de la lagune de THAU. Livrable 2. Description et évaluation du modèle GAMELag-Conch : modèle d'écosystème lagunaire exploité par la conchyliculture, adapté à la lagune de Thau. Rapport UMR MARBEC DLAL FEAMP. 48p.

Pete R., Richard M., Guyondet T., Cesmat L., Derolez V., Fiandrino A., Bec B. (2018b). Projet CAPATHAU : Capacité trophique de la lagune de Thau. Livrable 3 : Évaluation de la capacité de charge écosystémique de la lagune de Thau : Modélisation de scénarii de gestion. Rapport UMR MARBEC DLAL FEAMP. 39p.

Pete R., Fiandrino A., Mahevas S., Plus M., de Wit R. (2017). Fiabilisation de l'outil GAMELag. Rapport final du Contrat n°2015 0346. RST.ODE/UL/LER-LR 17-12.

Picard L. (2021). Application du modèle GAMELag à l'étang de l'Or et étude du devenir des nutriments. Rapport final. 70 p.

Plus M., Thouvenin B., Andrieux F., Dufois F., Ratmaya W., Souchu P. (2021a). Diagnostic étendu de l'eutrophisation (DIETE). Modélisation biogéochimique de la zone Vilaine-Loire avec prise en compte des processus sédimentaires. Description du modèle Bloom (Biogeochemical cOastal Ocean Model). RST/LER/MPL/21.15. <https://archimer.ifremer.fr/doc/00754/86567/>

Plus M., Souchu P., Ratmaya W., Thouvenin B., Dufois F. (2021b). Diagnostic étendu de l'eutrophisation (DIETE) - Modélisation biogéochimique de la zone Vilaine-Loire avec prise en compte des processus sédimentaires. Rapport de contrat pour AELB (période 2018-2021), 70 p.

Saguet C., Pete R., Massinelli L., Ouisse V., Mahévas S., Derolez V., giraud A., Stroffek S., Fiandrino A. (2019). GAMELag : de l'optimisation de l'outil à « l'exploration » des Flux Maximaux Admissibles. Rapport Final du Contrat n°2018 0158.

Symbo, 2019. Etude du fonctionnement hydrodynamique de l'étang de l'Or. Bilan imports/exports et hiérarchisation des sources de matière. Rapport d'étude final. 91p.

Zaldívar J.M., Bacelar F.S., Dueria S., Marinova D., Viaroli P., Hernández-García E., 2009. Modeling approach to regime shifts of primary production in shallow coastal ecosystems. Ecol. Modell. 220, 3100-3110. doi:10.1016/j.ecolmodel.2009.01.022

Zaldívar J.-M, Cardoso A.C., Viaroli P., de Wit R., Ibañez C., Reizopoulou S., Razinkovas A., Basset A., Holmer M., Murray N., 2008. Eutrophication in transitional waters : an overview. TWM, Transit. Waters Monogr. 1, 1-78. <https://doi.org/10.1285/i18252273v2n1p1>



## Annexe 1 : Variables d'état et système d'équations du modèle

### Variables d'état

Variables d'état	Définition	Processus Hydro/Biogéo	Unité
<b>Hydrologie</b>			
$V_R, V_R^{Int}$	Volume résiduel échangé avec la mer et entre les boîtes		m <sup>3</sup>
$S_{bi}$	Salinité dans la colonne d'eau	O/N	i.u.
<b>Nutriments inorganiques</b>			
$NO_3$	Concentration nitrate dans la colonne d'eau	O/O	mmolN.m <sup>-3</sup>
$NH_4$	Concentration ammonium	O/O	mmolN.m <sup>-3</sup>
$PO_4$	Concentration phosphate	O/O	mmolP.m <sup>-3</sup>
<b>Nutriments organiques</b>			
DONl, DONr	Azote organique dissous, labile et réfractaire	O/O	mmolN.m <sup>-3</sup>
DOPl, DOPr	Phosphore organique dissous, labile et réfractaire	O/O	mmolP.m <sup>-3</sup>
PONl, PONr	Azote organique particulaire, labile et réfractaire	O/O	mmolN.m <sup>-3</sup>
POPl, POPr	Phosphore organique particulaire, labile et réfractaire	O/O	mmolP.m <sup>-3</sup>
<b>Compartiments biologiques (Phytoplancton, Zooplancton, Macrophytes)</b>			
PS	Biomasse petit phytoplancton	O/O	mmolN.m <sup>-3</sup>
PL	Biomasse grand phytoplancton	O/O	mmolN.m <sup>-3</sup>
ZS	Biomasse petit zooplancton	N/O	mmolN.m <sup>-3</sup>
ZL	Biomasse grand zooplancton	N/O	mmolN.m <sup>-3</sup>
Ulva	Biomasse <i>Ulva</i>	N/O	gdw.m <sup>-3</sup>
QN Ulva	Quota azote <i>Ulva</i>	N/O	mmolN.gdw <sup>-1</sup>
QP Ulva	Quota phosphore <i>Ulva</i>	N/O	mmolP.gdw <sup>-1</sup>
Gracilaria	Biomasse <i>Gracilaria</i>	N/O	gdw.m <sup>-3</sup>
QN Graci	Quota azote <i>Gracilaria</i>	N/O	mmolN.gdw <sup>-1</sup>
QP Graci	Quota phosphore <i>Gracilaria</i>	N/O	mmolP.gdw <sup>-1</sup>
Zostera	Biomasse <i>Zostera</i>	N/O	gdw.m <sup>-2</sup>
QN zost	Quota azote <i>Zostera</i>	N/O	mmolN.gdw <sup>-1</sup>
QP zost	Quota phosphore <i>Zostera</i>	N/O	mmolP.gdw <sup>-1</sup>
<b>Sédiments</b>			
Nsed	Azote dans le sédiment	N/O	mmolN.m <sup>-2</sup>
Psed	Phosphore dans le sédiment	N/O	mmolP.m <sup>-2</sup>

## Equations du module biogéochimique

### Equations différentielles des variables d'état biogéochimiques

#### Hydrologie :

##### Volume résiduel entre les boîtes

L'indice  $j$  correspond aux boîtes et varie de 1 à  $j_{\max}$  = nombre de boîte.  $j = 0$  correspond au milieu marin extérieur et pour  $j = j_{\max}$ ,  $V_R^{(j \rightarrow j+1)} = 0$

Le volume résiduel  $V_R^{(j-1 \rightarrow j)}(t) = |V^{(j-1 \rightarrow j)}(t)| - |V^{(j \rightarrow j+1)}(t)|$  est défini positif entrant dans la boîte «  $j$  » via la boîte «  $j-1$  » c'est-à-dire lorsque la boîte «  $j-1$  » alimente la boîte «  $j$  »

$$\frac{dV_R^{(j-1 \rightarrow j)}(t)}{dt} = \frac{d}{dt} [V_E^j(t) - (V_Q^j(t) + V_P^j(t))] + \frac{dV_R^{(j \rightarrow j+1)}(t)}{dt} \quad (\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1})$$

Le volume évaporé est calculé à partir de la surface des boîtes ( $S^j$ ) et de la formulation de Penman (1948). Cette formulation prend en compte la température de l'air ( $T_{\text{Air}}$  exprimée en °C), l'humidité relative (Hum exprimée en %), la vitesse du vent ( $V_{\text{vent}}$  exprimée en  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) et le rayonnement global ( $R$  exprimé en  $10^6 \cdot \text{J} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ ).

$$V_P^j(t) = S^j \times [0.4 EV_1 \cdot R + (1 - EV_1) \cdot E_a] \quad \text{avec} \quad EV_1 = 0.51 + 0.009 T_{\text{Air}} ; \text{ et}$$

$$E_a = 0.26 \times (1 + 0.54 V_{\text{vent}}) \times e_a \left( \frac{\text{Hum}}{100} - 1 \right) \quad \text{avec} \quad e_a = 0.98 \times e^{2.302 \cdot \left( 7.5 \frac{T_{\text{Air}}}{237.3 + T_{\text{Air}}} + 0.7858 \right)}$$

##### Salinité

$$\frac{dS^j(t)}{dt} = \frac{d}{dt} \left[ 0.5 V_R^{(j-1 \rightarrow j)}(t) \times (S^{j-1}(t) + S^j(t)) + V_x^{(j-1/j)}(t) \times (S^{j-1}(t) - S^j(t)) - 0.5 V_R^{(j \rightarrow j+1)}(t) \times (S^{j+1}(t) + S^j(t)) \right. \\ \left. + V_x^{(j/j+1)}(t) \times (S^{j+1}(t) - S^j(t)) \right] \quad (\text{d}^{-1})$$

$V_x^{j-1/j}(t)$  représente le volume de mélange entre les boîtes  $j-1$  et  $j$ .  $j = 0$  correspond au milieu marin extérieur et pour  $j = j_{\max}$ ,  $V_x^{(j+1/j)} = 0$  et  $S^{j+1} = 0$ .

## Nutriments

$$\frac{d[NH_4]}{dt} = Flux_{BV}^{NH_4} + Flux_{Atm.}^{NH_4} \pm Flux_{MMEExt.}^{NH_4} + \frac{FxNH_4}{Z_{bottom}} + elysDONr \times [DONr] + elysDONl \times [DONl] + reg_{ZS}^{NH_4} + reg_{ZL}^{NH_4} - Nitrif$$

$$- NH_4uptake_{phyto} - NH_4uptake_{Ulva} \times [Ulva] - NH_4uptake_{Graci} \times [Graci] - LABS_{NH_4} \times \frac{[Zost]}{Z_{bottom}}$$

(mmol N.m<sup>-3</sup>.d<sup>-1</sup>)

$$\frac{d[NO_3]}{dt} = Flux_{BV}^{NO_3} \pm Flux_{MMEExt.}^{NO_3} + \frac{FxNO_3}{Z_{bottom}} + Nitrif - NO_3uptake_{phyto} - NO_3uptake_{Ulva} \times [Ulva] - NO_3uptake_{Graci} \times [Graci]$$

$$- LABS_{NO_3} \times \frac{[Zost]}{Z_{bottom}}$$

(mmol N.m<sup>-3</sup>.d<sup>-1</sup>)

$$\frac{d[PO_4]}{dt} = Flux_{BV}^{PO_4} + Flux_{Atm.}^{PO_4} \pm Flux_{MMEExt.}^{PO_4} + \frac{FxPO_4}{Z_{bottom}} + elysDOPr \times [DOPr] + elysDOPl \times [DOPl] + \varphi^{PO} \times death_{Ulva}$$

$$\times QP_{Ulva} + \theta^{PO} \times death_{Graci} \times QP_{Graci} - PO_4uptake_{phyto} - PO_4uptake_{Ulva} \times [Ulva] - PO_4uptake_{Graci}$$

$$\times [Graci] - LABS_{PO_4} \times \frac{[Zost]}{Z_{bottom}}$$

(mmol P.m<sup>-3</sup>.d<sup>-1</sup>)

Avec

$$Nitrif = \mu_{Nit_0} \times e^{kT \times T} \times [NH_4]$$

(mmol N.m<sup>-3</sup>.d<sup>-1</sup>)

## Phytoplankton

$$\frac{d[PS]}{dt} = -Flux_{MMEExt.}^{PS} + growth_{PS} - lysis_{PS} - growth_{ZS} - ZL_{Prey}_{PS} \times growth_{ZL} - exudation_{PS}$$

(mmol N.m<sup>-3</sup>.d<sup>-1</sup>)

$$\frac{d[PL]}{dt} = -Flux_{MMEExt.}^{PL} + growth_{PL} - lysis_{PL} - ZL_{Prey}_{PL} \times growth_{ZL} - exudation_{PL} - \frac{vsed_{PL}}{Z_{bottom}} \times [PL]$$

(mmol N.m<sup>-3</sup>.d<sup>-1</sup>)

Avec

$$growth_{PS/PL} = \mu_{PS/PL} \times [PS/PL] \quad (\text{mmol N.m}^{-3}.\text{d}^{-1})$$

$$\mu_{PS/PL} = \mu_{PS/PL}^{\max} \times f(I)_{PS/PL} \times f(T)_{PS/PL} \times f(SN)_{PS/PL} \quad (\text{d}^{-1})$$

$$f(I)_{PS/PL} = 1 - e^{-\left(\frac{I}{I_{optPS/PL}}\right)} \quad (\text{Adim})$$

$$I = I_0 \times e^{-kl \times z_{phyto}} \quad (\text{W.m}^{-2})$$

$$kl = 0.04 + 0.0377 \times Conv_{C/N} \times ([PONl] + [PONr]) + 0.161 \times \left(\frac{[PS] + [PL]}{Chlo.a:N}\right)^{0.721} \quad (\text{m}^{-1}) \quad \text{avec} \quad z_{phyto} = \frac{z_{bottom}}{2} \quad (\text{m})$$

$$f(T)_{PS/PL} = \frac{1}{1 + e^{-\zeta_{PS/PL} \times (T - T_{PS/PL})}} \quad (\text{Adim})$$

$$f(SN)_{PS/PL} = \min[f(N)_{PS/PL}; f(P)_{PS/PL}] \quad (\text{Adim})$$

$$f(N)_{PS} = f(NO3)_{PS} + f(NH4)_{PS} = \frac{[NO3]}{[NO3] + KN_{PS}} \times e^{-\psi_{PS} \times [NH4]} + \frac{[NH4]}{[NH4] + KN_{PS}} \quad (\text{Adim})$$

$$f(N)_{PL} = f(NO3)_{PL} + f(NH4)_{PL} = \frac{[NO3]}{[NO3] + [NH4] + KN_{PL}} + \frac{[NH4]}{[NO3] + [NH4] + KN_{PS}}$$

$$f(P)_{PS/PL} = \frac{[PO4]}{[PO4] + KP_{PS/PL}} \quad (\text{Adim})$$

$$NH4_{uptake}_{phyto} = \mu_{PS} \times \frac{f(NH4)_{PS}}{f(N)_{PS}} \times [PS] + \mu_{PL} \times \frac{[NH4]}{[NH4] + [NO3]} \times [PL] \quad (\text{mmol N.m}^{-3}.\text{d}^{-1})$$

$$NO3_{uptake}_{phyto} = \mu_{PS} \times \frac{f(NO3)_{PS}}{f(N)_{PS}} \times [PS] + \mu_{PL} \times \frac{[NO3]}{[NH4] + [NO3]} \times [PL] \quad (\text{mmol N.m}^{-3}.\text{d}^{-1})$$

$$PO4_{uptake}_{phyto} = \mu_{PS} \times f(P)_{PS} \times \frac{[PS]}{NP_{phyto}} + \mu_{PL} \times f(P)_{PL} \times \frac{[PL]}{NP_{phyto}} \quad (\text{mmol P.m}^{-3}.\text{d}^{-1})$$

$$lysis_{PS} = kly_{PS}[PS] \quad \text{et} \quad lysis_{PL} = kly_{PS}[PL] \quad (\text{mmol N.m}^{-3}.\text{d}^{-1})$$

$$exudation_{PS} = ke_{PS}[PS] \quad \text{et} \quad exudation_{PL} = ke_{PL}[PL] \quad (\text{mmol N.m}^{-3}.\text{d}^{-1})$$



## Zooplancton

$$\frac{d[ZS]}{dt} = Y_{ZS} \times growth_{ZS} - lysis_{ZS} - ZL\_Prey\_ZS \times growth_{ZL} - reg_{ZS}^{NH4} \quad (\text{mmol N.m}^{-3}.\text{d}^{-1})$$

$$\frac{d[ZL]}{dt} = Y_{ZL} \times growth_{ZL} - lysis_{ZL} - reg_{ZL}^{NH4} \quad (\text{mmol N.m}^{-3}.\text{d}^{-1})$$

Avec

$$growth_{ZS} = g_{ZS} \times [ZS] \quad (\text{mmol N.m}^{-3}.\text{d}^{-1})$$

$$g_{ZS} = g_{ZS}^{max} \times f(T)_{Zoo} \times \left(1 - e^{-K_{ZS}^{lev} \times \max[0; (\varphi_{ZS} - \varphi_{ZS}^0)]}\right) \quad (\text{d}^{-1})$$

$$\varphi_{ZS} = Eff_{ZS}^{PS} \times [PS] \quad (\text{mmol N.m}^{-3})$$

$$f(T)_{Zoo} = e^{kT_{Zoo} \times T} \quad (\text{Adim.})$$

$$growth_{ZL} = g_{ZL} \times [ZL] \quad (\text{mmol N.m}^{-3}.\text{d}^{-1})$$

$$g_{ZL} = g_{ZL}^{max} \times f(T)_{Zoo} \times \left(1 - e^{-K_{ZL}^{lev} \times \max[0; (\varphi_{ZL} - \varphi_{ZL}^0)]}\right) \quad (\text{d}^{-1})$$

$$\varphi_{ZL} = Eff_{ZL}^{PS} \times [PS] + Eff_{ZL}^{PL} \times [PL] + Eff_{ZL}^{ZS} \times [ZS] \quad (\text{mmol N.m}^{-3})$$

$$ZL\_Prey\_PS = \frac{Eff_{ZL}^{PS} \times [PS]}{\varphi_{ZL}} \quad (\text{Adim.})$$

$$ZL\_Prey\_PL = \frac{Eff_{ZL}^{PL} \times [PL]}{\varphi_{ZL}} \quad (\text{Adim.})$$

$$ZL\_Prey\_ZS = \frac{Eff_{ZL}^{ZS} \times [ZS]}{\varphi_{ZL}} \quad \text{avec} \quad ZL\_Prey\_PS + ZL\_Prey\_PL + ZL\_Prey\_ZS = 1 \quad (\text{Adim.})$$

$$lysis_{ZS} = Kd_{ZS} \times f(T)_{Zoo} \times [ZS] \quad (\text{mmol N.m}^{-3}.\text{d}^{-1})$$

$$lysis_{ZL} = Kd_{ZL} \times f(T)_{Zoo} \times [ZL] \quad (\text{mmol N.m}^{-3}.\text{d}^{-1})$$

$$reg_{ZS}^{NH4} = \max[g_{ZS} \times reg_{ZS}; reg_{ZS}^{min} \times f(T)_{Zoo}] \times [ZS] \quad (\text{mmol N.m}^{-3}.\text{d}^{-1})$$

$$reg_{ZL}^{NH4} = \max[g_{ZL} \times reg_{ZL}; reg_{ZL}^{min} \times f(T)_{Zoo}] \times [ZL] \quad (\text{mmol N.m}^{-3}.\text{d}^{-1})$$

### Matière organique - Azote

$$\begin{aligned} \frac{d[DONI]}{dt} = & Flux_{BV}^{DONI} \pm Flux_{MMEExt.}^{DONI} + exudation_{PS} + exudation_{PL} + kIP \times [PONI] + labi \\ & \times \{(1 - \eta^P) \times death_{Ulva} \times QN_{Ulva} + (1 - \omega^P) \times death_{Graci} \times QN_{Graci} + (1 - \varepsilon) \times (lysis_{PS} + lysis_{PL} + lysis_{ZS} + lysis_{ZL})\} \\ & + \frac{FxDONI}{Z_{bottom}} + (1 - \gamma) \times \{(1 - Y_{ZS}) \times growth_{ZS} + (1 - Y_{ZL}) \times growth_{ZL}\} - elysDONI \times [DONI] \end{aligned} \quad (\text{mmol N.m}^{-3}.\text{d}^{-1})$$

$$\begin{aligned} \frac{d[DONr]}{dt} = & Flux_{BV}^{DONr} \pm Flux_{MMEExt.}^{DONr} + krP \times [PONr] + (1 - labi) \\ & \times \{(1 - \eta^P) \times death_{Ulva} \times QN_{Ulva} + (1 - \omega^P) \times death_{Graci} \times QN_{Graci} + (1 - \varepsilon) \times (lysis_{PS} + lysis_{PL} + lysis_{ZS} + lysis_{ZL})\} \\ & + \frac{FxDONr}{Z_{bottom}} - elysDONr \times [DONr] \end{aligned} \quad (\text{mmol N.m}^{-3}.\text{d}^{-1})$$

$$\begin{aligned} \frac{d[PONI]}{dt} = & -Flux_{MMEExt.}^{PONI} + \gamma \times \{(1 - Y_{ZS}) \times growth_{ZS} + (1 - Y_{ZL}) \times growth_{ZL}\} + labi \\ & \times \{\eta^P \times death_{Ulva} \times QN_{Ulva} + \omega^P \times death_{Graci} \times QN_{Graci} + \varepsilon \times (lysis_{PS} + lysis_{PL} + lysis_{ZS} + lysis_{ZL})\} - V_{sedOM} \\ & \times [PONI] - kIP \times [PONI] \end{aligned} \quad (\text{mmol N.m}^{-3}.\text{d}^{-1})$$

$$\begin{aligned} \frac{d[PONr]}{dt} = & -Flux_{MMEExt.}^{PONr} + death_{Zost} \times \frac{QN_{Zost}}{Z_{bottom}} + (1 - labi) \\ & \times \{\eta^P \times death_{Ulva} \times QN_{Ulva} + \omega^P \times death_{Graci} \times QN_{Graci} + \varepsilon \times (lysis_{PS} + lysis_{PL} + lysis_{ZS} + lysis_{ZL})\} - V_{sedOM} \\ & \times [PONr] - krP \times [PONr] \end{aligned} \quad (\text{mmol N.m}^{-3}.\text{d}^{-1})$$

### Matière organique - Phosphore

$$\begin{aligned} \frac{d[DOPl]}{dt} = & Flux_{BV}^{DOPl} \pm Flux_{MMEExt.}^{DOPl} + \frac{exudation_{PS} + exudation_{PL}}{NP_{phyto}} + klP \times [POPl] + labi \\ & \times \left\{ (1 - \varphi^P - \varphi^{P0}) \times death_{Ulva} \times QP_{Ulva} + (1 - \theta^P - \theta^{P0}) \times death_{Graci} \times QP_{Graci} + (1 - \varepsilon) \right. \\ & \times \left( \frac{lysis_{PS} + lysis_{PL}}{NP_{phyto}} + \frac{lysis_{ZS} + lysis_{ZL}}{NP_{Zoo}} \right) \left. \right\} + \frac{FxDOPl}{z_{bottom}} + (1 - \gamma) \times \frac{(1 - Y_{ZS}) \times growth_{ZS} + (1 - Y_{ZL}) \times growth_{ZL}}{NP_{Zoo}} - elysDOPl \\ & \times [DOPl] \end{aligned} \quad (\text{mmol P.m}^{-3}.\text{d}^{-1})$$

$$\begin{aligned} \frac{d[DOPr]}{dt} = & Flux_{BV}^{DOPr} \pm Flux_{MMEExt.}^{DOPr} + krP \times [POPr] + (1 - labi) \\ & \times \left\{ (1 - \varphi^P - \varphi^{P0}) \times death_{Ulva} \times QP_{Ulva} + (1 - \theta^P - \theta^{P0}) \times death_{Graci} \times QP_{Graci} + (1 - \varepsilon) \right. \\ & \times \left( \frac{lysis_{PS} + lysis_{PL}}{NP_{phyto}} + \frac{lysis_{ZS} + lysis_{ZL}}{NP_{Zoo}} \right) \left. \right\} + \frac{FxDOPr}{z_{bottom}} - elysDOPr \times [DOPr] \end{aligned} \quad (\text{mmol P.m}^{-3}.\text{d}^{-1})$$

$$\begin{aligned} \frac{d[POPl]}{dt} = & -Flux_{MMEExt.}^{POPl} + \gamma \times \frac{(1 - Y_{ZS}) \times growth_{ZS} + (1 - Y_{ZL}) \times growth_{ZL}}{NP_{Zoo}} + labi \\ & \times \left\{ \varphi^P \times death_{Ulva} \times QP_{Ulva} + \theta^P \times death_{Graci} \times QP_{Graci} + \varepsilon \times \left( \frac{lysis_{PS} + lysis_{PL}}{NP_{phyto}} + \frac{lysis_{ZS} + lysis_{ZL}}{NP_{Zoo}} \right) \right\} - V_{sedOM} \\ & \times [POPl] - klP \times [POPl] \end{aligned} \quad (\text{mmol P.m}^{-3}.\text{d}^{-1})$$

$$\begin{aligned} \frac{d[POPr]}{dt} = & -Flux_{MMEExt}^{POPr} + death_{Zost} \times \frac{QP_{Zost}}{Z_{bottom}} + (1 - labi) \\ & \times \left\{ \varphi^P \times death_{Ulva} \times QP_{Ulva} + \theta^P \times death_{Graci} \times QP_{Graci} + \varepsilon \times \left( \frac{lysis_{PS} + lysis_{PL}}{NP_{phyto}} + \frac{lysis_{ZS} + lysis_{ZL}}{NP_{Zoo}} \right) \right\} - V_{sedOM} \\ & \times [POPr] - krP \times [POPr] \end{aligned} \quad (\text{mmol P.m}^{-3}.\text{d}^{-1})$$

Avec

$$\begin{aligned} klP &= k_{lP}^{max} \times e^{-\left(\frac{T-T_{optOM}}{T_{widthOM}}\right)^2} & \text{et} & \quad krP = k_{rP}^{max} \times e^{-\left(\frac{T-T_{optOM}}{T_{widthOM}}\right)^2} & (\text{d}^{-1}) \\ elysDONl &= V_l^D \times \frac{[DONl]}{[DONl] + K_l} & \text{et} & \quad elysDONr = V_r^D \times \frac{[DONr]}{[DONr] + K_r} & (\text{d}^{-1}) \\ elysDOPl &= V_l^D \times \frac{[DOPl]}{[DOPl] + K_l} & \text{et} & \quad elysDOPr = V_r^D \times \frac{[DOPr]}{[DOPr] + K_r} & (\text{d}^{-1}) \\ V_l^D &= V_{lD}^{max} \times e^{-\left(\frac{T-T_{optOM}}{T_{widthOM}}\right)^2} & \text{et} & \quad V_r^D = V_{rD}^{max} \times e^{-\left(\frac{T-T_{optOM}}{T_{widthOM}}\right)^2} & (\text{d}^{-1}) \end{aligned}$$

Ulves

$$\begin{aligned} \frac{d[Ulva]}{dt} &= growth_{Ulva} - death_{Ulva} & (\text{gdw.m}^{-3}.\text{d}^{-1}) \\ \frac{d[QN]_{Ulva}}{dt} &= NO3uptake_{Ulva} + NH4uptake_{Ulva} - \mu_{Ulva} \times [QN]_{Ulva} & (\text{mmolN.gwd}^{-1}.\text{d}^{-1}) \\ \frac{d[QP]_{Ulva}}{dt} &= PO4uptake_{Ulva} - \mu_{Ulva} \times [QP]_{Ulva} & (\text{mmolN.gwd}^{-1}.\text{d}^{-1}) \end{aligned}$$

Avec

$$growth_{Ulva} = \mu_{Ulva} \times [Ulva] \quad (\text{gdw.m}^{-3}.\text{d}^{-1})$$

$$\mu_{Ulva} = \mu_{Ulva}^{max} \times f(I)_{Ulva} \times f(T)_{Ulva} \times f(SN)_{Ulva} \quad (\text{d}^{-1})$$

$$f(I)_{Ulva} = 1 - e^{-\frac{I_{bottom}}{I_{optUlva}}} \quad (\text{Adim.})$$

$$I_{bottom} = I_0 \times e^{-kI \times z_{bottom}} \quad (\text{W.m}^{-2})$$

$$f(T)_{Ulva} = \frac{1}{1 + e^{-\zeta_{Ulva}^1 \times (T - T_{Ulva})}} \quad (\text{Adim.})$$

$$f(SN)_{Ulva} = \min[f(QN)_{Ulva}; f(QP)_{Ulva}] \quad (\text{Adim})$$

$$f(QN)_{Ulva} = \frac{[QN]_{Ulva} - [QN]_{Ulva}^{min}}{[QN]_{Ulva}^{max} - [QN]_{Ulva}^{min}} \quad \text{et} \quad f(QP)_{Ulva} = \frac{[QP]_{Ulva} - [QP]_{Ulva}^{min}}{[QP]_{Ulva}^{max} - [QP]_{Ulva}^{min}} \quad (\text{Adim})$$

$$NH4uptake_{Ulva} = VNH4_{Ulva} \times \frac{[NH4]}{[NH4] + KNH4_{Ulva}} \times (1 - f(QN)_{Ulva}) \quad (\text{mmolN.gwd}^{-1}.\text{d}^{-1})$$

$$NO3uptake_{Ulva} = VNO3_{Ulva} \times \frac{[NO3]}{[NO3] + KNO3_{Ulva}} \times (1 - f(QN)_{Ulva}) \quad (\text{mmolN.gwd}^{-1}.\text{d}^{-1})$$

$$PO4uptake_{Ulva} = VPO4_{Ulva} \times \frac{[PO4]}{[PO4] + KPO4_{Ulva}} \times (1 - f(QP)_{Ulva}) \quad (\text{mmolP.gwd}^{-1}.\text{d}^{-1})$$

$$death_{Ulva} = \frac{mort_{Ulva}^{max}}{1 + e^{-\zeta_{Ulva}^2 \times (T - T_{Ulva}^{max})}} \times [Ulva] \quad (\text{gdw.m}^{-3}.\text{d}^{-1})$$

### Gracilaires

$$\frac{d[Graci]}{dt} = growth_{Graci} - death_{Graci} \quad (\text{gdw.m}^{-3}.\text{d}^{-1})$$

$$\frac{d[QN]_{Graci}}{dt} = NO3uptake_{Graci} + NH4uptake_{Graci} - \mu_{Graci} \times [QN]_{Graci} \quad (\text{mmolN.gwd}^{-1}.\text{d}^{-1})$$

$$\frac{d[QP]_{Graci}}{dt} = PO4_{uptake}_{Graci} - \mu_{Graci} \times [QP]_{Graci} \quad (\text{mmolN.gwd}^{-1}.\text{d}^{-1})$$

Avec

$$growth_{Graci} = \mu_{Graci} \times [Graci] \quad (\text{gdw.m}^{-3}.\text{d}^{-1})$$

$$\mu_{Graci} = \mu_{Graci}^{max} \times f(I)_{Graci} \times f(T)_{Graci} \times f(SN)_{Graci} \quad (\text{d}^{-1})$$

$$f(I)_{Graci} = 1 - e^{-\frac{I_{bottom}}{I_{opt}Graci}} \quad (\text{Adim.})$$

$$f(T)_{Graci} = \frac{1}{1 + e^{-\zeta_{Graci}^1 \times (T - T_{Graci})}} \quad (\text{Adim.})$$

$$f(SN)_{Graci} = \min[f(QN)_{Graci}; f(QP)_{Graci}] \quad (\text{Adim})$$

$$f(QN)_{Graci} = \frac{[QN]_{Graci} - [QN]_{Graci}^{min}}{[QN]_{Graci}^{max} - [QN]_{Graci}^{min}} \quad \text{et} \quad f(QP)_{Graci} = \frac{[QP]_{Graci} - [QP]_{Graci}^{min}}{[QP]_{Graci}^{max} - [QP]_{Graci}^{min}} \quad (\text{Adim})$$

$$NH4_{uptake}_{Graci} = VN_{NH4}_{Graci} \times \frac{[NH4]}{[NH4] + KN_{NH4}_{Graci}} \times (1 - f(QN)_{Graci}) \quad (\text{mmolN.gwd}^{-1}.\text{d}^{-1})$$

$$NO3_{uptake}_{Graci} = VN_{NO3}_{Graci} \times \frac{[NO3]}{[NO3] + KN_{NO3}_{Graci}} \times (1 - f(QN)_{Graci}) \quad (\text{mmolN.gwd}^{-1}.\text{d}^{-1})$$

$$PO4_{uptake}_{Graci} = VP_{PO4}_{Graci} \times \frac{[PO4]}{[PO4] + KP_{PO4}_{Graci}} \times (1 - f(QP)_{Graci}) \quad (\text{mmolP.gwd}^{-1}.\text{d}^{-1})$$

$$death_{Graci} = \frac{mort_{Graci}^{max}}{1 + e^{-\zeta_{Graci}^2 \times (T - T_{Graci}^{max})}} \times [Graci] \quad (\text{gdw.m}^{-3}.\text{d}^{-1})$$

Zostères

$$\frac{d[Zost]}{dt} = growth_{Zost} - death_{Zost} \quad (\text{gdw.m}^{-2}.\text{d}^{-1})$$

$$\frac{d[QN]_{Zost}}{dt} = LABS_{NH4} + LABS_{NO3} - \mu_{Zost} \times [QN]_{Zost} \quad (\text{mmolN.gwd}^{-1}.\text{d}^{-1})$$

$$\frac{d[QP]_{Zost}}{dt} = LABS_{PO4} - \mu_{Zost} \times [QP]_{Zost} \quad (\text{mmolN.gwd}^{-1}.\text{d}^{-1})$$

Avec

$$growth_{Zost} = \mu_{Zost} \times [Zost] \quad (\text{gdw.m}^{-2}.\text{d}^{-1})$$

$$\mu_{Zost} = \mu_{Zost}^{max} \times f(I)_{Zost} \times f(T)_{Zost} \times f(SN)_{Zost} \quad (\text{d}^{-1})$$

$$f(I)_{Zost} = \tanh\left(\frac{I_0 \times e^{-kl \times (z_{bottom} - z_{canopy})} \times e^{-K_3 \times z_{Zost}}}{Ik_{Zost}}\right) \quad \text{avec} \quad z_{canopy} = \max[1, z_{bottom}]; z_{Zost} = z_{bottom} - \frac{z_{canopy}}{2} \quad (\text{Adim.})$$

$$f(T)_{Zost} = \frac{1}{1 + e^{-\zeta_{Zost} \times (T - T_{Zost})}} \quad (\text{Adim.})$$

$$f(SN)_{Zost} = \min[f(QN)_{Zost}; f(QP)_{Zost}] \quad (\text{Adim})$$

$$f(QN)_{Zost} = \frac{[QN]_{Zost} - LN_{Zost}^{min}}{LN_{Zost}^{max} - LN_{Zost}^{min}} \quad \text{et} \quad f(QP)_{Zost} = \frac{[QP]_{Zost} - LP_{Zost}^{min}}{LP_{Zost}^{max} - LP_{Zost}^{min}} \quad (\text{Adim})$$

$$LABS_{NH4} = LV_N^{max} \times \frac{[NH4]}{[NH4] + KLn_{NH4}_{Zost}} \times (1 - f(QN)_{Zost}) \quad (\text{mmolN.gwd}^{-1}.\text{d}^{-1})$$

$$LABS_{NO3} = LV_N^{max} \times \frac{[NO3]}{[NO3] + KLn_{NO3}_{Zost}} \times (1 - f(QN)_{Zost}) \quad (\text{mmolN.gwd}^{-1}.\text{d}^{-1})$$

$$LABS_{PO4} = LV_P^{max} \times \frac{[PO4]}{[PO4] + KLp_{PO4}_{Zost}} \times (1 - f(QP)_{Zost}) \quad (\text{mmolP.gwd}^{-1}.\text{d}^{-1})$$

$$death_{Zost} = ZM \times [Zost] \quad (\text{gdw.m}^{-2}.\text{d}^{-1}) \quad \text{avec} \quad ZM = LMR_{20^\circ C} \times f(T)_{ZM} + f(V)_{ZM} \quad (\text{Adim.})$$

$$\text{et} \quad f(T)_{ZM} = \frac{1}{1 + e^{-\theta_{LM} \times (T - T_{Zost}^{max})}} \quad \text{si } Vit_{vent} > 10 \text{ m.s}^{-1} \quad f(V)_{ZM} = \frac{LMR_V \times Vit_{vent} \times e^{-K_4 \times z_{Zost}}}{1 + e^{-0.05 \times (z_{Zost} - 100)}} \quad \text{Sinon } f(V)_{ZM} = 0 \quad (\text{Adim.})$$

### Sédiment

$$\frac{d[N_{Sed}]}{dt} = V_{sedOM} \times z_{bottom} \times ([PONl] + [PONr]) + v_{sed_{PL}} \times [PL] - FxNH4 - FxNO3 - FxDONl - FxDONr \quad (\text{mmolN.m}^{-2}.\text{d}^{-1})$$

$$\frac{d[P_{Sed}]}{dt} = V_{sedOM} \times z_{bottom} \times ([POPl] + [POPPr]) + \frac{v_{sed_{PL}} \times [PL]}{NP_{phyto}} - FxPO4 - FxDOPl - FxDOPr \quad (\text{mmolN.m}^{-2}.\text{d}^{-1})$$

Les flux à l'interface sédimentaire de NH<sub>4</sub>, NO<sub>3</sub>, PO<sub>4</sub>, DON, DOP sont soit i) simulés en prenant en compte les processus de diagénèse précoce ii) issus des mesures réalisées sur les lagunes de Bages-Sigean et du Méjean (projets RESTOLAG, DEPART).

Formulation « Modèle de diagénèse précoce »

$$FxNH4 = Tr_N \times e^{kT_{Nsed}} \times \left\{ \frac{labi \times [N_{Sed}]}{labi \times [N_{Sed}] + [K_{Nsed}]} \times labi \times [N_{Sed}] + 0.1 \times \frac{(1 - labi) \times [N_{Sed}]}{(1 - labi) \times [N_{Sed}] + [K_{Nsed}]} \times (1 - labi) \times [N_{Sed}] \right\} \quad (\text{mmolN.m}^{-2}.\text{d}^{-1})$$

$$FxPO4 = Tr_P \times e^{kT_{Psed}} \times \left\{ \frac{labi \times [P_{Sed}]}{labi \times [P_{Sed}] + [K_{Psed}]} \times labi \times [P_{Sed}] + 0.1 \times \frac{(1 - labi) \times [NP_{Sed}]}{(1 - labi) \times [P_{Sed}] + [K_{Psed}]} \times (1 - labi) \times [P_{Sed}] \right\} \quad (\text{mmolP.m}^{-2}.\text{d}^{-1})$$

## Paramètres des processus biogéochimiques par compartiments

### Valeurs des paramètres du compartiment « Phytoplancton »

Paramètre	Description	Unité	Petit phyto- plancton	Grand phyto- plancton	Référence
$\mu_{max}$	Max growth rate at optimal temperature	$j^{-1}$	1.2	0.8	Zaldivar 2009, Chapelle 2000, Bec 2011
$I_{opt}$	Optimal light intensity	$W.m^{-2}.s^{-1}$	250	200	Chapelle, 2000; Zaldivar 2009
$\psi$	Wroblewski inhibition factor		-	1.5	Wroblewski, 1957; Chapelle, 2000
$k_T$	Temperature increasing rate	$^{\circ}C^{-1}$		0.07	
$K_N$	Half-saturation constant for nitrogen	$mmol.m^{-3}$	0.8	1.2	Edwards 2013 Chang 1995
$K_P$	Half-saturation constant for phosphorus	$mmol.m^{-3}$	0.02	0.1	Edwards 2013
$K_e$	Exudation rate constant	$j^{-1}$	0.03	0.02	Zaldivar 2009
$K_{lys}$	Lysis rate constant	$j^{-1}$	0.005	0.005	Zaldivar 2009
$V_{sed}$	Sedimentation rate	$m.j^{-1}$	-	0.02	Zaldivar 2009
$NP_{Phyto}$	Nitrogen to Phosphorus ratio	$mol\ N / mol\ P$		16	Zaldivar 2009
Chlo.a:N	Chlorophyll a to nitrogen ratio	$mg.mmol^{-1}$		1	
$Conv_{C/N}$			0.2948571		Gohin, 2005 ; Sterner 2008 ; Zaldivar, 2008

### Valeurs des paramètres du compartiment « Zooplancton »

Paramètre	Description	Unité	Petit zooplancton	Grand zooplancton	Référence
$g_{max}$	Grazing rate at optimal temperature	$j^{-1}$	1.5	0.45	Chapelle 2000
$kT_{Zoo}$	Temperature coefficient	$^{\circ}C^{-1}$		0.07	Zaldivar 2009
$Eff_{ZS}^{PS}$	Grazing efficiency of microzooplankton on small phytoplankton	%	100	-	Chapelle, 2000
$Eff_{ZL}^{PS}$	Grazing efficiency of mesozooplankton on small phytoplankton	%	-	50	Chapelle, 2000
$Eff_{ZL}^{PL}$	Grazing efficiency of mesozooplankton on large phytoplankton	%	-	100	Chapelle, 2000
$Eff_{ZL}^{ZS}$	Grazing efficiency of mesozooplankton on microplankton	%	-	80	Chapelle, 2000
$K_{ZS/ZL}^{Ivlev}$	Ivlev constant for zooplankton	$m^3.mmolN^{-1}$	0.1	0.05	
$\varphi_{ZS/ZL}^0$	Threshold of zooplankton grazing	$mmolN.m^{-3}$	$10^{-6}$	0.1	
$reg_{ZS/ZL}$	Zooplankton nitrogen regeneration	%	5	15	
$reg_{ZS/ZL}^{min}$	Zooplankton minimal rate of nitrogen regeneration at 0°C	$j^{-1}$	0.025	0.025	
$Y_{ZS/ZL}$	Growth efficiency	-	0.7	0.6	Chapelle, 2000
$Kd_{ZS/ZL}$	Mortality constant	$j^{-1}$	0.005	0.01	Zaldivar 2009
$NP_{Zoo}$	Nitrogen to Phosphorus ratio of zooplankton	$molN.molP^{-1}$		19.5 13-52	Zaldivar 2009 Golz 2015

### Valeurs des paramètres du compartiment « Détritique »

Paramètre	Description	Unité	Valeur	Référence
$labi$	Fraction of labile organic matter	-	0.2	Zaldivar et al, 2000
$k_{IP}^{max}$	Max hydrolysis rate of labile POM	d <sup>-1</sup>	0.0012	
$k_{rP}^{max}$	Max hydrolysis rate of refractory POM	d <sup>-1</sup>	0.0005	
$Topt_{OM}$	Optimal temperature for POM hydrolysis	°C	30	
$Twidth_{OM}$	Temperature window for DOM hydrolysis	°C	18	
$V_{ID}^{max}$	Max. rate of labile DOM hydrolysis	d <sup>-1</sup>	0.01	
$V_{rD}^{max}$	Max. rate of refractory DOM hydrolysis	d <sup>-1</sup>	0.003	
$K_{IN}$	Half-saturation constant for labile DOM	mmolN.m <sup>-3</sup>	5	
$K_{rN}$	Half-saturation constant for labile DOM	mmolN.m <sup>-3</sup>	30	
$K_{IP}$	Half-saturation constant for labile DOM	mmolP.m <sup>-3</sup>	0.5	
$K_{rP}$	Half-saturation constant for labile DOM	mmolP.m <sup>-3</sup>	1	
$\varepsilon$	Fraction of biological lysis going to POM	-	0.8	
$\gamma$	Fraction of zooplankton egestion going to labile POM	-	0.7	
$\eta^P$	Fraction of <i>Ulva</i> N going to POM	-	0.4	
$\varphi^P$	Fraction of <i>Ulva</i> P going to POM	-	0.2	
$\varphi^{PO}$	Fraction of <i>Ulva</i> P going to PO <sub>4</sub>	-	0.6	
$\omega^P$	Fraction of <i>Gracilaria</i> N going to POM	-	0.8	
$\theta^P$	Fraction of <i>Gracilaria</i> P going to POM	-	0.2	
$\theta^{PO}$	Fraction of <i>Gracilaria</i> P going to PO <sub>4</sub>	-	0.6	
$V_{sedOM}$	Sedimentation rate of particulate organic matter	d <sup>-1</sup>	0.5	

N.B.:  $\eta^D$  and  $\varphi^D$  (fraction of *Ulva* N and P, respectively, going to DOM) are set as  $1 - \eta^P$  and  $1 - (\varphi^P + \varphi^{PO})$ , respectively

Valeurs des paramètres du compartiment « Macrophyte »

Paramètre	Description	Unités	<i>Ulva</i>	<i>Gracilaria</i>	<i>Zostera</i>	References
$\mu_{max}$	Max specific growth	d <sup>-1</sup>	0.8	0.3	0.4	Zaldivar 2009 Biber 2004; Plus 2001; Coffaro...
$I_{opt}$	Photosynthetic efficiency	$\mu\text{E}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$	350	280	280	Zaldivar 2009 Biber 2004
$K_3$	Part of incoming light intercepted by the canopy	-			0.6	Plus, 2003
$\zeta^1$	Temperature coefficient	°C <sup>-1</sup>	0.2	0.2	0.2	Zaldivar 2009
$T_{opt}$	Temperature reference	°C	12	17	15	Zaldivar 2009 Biber 2004
$QN_{min}$	Min N cell quota	mmol N.gdw <sup>-1</sup>	0.7	1.4	1.1	Zaldivar 2009
$QN_{max}$	Max N cell quota	mmol N.gdw <sup>-1</sup>	3	3	2.1	Zaldivar 2009
$QP_{min}$	Min P cell quota	mmol P.gdw <sup>-1</sup>	0.01	0.03	0.04	Coffaro 1997
$QP_{max}$	Max P cell quota	mmol P.gdw <sup>-1</sup>	0.04	0.06	0.09	Coffaro 1997
$V_{NO3}$	Max specific uptake rate for nitrate	mmol.gdw <sup>-1</sup> .d <sup>-1</sup>	4.8	0.84	0.49	
$V_{NH4}$	Max specific uptake rate for ammonium	mmol.gdw <sup>-1</sup> .d <sup>-1</sup>	8.8	0.58	0.49	Bendoricchio 1994; Solidoro 1997; Wang 2014; Coffaro 1997
$V_{PO4}$	Max specific uptake rate for phosphate	mmol.gdw <sup>-1</sup> .d <sup>-1</sup>	0.72	0.17	1.03	Friedlander 1985; Zaldivar 2009; Plus, 2003; Newell & Koch, 2004; Touchette, 2000
$K_{NO3}$	Half-saturation constant for nitrate	mmol.m <sup>-3</sup>	30	10	12	
$K_{NH4}$	Half-saturation constant for ammonium	mmol.m <sup>-3</sup>	50	14	18	
$K_{PO4}$	Half-saturation constant for phosphate	mmol.m <sup>-3</sup>	5	5	5	
$maxmort$	Maximum mortality rate	d <sup>-1</sup>	0.2	0.02		
$LMR_V$	<i>Zostera</i> leaf sloughing coefficient due to wind	d <sup>-1</sup>			0.03	Plus, 2003
$LMR_{20^\circ\text{C}}$	Maximum <i>Zostera</i> mortality rate at 20°C	d <sup>-1</sup>			0.015	Plus, 2003
$K_4$	Wind effect attenuation with depth	m <sup>-1</sup>			1.2	Plus, 2003
$T^{Max}$	Maximum temperature	°C	26	26	25	
$\zeta^2$	Temperature coefficient in mortality	-	0.8	0.2	0.2	



## Annexe 2 : Méthodes de calcul du volume de mélange

Les volumes de mélange ( $V_x$ ) et ( $V_x^{Int}$ ) sont des **données de forçage** qui doivent être définies au préalable à l'utilisation du modèle GAMELag. Ils sont définis à partir des volumes journaliers échangés (entrants et sortants) à travers les frontières virtuelles qui marquent la séparation entre la boîte 1 et le milieu marin extérieur (pour  $V_x$ ) et la séparation entre les boîtes (pour  $V_x^{Int}$ ) :

$V_x = 0.5 \times (|V_E| + |V_S|)$  où  $V_E$  et  $V_S$  représentent les volumes journaliers respectivement entrants et sortants à travers les frontières, exprimés en  $10^6 \cdot m^3 \cdot j^{-1}$ .

Les séries temporelles des ( $V_x$ ) et ( $V_x^{Int}$ ) peuvent être calculées à partir :

- des résultats du modèle hydrodynamique MARS-3D appliqué avec les mêmes forçages (météo, débits) que ceux utilisés dans le modèle GAMELag.
- de mesures directes de débits dans les graus des lagunes. La mesure directe de débit à travers des frontières virtuelles à l'intérieur de la lagune est techniquement faisable mais non envisageable en termes de coût.

Par suite, les séries temporelles de salinité simulées par les modèles GAMELag et MARS-3D doivent être confrontées à des mesures *in situ* afin de vérifier la capacité des modèles à reproduire les observations.

L'exemple ci-dessous illustre la comparaison entre les données de salinité mesurées dans les bassins Nord et Sud de la lagune de Bages-Sigean et simulées avec les modèles MARS-3D (Fiandrino et al., 2017) et GAMELag (Pete et al., 2017).

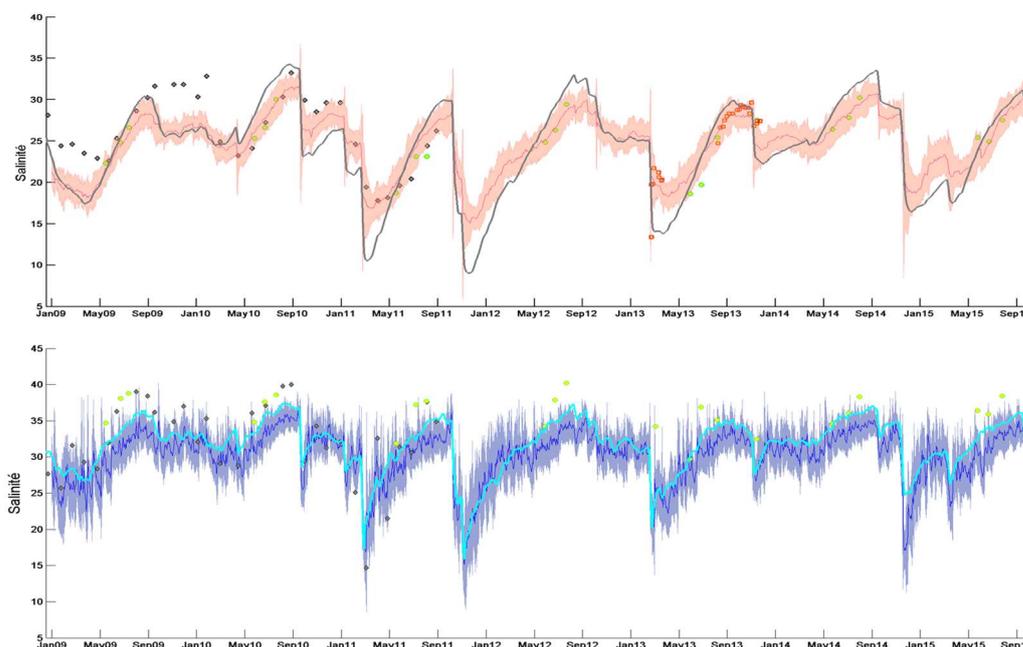


Figure A2. 1 : Salinité de janvier 2009 à septembre 2015 pour les bassins nord (a) et sud (b) de la lagune de Bages-Sigean : salinités observées [FILMED (grises), RSL (vertes), DEPART (rouges)] ; salinités simulées par MARS-3D (moyennes spatiales et enveloppes 95%) et par GAMELag (trait plein gris et cyan pour Bages nord et Bages sud respectivement).

Cette comparaison conforte le fait que le module hydrologique de GAMELag basé sur le découpage de la lagune de Bages-Sigean en deux boîtes reproduit de manière satisfaisante les salinités dans les deux bassins et maintient le gradient de salinité observé entre les bassins nord et sud de la lagune de Bages-Sigean ( $\Delta S_{\text{Nord-Sud}} \sim 5$ ).

Le « calage » de la salinité assure des échanges corrects de matière conservative dissoute entre les bassins nord et sud et entre la lagune et la mer. Ainsi, dès lors que les processus biologiques de stockage/relargage des formes dissoutes de l'azote et du phosphore dans les différents compartiments biologiques seront reproduits de façon satisfaisante dans chacune des boîtes, les quantités de matière exportées vers la mer seront représentatives de la réalité terrain.

## Annexe 3 : Fiches de renseignement des données de forçage du modèle

### Fiche de renseignement des données nécessaires au modèle hydrologique

	Données	Unités	Fréquence	Paramètres associés	Sources	Données pré-intégrées
<b>BASSIN VERSANT</b>	Débits Cours d'eau	m <sup>3</sup> /j	Description crue, étiage (idéalement)	Nom du cours d'eau, Boite 1 / Boite 2, <b>Si données manquantes :</b> • Type interpolation Q = f(Précipitation), • Surface BV, • Coef. Ruissellement	Utilisateur	<input type="checkbox"/>
	Débits STEP	m <sup>3</sup> /j	Mensuelle (idéalement)	Nom des STEP, Boite 1 / Boite 2	Auto-surveillance	<input type="checkbox"/>
	Débits Autres sources	m <sup>3</sup> /j	Ponctuelle	Nom des autres sources, Boite 1 / Boite 2	Utilisateur	<input type="checkbox"/>

### Fiche de renseignement des données nécessaires au modèle «Azote-Phosphore»

	Données	Unités	Fréquence	Paramètres associés	Sources	Données pré-intégrées
<b>BASSIN VERSANT</b>	[NID], [PO <sub>4</sub> ] Cours d'eau	mmol/m <sup>3</sup>	Description crue, étiage (idéalement)	Nom du cours d'eau, Boite 1 / Boite 2, <b>Si données manquantes :</b> • Type interpolation Q = f(Précipitation), • Surface BV, • Coef. Ruissellement	Utilisateur	<input type="checkbox"/>
	[NID], [PO <sub>4</sub> ] STEP	mmol/m <sup>3</sup>	Mensuelle (idéalement)	Nom des STEP, Boite 1 / Boite 2	Auto-surveillance	<input type="checkbox"/>
	[NID], [PO <sub>4</sub> ] Autres sources	mmol/m <sup>3</sup>	Ponctuelle	Nom des autres sources, Boite 1 / Boite 2	Utilisateur	<input type="checkbox"/>

Fiche de renseignement des données nécessaires au modèle hydrologique

	Processus	Données	Unités	Fréquence	Paramètres associés	Sources	Données pré-intégrées
ATMOSPHERE	Précipitation	Pluviométrie	m/j	Journalière	Nom des stations Météo, Boite 1 / Boite 2	Météo-France/Ifremer	✗
	Evaporation	Température de l' air	° C	Journalière	Nom de la station Météo, Boite 1 / Boite 2	Météo-France/Ifremer	✗
		Humidité relative	%	Journalière	Nom de la station Météo, Boite 1 / Boite 2	Météo-France/Ifremer	✗
		Intensité du vent	m/s	Journalière	Nom de la station Météo, Boite 1 / Boite 2	Météo-France/Ifremer	✗
		Pression atmosphérique	HPascal	Journalière	Nom de la station Météo, Boite 1 / Boite 2	Météo-France/Ifremer	✗
		Rayonnement global	MI/m <sup>2</sup> /j	Journalière	Nom de la station Météo, Boite 1 / Boite 2	Météo-France/Ifremer	✗

Fiche de renseignement des données nécessaires au modèle «Azote-Phosphore»

	Données	Unités	Fréquence	Paramètres associés	Sources	Données pré-intégrées
ATMOSPHERE	[NID], [PO <sub>4</sub> ] précipitation	mmol/m <sup>3</sup>	Ponctuelle	Boite 1 / Boite 2	ECOSYM Etude La Marette	✗

**Liste des stations en mer et des périodes disponibles pour le calcul des échanges en eau entre la lagune et la mer**

	Stations	Processus	Périodes	Commentaires
<b>ATMOSPHERE</b>	Aigues-Mortes	Précipitation	01/01/2000 au 30/06/2012	
		Evaporation	01/01/2006 au 30/06/2012	Rayonnement global de Fréjorgues Pression atmosphérique de Nîmes
	Fréjorgues	Précipitation	Journalière depuis 01/2002	
		Evaporation	Journalière depuis 01/2002	
	Leucate	Précipitation	Journalière depuis 01/2002	
		Evaporation	Journalière depuis 01/2002	Rayonnement global de Perpignan
	Narbonne	Précipitation	Journalière depuis 01/2002	
	Nîmes-Courbessac	Précipitation	01/01/2000 au 30/06/2012	
		Evaporation	01/01/2006 au 30/06/2012	Rayonnement global de Fréjorgues Température minimum d'Aigues-Mortes
	Perpignan	Précipitation	Journalière depuis 01/2002	
	Sète	Précipitation	Journalière depuis 01/2002	
		Evaporation	Journalière depuis 01/2002	Rayonnement global de Fréjorgues

### Fiche de renseignement des données nécessaires au modèle hydrologique

	Données	Unités	Fréquence	Sources	Données pré-intégrées
<b>MER</b>	Salinité	-	Hebdomadaire ou 15 jours	REPHY / Ifremer	✗
	Température	° C	Hebdomadaire ou 15 jours	REPHY / Ifremer	✗

### Liste des station en mer et des périodes disponibles pour le calcul des échanges en eau entre la lagune et la mer

	Stations	Données	Périodes
<b>MER</b>	Barcarès	Salinité/Température (REPHY-Ifremer)	30/12/1999 au 17/12/2016
	Sète	Salinité/Température (REPHY-Ifremer)	07/01/2002 au 17/12/2016
	Chenal Aigues-Mortes	Salinité/Température (Filmed-SMCG)	27/06/2000 au 22/02/2013

### Fiche de renseignement des données nécessaires au modèle «Azote-Phosphore»

	Données	Unités	Fréquence	Sources	Données pré-intégrées
<b>MER</b>	[NID], [PO <sub>4</sub> ]	mmol/m <sup>3</sup>	Mensuelle tous les 3 ans	DCE / Ifremer	✗

### Liste des station en mer et des périodes disponibles pour le calcul des flux en azote et phosphore

	Stations	Données	Périodes	Commentaires
<b>MER</b>	Barcarès	[NID] / [PO <sub>4</sub> ]	Mensuelle de mars 2009 à mars 2010 (DCE-Ifremer) Mensuelle depuis juin 2016 (REPHY Obs)	Les données mensuelles DCE sont reprises à l'identique de 02/2000 à 05/2016
	Sète	[NID] / [PO <sub>4</sub> ]	Mensuelle de mars 2009 à décembre 2011 (DCE-Ifremer) Mensuelle depuis juin 2016 (REPHY Obs)	Les données mensuelles DCE sont reprises à l'identique de 02/2000 à 05/2016
	Chenal Aigues-Mortes	[NID] / [PO <sub>4</sub> ]	Données du CG 30 : CRS3 10/06/2004 au 18/10/2010 (4 données/an)	La moyenne a été estimées sur les données existantes et une constantes a été appliquées du : 01/01/1999 au 31/12/2016
	Mer Nul	[NID] / [PO <sub>4</sub> ]	01/01/1999 au 31/12/2016	Toutes les données sont égales à zéro

## Annexe 4 : Structure du modèle, arborescence, installation sur un PC et lancement

Plusieurs informations sont nécessaires au fonctionnement du modèle GAMELag. Dans un premier temps il faut spécifier les données utiles à son fonctionnement. Ces données sont indiquées dans les fiches de renseignements des données

Le modèle GAMELag est codé en langage R, logiciel disponible sous licence gratuite, téléchargeable à partir du CRAN : <https://cran.r-project.org>.

Le modèle étant développé sous R, il est utilisable sur tous types de système d'exploitation, ne nécessite pas de ressources en mémoire particulièrement élevées, ni de compétences en programmation, au-delà d'une simple explication de sa structure et de son lancement.

### A.4.1 Arborescence

Le modèle GAMELag comprend 3 parties principales :

Le répertoire PROG contenant tous les scripts nécessaires au traitement des données brutes de forçage, à l'hydrologie, à la biologie et aux simulations

Un répertoire UDIR contenant, pour une lagune, la base de données DB\_DATA présentée ci-dessous. Il est important de constituer une base de données par lagune car les noms de fichiers de forçages lus par le modèle ne peuvent être modifiés.

Il existe également dans ce UDIR un répertoire de Scénarios où sont stockées les caractéristiques des simulations. C'est à partir de ces dossiers que sont lancées les simulations, ils contiennent les fichiers :

- Launch\_simu.R : contient la séquence d'exécution des scripts nécessaires à la simulation GAMELag.

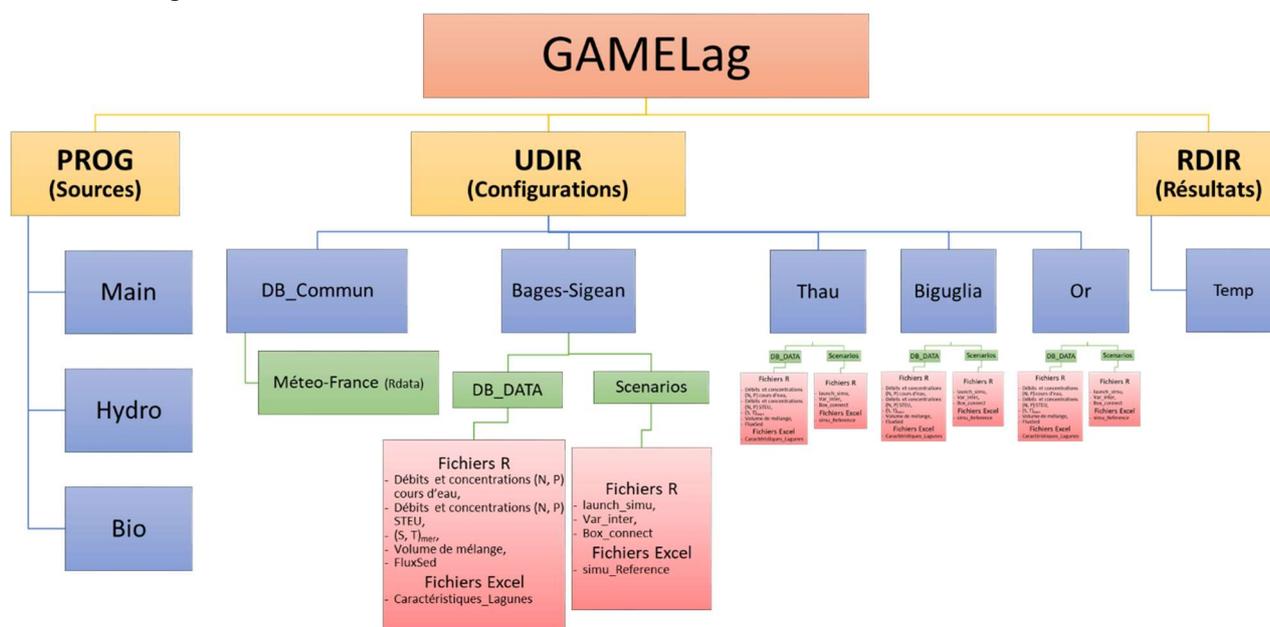
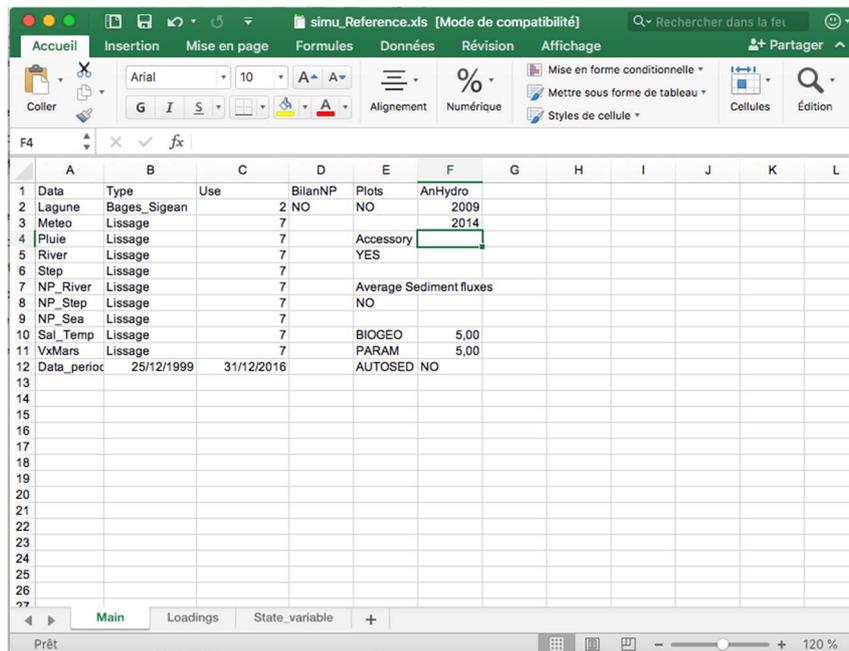


Figure A4. 1 : Arborescence du modèle GAMELag

- simu\_ « nom du scénario ».xls : contient les caractéristiques de la simulation sous forme d'onglets :

- ✓ **Main** : nom de la lagune, nombre de boîte, noms des fichiers de forçages, type de lissage des données, années de simulations, référence du modèle utilisé, récupération des variables accessoires et type de modèle sédimentaire

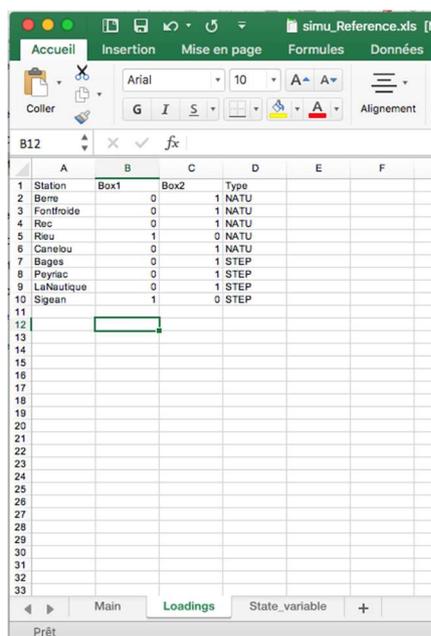


	A	B	C	D	E	F
1	Data	Type	Use	BilanNP	Plots	AnHydro
2	Lagune	Bages_Sigean	2	NO	NO	2009
3	Meteo	Lissage	7			2014
4	Pluie	Lissage	7		Accessory	
5	River	Lissage	7		YES	
6	Step	Lissage	7			
7	NP_River	Lissage	7		Average Sediment fluxes	
8	NP_Step	Lissage	7		NO	
9	NP_Sea	Lissage	7			
10	Sal_Temp	Lissage	7		BIOGEO	5,00
11	VxMars	Lissage	7		PARAM	5,00
12	Data_perioc	25/12/1999	31/12/2016		AUTOSED	NO

Figure A4. 2 : Exemple de fichier « simu\_Reference.xls », onglet « Main » pour la lagune de Bages-Sigean

- ✓ **Loadings** : pour la déclaration des variables d'apports, nom des exutoires, boîte de destination, type d'exutoire (naturel ou anthropique)

Ce fichier reprend les noms des rivières et STEP se jetant dans la lagune considérée, la boîte dans laquelle arrive chaque apport (0 ou 1) ainsi que le type d'apport dont il s'agit, naturel (NATU) ou d'origine anthropique (STEP).



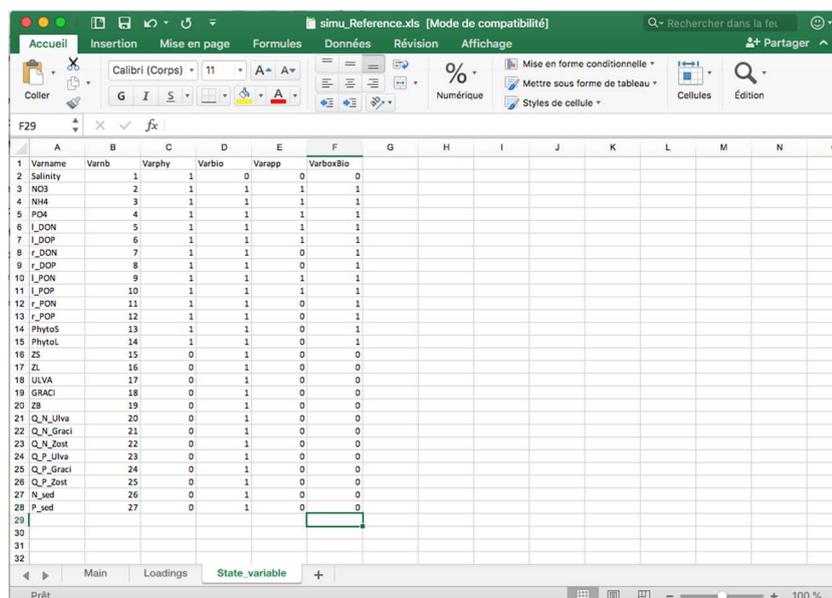
	A	B	C	D	E	F
1	Station	Box1	Box2	Type		
2	Berre	0	1	NATU		
3	Fontfroide	0	1	NATU		
4	Rec	0	1	NATU		
5	Rieu	1	0	NATU		
6	Canelou	0	1	NATU		
7	Bages	0	1	STEP		
8	Pyssac	0	1	STEP		
9	LaNautique	0	1	STEP		
10	Sigean	1	0	STEP		

Figure A4. 3 : Exemple d'onglet « Loadings » pour la lagune de Bages-Sigean

✓ **State\_variable** : déclaration des variables d'états

Cet onglet reprend l'ensemble des 27 variables simulées (Varname) dans le modèle et leur attribut un numéro (Varnb). Ce fichier permet également de spécifier :

- quelles variables sont influencées par la physique (Varphy), *i.e.* échangées entre les boîtes et avec la mer,
- les variables physiques et les variables biologiques (Varbio)
- les variables influencées par des apports (Varapp)



	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
1	Varname	Varnb	Varphy	Varbio	Varapp	Varboxbio									
2	Salinity	1	1	0	0	0									
3	NO3	2	1	1	1	1									
4	NH4	3	1	1	1	1									
5	PO4	4	1	1	1	1									
6	I_DON	5	1	1	1	1									
7	I_DDP	6	1	1	1	1									
8	r_DON	7	1	1	0	1									
9	r_DDP	8	1	1	0	1									
10	I_POP	9	1	1	1	1									
11	I_POP	10	1	1	1	1									
12	r_POP	11	1	1	0	1									
13	r_POP	12	1	1	0	1									
14	Phyto5	13	1	1	0	1									
15	Phycol	14	1	1	0	1									
16	Z5	15	0	1	0	0									
17	ZL	16	0	1	0	0									
18	LULVA	17	0	1	0	0									
19	GRACI	18	0	1	0	0									
20	Z3	19	0	1	0	0									
21	Q_N_Ulva	20	0	1	0	0									
22	Q_N_Graci	21	0	1	0	0									
23	Q_N_Zost	22	0	1	0	0									
24	Q_P_Ulva	23	0	1	0	0									
25	Q_P_Graci	24	0	1	0	0									
26	Q_P_Zost	25	0	1	0	0									
27	N_sed	26	0	1	0	0									
28	P_sed	27	0	1	0	0									
29															
30															
31															
32															

Figure A4. 4 : Exemple d'onglet « State\_variable » pour la lagune de Bages-Sigean

Ce tableau peut être modifié par l'utilisateur, en particulier les colonnes Varphy et Varapp, en fonction de ce que l'utilisateur veut voir échangé dans le modèle ou apporté par le bassin versant (scénarios, données indisponibles, ...).

- Var\_inter.RData : contient les conditions initiales du modèle pour chacune des variables d'états simulées.
- Box\_connect.RData : est une matrice de dimensions « nombre de boîte x nombre de boîte » et indiquant par des 0 ou 1 les boîtes GAMElag qui sont connectées.

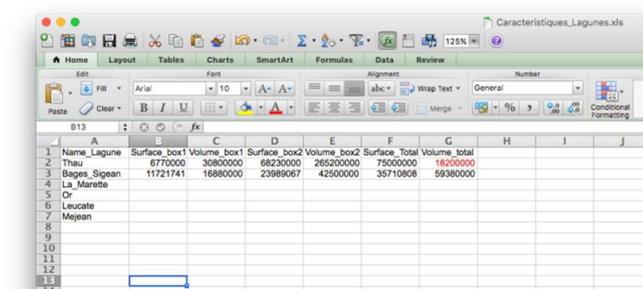
Il peut exister autant de répertoire de scénarios que l'utilisateur le souhaite. Chaque scénario doit contenir ces fichiers ci-dessus

Finalement, un répertoire RDIR ou sont déposés les fichiers de simulations ainsi que les résultats. Ce répertoire contient un dossier Temp, ou sont déposés les fichiers de simulations (forçages interpolés, historiques, fichiers de simulations et graphes). Le dossier Res\_Ref contient les dossiers les résultats finaux de simulations (matrice temps x variables) Les dossiers résultats sont créés automatiquement lors d'une simulation et nommés avec le nom du scénario, suivi de la date et de la base de données utilisée (ex : Reference\_20032017\_Ref ou Robine\_20032017\_Ref). Par défaut, la base de données utilisée est celle de référence (Ref).

C'est également dans ces dossiers que sont stockés les résultats de simulations.

#### A.4.2 Spécification de la lagune : CARACTERISTIQUES\_LAGUNES.xls

Le fichier CARACTERISTIQUES\_LAGUNES.xls contient les informations relatives aux surfaces et volumes des bassins (ou boîtes) qui décrivent les différentes lagunes. Ces données de surfaces et volumes sont renseignées en m<sup>2</sup> et m<sup>3</sup> respectivement.



Name_Lagune	Surface_box1	Volume_box1	Surface_box2	Volume_box2	Surface_Total	Volume_total
Thau	6770000	30800000	68230000	265200000	75000000	18200000
Bages-Sigean	11721741	16860000	23989067	42500000	35710808	59360000
La_Marette						
Or						
Leucate						
Mejean						

Figure A4. 5 : Fichier « Caractéristiques\_Lagunes.xls » pour la lagune de Bages-Sigean

Ce fichier est à renseigner à chaque nouvelle lagune définie dans le modèle GAMELag.

#### A.4.3 Installation R et packages R

La procédure d'installation nécessite :

- 1) l'installation du logiciel R à partir du CRAN, version R recommandée 3.6.0, fonction du système d'exploitation (Windows, Mac, linux)
- 2) la copie du modèle « GAMELag » sur le disque C:// de l'ordinateur, version actuelle GAMELAG\_v4

Les packages R nécessaires au fonctionnement du modèle s'installeront automatiquement dans la librairie R lors de sa première utilisation.

#### A.4.4 Description de la base de données de forçages

Les fichiers de forçages nécessaires sont résumés dans le Tableau 1.

L'ensemble des données à fournir ou intégrées au modèle GAMELag sont recensées dans les fiches de renseignements de données fournies en Annexe 3. A titre d'exemple, les données météo (Meteo.xls) sont disponibles pour les variables « Température journalière moyenne de l'air » (TempAir), « Température journalière minimum de l'air » (TempMin), « Humidité relative » (Hum), « Pression atmosphérique » (Patm), « Intensité du vent » (VitVent), « Rayonnement global » (RayGlo). Ces données existent au pas de temps journalier du 01/01/2000 au 31/12/2016.

Les données de pluviométrie, débits (rivières et STEU), salinité, température, et volumes échangés sont fournies ou à renseigner sous le même format.

Les données concernant les apports d'azote et de phosphore sont organisées sous forme d'onglet avec pour chaque forme apportée (nitrate, ammonium, phosphate, azote organique dissous, etc...) un onglet différent reprenant les noms des rivières en en-tête de colonne (Figure A. 5).

Tableau A4. 1: Description des fichiers de forçage du modèle GAMELag

Données	Type	Unités	Fréquence	Fichier
<b>Météo</b>	Température, Rayonnement global, Humidité relative, Intensité du vent, Pression atmosphérique	°C, MJ/m <sup>2</sup> , %, m/s, hPa	Jour (données Meteo-France)	Meteo.xls
<b>Pluie</b>	Pluviométrie	m/j	Jour (données Meteo-France)	Pluie.xls
<b>Débit Rivière</b>	Débits journaliers	m <sup>3</sup> /j		River.xls
<b>Débit STEU</b>	Débits journaliers	m <sup>3</sup> /j		Step.xls
<b>N &amp; P rivière</b>	Concentrations N & P	mmol/m <sup>3</sup>		NP_River.xls
<b>N &amp; P STEU</b>	Concentrations N & P	mmol/m <sup>3</sup>		NP_Step.xls
<b>N &amp; P en mer</b>	Concentrations N & P	mmol/m <sup>3</sup>		NP_Sea.xls
<b>Salinité, Température</b>	Salinité, Température en mer	S.U et °C		Sal_Temp.xls
<b>Volumes échangés (Vx)</b>	Volumes d'eau échangés entre les boîtes et entre la lagune et la mer	m <sup>3</sup> /j	Données obtenues de simulation MARS 3D	VxMars.xls

La fréquence des données est renseignée en fonction des données disponibles, le modèle GAMELag applique une interpolation linéaire pour les jours manquants afin de constituer des jeux de données journaliers. A noter que le nombre d'onglets correspondants au nombre de formes d'azote et de phosphore apportés doit correspondre au nombre de variables apportées (Varapp) dans le fichier Model\_Var.xls (voir ci-dessus). L'ordre dans lequel sont renseignés ces apports dans le fichier de données (NP\_XXX.xls) doit respecter l'ordre des variables apportées (Varapp) dans l'onglet Loadings du fichier simu\_ « nom de scénario ».xls.

Date	TempAir	Hum	Palm	VtVent	RayGio	TempMin
25/12/99	10,67	73,38	1022,60	7,75	5,22	8,90
01/01/00	10,67	73,38	1022,60	7,75	5,22	9,90
02/01/00	10,78	68,00	1023,52	7,25	8,25	8,90
03/01/00	10,35	81,25	1025,55	4,88	8,07	7,90
04/01/00	9,15	84,13	1023,31	2,88	4,86	7,80
05/01/00	10,91	68,88	1019,21	3,25	7,16	8,20
06/01/00	9,10	88,25	1018,41	5,25	7,47	7,00
07/01/00	11,29	63,13	1021,07	7,63	8,45	8,20
08/01/00	9,96	73,63	1020,48	2,63	3,88	7,60
09/01/00	8,59	68,50	1019,22	5,38	1,92	7,00
10/01/00	6,75	71,13	1025,59	13,13	6,50	4,20
11/01/00	5,15	65,75	1029,78	7,63	8,75	3,30
12/01/00	3,91	73,38	1026,21	3,75	8,63	1,30
13/01/00	4,94	84,50	1018	5,00	3,45	0,70
14/01/00	8,94	79,00	1011,89	8,25	7,12	7,80
14/01/00	9,11	66,50	1017,11	6,88	9,75	8,90

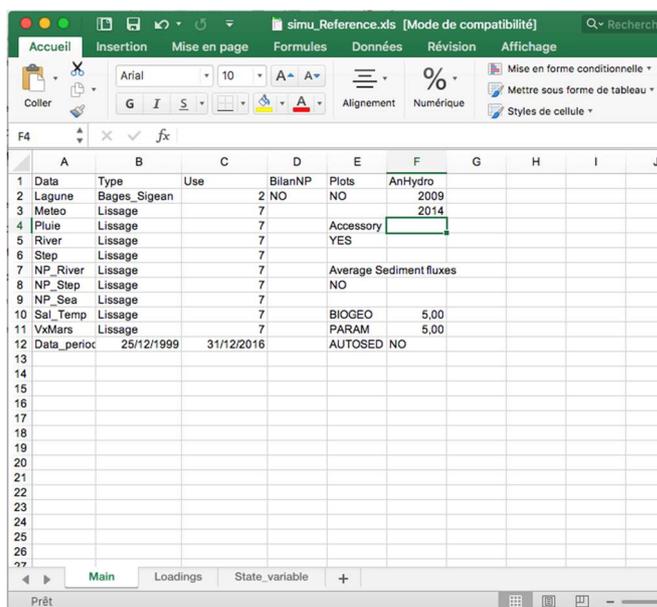
Figure A4. 6 : Exemple de fichier Meteo.xls pour la station météo-France de Narbonne (utilisée pour la lagune de Bages-Sigean)

Date	Berre	Fontfroide	Rec	Rieu	Canelou
02/02/00	48,3870968	NA	NA	NA	NA
03/03/00	NA	NA	NA	NA	154,516129
25/03/00	NA	NA	NA	NA	NA
11/05/00	NA	NA	NA	NA	96,7741935
05/06/00	16,1290323	NA	NA	NA	NA
24/06/00	NA	NA	NA	NA	NA
12/07/00	NA	NA	NA	NA	106,451613
11/08/00	NA	2,25636904	NA	NA	NA
26/08/00	NA	NA	NA	NA	NA
06/09/00	NA	4,20285715	NA	NA	NA
03/10/00	1,61290323	NA	NA	NA	NA
12/10/00	NA	NA	NA	NA	257,741935
18/10/00	NA	4,09919644	NA	NA	NA
05/11/00	NA	NA	NA	NA	NA
11/12/00	25,8064516	NA	NA	NA	NA
02/02/01	NA	NA	NA	NA	NA
09/03/01	NA	NA	NA	NA	NA
25/03/01	NA	NA	NA	NA	NA
11/05/01	NA	NA	NA	NA	NA
05/06/01	NA	NA	NA	NA	NA
24/06/01	NA	NA	NA	NA	NA
12/07/01	NA	NA	NA	NA	NA
11/08/01	NA	2,25636904	NA	NA	NA
26/08/01	NA	NA	NA	NA	NA
06/09/01	NA	4,20285715	NA	NA	NA
03/10/01	NA	NA	NA	NA	NA
12/10/01	NA	NA	NA	NA	NA
18/10/01	NA	4,09919644	NA	NA	NA
05/11/01	NA	NA	NA	NA	NA
02/02/02	NA	NA	NA	NA	NA
14/03/02	NA	NA	NA	NA	90,9677419
25/03/02	NA	NA	NA	NA	NA

Figure A4. 7 : Exemple de fichier NP\_River.xls pour la lagune de Bages-Sigean

#### A.4.5 Lancement de simulation

- 1) Se placer dans le répertoire du scénario, exemple de chemin :  
C://GAMELAG/UDIR/Bages/Scenario/Reference
- 2) Modifier, si nécessaire, le fichier de caractéristiques de simulations « simu\_Reference.xls », en particulier, la ou les années à simuler, ainsi que le nom de la lagune, le nombre de boîtes considérées, puis sauvegarder.



	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	Data	Type	Use	BilanNP	Plots	AnHydro				
2	Lagune	Bages_Sigean		2 NO	NO	2009				
3	Meteo	Lissage		7		2014				
4	Pluie	Lissage		7	Accessory					
5	River	Lissage		7	YES					
6	Step	Lissage		7						
7	NP_River	Lissage		7	Average Sediment fluxes					
8	NP_Step	Lissage		7	NO					
9	NP_Sea	Lissage		7						
10	Sal_Temp	Lissage		7	BIOGEO	5,00				
11	VxMars	Lissage		7	PARAM	5,00				
12	Data_perioc	25/12/1999	31/12/2016		AUTOSED	NO				
13										
14										
15										
16										
17										
18										
19										
20										
21										
22										
23										
24										
25										
26										
27										

Figure A4. : Exemple de fichier NP\_River.xls pour la lagune de Bages-Sigean

C'est dans cet onglet que sont également renseignées les informations concernant le modèle (versions 5, 6 ou 7), le jeu de paramètres associés (numéro identique à la version).

La simulation des flux de matière à l'interface eau-sédiment peut se faire de 2 manières :

- avec des équations de diagenèse précoce simplifiées : AUTOSED = YES. Il s'agit de la formulation de base utilisable pour l'ensemble des lagunes
- avec les flux constants mesurés sur le terrain (Projet Ifremer) : AUTOSED = NO

Les flux constants peuvent être utilisés par boîte ou en moyenne pour la lagune en définissant la section « Average Sediment fluxes ». L'utilisation des flux par boîtes Average Sediment fluxes = NO ou en moyenne pour la lagune, Average Sediment fluxes = YES

NB : il est également possible de modifier ici le type de traitement des données de forçages, forcées (Forcing : simple interpolation linéaire) ou lissées (Lissage : interpolation linéaire et lissage). Le lissage des données de forçages peut également être effectué sur différentes fenêtres de temps indiquées en jours (ici 7 jours).

- 3) Lancer le programme R. Dans la console R, il faut fournir le répertoire de travail à partir duquel la simulation sera lancée

```

Console ~|

R version 3.3.1 (2016-06-21) -- "Bug in Your Hair"
Copyright (C) 2016 The R Foundation for Statistical Computing
Platform: x86_64-apple-darwin13.4.0 (64-bit)

R est un logiciel libre livré sans AUCUNE GARANTIE.
Vous pouvez le redistribuer sous certaines conditions.
Tapez 'license()' ou 'licence()' pour plus de détails.

R est un projet collaboratif avec de nombreux contributeurs.
Tapez 'contributors()' pour plus d'information et
'citation()' pour la façon de le citer dans les publications.

Tapez 'demo()' pour des démonstrations, 'help()' pour l'aide
en ligne ou 'help.start()' pour obtenir l'aide au format HTML.
Tapez 'q()' pour quitter R.

>

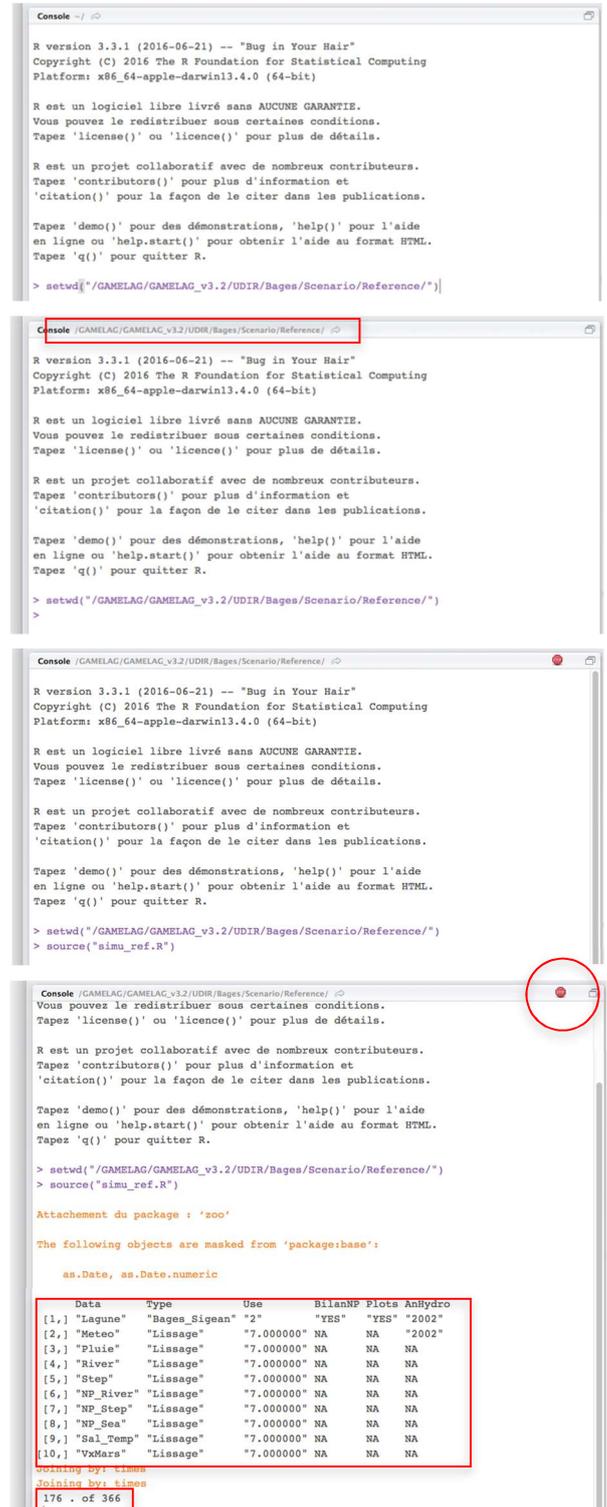
```

Après l'invite de commande (« > »), taper le chemin de répertoire de travail avec la commande :  
`setwd(«/GAMELAG/UDIR/Bages/Scenario/Reference») puis ↵`

Le répertoire de travail spécifié est ensuite indiqué en haut de la console

Il faut ensuite lancer le script « simu\_ref.R » avec la commande :  
`source(« simu_ref.R ») puis ↵`

La simulation débute, le symbole rouge en haut à droite de la console apparaît (calculs en cours) ainsi que les étapes du code :



```

R version 3.3.1 (2016-06-21) -- "Bug in Your Hair"
Copyright (C) 2016 The R Foundation for Statistical Computing
Platform: x86_64-apple-darwin13.4.0 (64-bit)

R est un logiciel libre livré sans AUCUNE GARANTIE.
Vous pouvez le redistribuer sous certaines conditions.
Tapez 'license()' ou 'licence()' pour plus de détails.

R est un projet collaboratif avec de nombreux contributeurs.
Tapez 'contributors()' pour plus d'information et
'citation()' pour la façon de le citer dans les publications.

Tapez 'demo()' pour des démonstrations, 'help()' pour l'aide
en ligne ou 'help.start()' pour obtenir l'aide au format HTML.
Tapez 'q()' pour quitter R.

> setwd("/GAMELAG/GAMELAG_v3.2/UDIR/Bages/Scenario/Reference/")

```

```

R version 3.3.1 (2016-06-21) -- "Bug in Your Hair"
Copyright (C) 2016 The R Foundation for Statistical Computing
Platform: x86_64-apple-darwin13.4.0 (64-bit)

R est un logiciel libre livré sans AUCUNE GARANTIE.
Vous pouvez le redistribuer sous certaines conditions.
Tapez 'license()' ou 'licence()' pour plus de détails.

R est un projet collaboratif avec de nombreux contributeurs.
Tapez 'contributors()' pour plus d'information et
'citation()' pour la façon de le citer dans les publications.

Tapez 'demo()' pour des démonstrations, 'help()' pour l'aide
en ligne ou 'help.start()' pour obtenir l'aide au format HTML.
Tapez 'q()' pour quitter R.

> setwd("/GAMELAG/GAMELAG_v3.2/UDIR/Bages/Scenario/Reference/")
>

```

```

R version 3.3.1 (2016-06-21) -- "Bug in Your Hair"
Copyright (C) 2016 The R Foundation for Statistical Computing
Platform: x86_64-apple-darwin13.4.0 (64-bit)

R est un logiciel libre livré sans AUCUNE GARANTIE.
Vous pouvez le redistribuer sous certaines conditions.
Tapez 'license()' ou 'licence()' pour plus de détails.

R est un projet collaboratif avec de nombreux contributeurs.
Tapez 'contributors()' pour plus d'information et
'citation()' pour la façon de le citer dans les publications.

Tapez 'demo()' pour des démonstrations, 'help()' pour l'aide
en ligne ou 'help.start()' pour obtenir l'aide au format HTML.
Tapez 'q()' pour quitter R.

> setwd("/GAMELAG/GAMELAG_v3.2/UDIR/Bages/Scenario/Reference/")
> source("simu_ref.R")

Attachement du package : 'zoo'

The following objects are masked from 'package:base':

  as.Date, as.Date.numeric

  Data      Type      Use      BilanNP Plots AnHydro
[1,] "Lagune" "Bages_Sigean" "2"      "YES"   "YES"  "2002"
[2,] "Meteo"  "Lissage"      "7.000000" NA      NA      "2002"
[3,] "Pluie"  "Lissage"      "7.000000" NA      NA      NA
[4,] "River"  "Lissage"      "7.000000" NA      NA      NA
[5,] "Step"   "Lissage"      "7.000000" NA      NA      NA
[6,] "NP_River" "Lissage"    "7.000000" NA      NA      NA
[7,] "NP_Step" "Lissage"    "7.000000" NA      NA      NA
[8,] "NP_Sea"  "Lissage"    "7.000000" NA      NA      NA
[9,] "Sal_Temp" "Lissage"    "7.000000" NA      NA      NA
[10,] "VxMars" "Lissage"    "7.000000" NA      NA      NA

Joining by: times
176 . of 366

```

Les caractéristiques de la simulation (simu\_ref.xls) sont affichées pour vérification par l'utilisateur. Un compteur de jours simulés se met en place.