



La cooperazione al cuore del Mediterraneo
La coopération au cœur de la Méditerranée

Romain Pete Expert-Consultant / R&D Biologie Marine
112 Rue du Mas de Miecamp, 34090 Montpellier ;
RP.environnement@yahoo.com
SIRET : 82964124000017

Fonctionnement écosystémique de la lagune de Biguglia. Partie 3 : Scénarios écologiques



Département Océanographie et Dynamique des Écosystèmes
Laboratoire Environnement Ressources Provence Azur Corse
Auteur • Pete Romain
Collaborateurs • Malet Nathalie

Titre du rapport : Fonctionnement écosystémique de la lagune de Biguglia. Partie 3 : Scénarios écologiques	
Référence interne : ODE/UL/LER-PAC/20-02	Date de publication 22/01/2020
Diffusion : <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	Version : 1.0.0 Référence de l’illustration de couverture Romain Pete Novembre 2019, lagune de Biguglia Langue(s) : Français
Résumé/ Abstract : <p>Afin d’apporter des éléments de réponse quantitatifs à ces questions, un outil numérique GAMELag a été développé en collaboration avec l’UMR ECOSYM en se basant sur l’approche LOICZ. Par suite ce modèle « simple » (modèle en boîtes avec calcul de bilan de matière aux interfaces) a été affiné au cours de phases successives de validation.</p> <p>La présente étude vise à déployer le modèle écosystémique « GAMELag » permettant d’évaluer les flux et stock d’azote et de phosphore dans la lagune de Biguglia. L’objectif est de i) valider le fonctionnement du modèle sur la lagune de Biguglia et ii) de fournir aux gestionnaires des résultats en réponse à différents scénarios hydroclimatiques (année sèche/pluvieuse) ou selon différentes options de gestion, notamment celles visant à réduire les apports en azote et phosphore par le bassin versant. Les 2 problématiques principales sur la lagune de Biguglia étant l’eutrophisation avec des apports en excès d’azote et de phosphore et la forte variabilité de la salinité. Les résultats du modèle pourront également permettre de simuler les flux saisonniers ou annuels d’N et P arrivant à la lagune selon les différents scénarios choisis et la répartition et dynamique de ces flux au sein des différents compartiments de l’écosystème, colonne d’eau, phytoplancton et macrophytes.</p> <p>Après une phase de mise en place et de validation de ce modèle GAMELag sur la lagune de Biguglia (rapport 1), ce rapport présente les scénarios hydroclimatiques conjugués à des apports en azote et phosphore contrastés afin de mieux cerner la réponse de l’écosystème de Biguglia face à ces contraintes. Les comparaisons entre scénario seront envisagées par rapport à une simulation de référence, établie dans le rapport précédent, pour les années 2017 et 2018. Les réponses de l’écosystème de Biguglia seront évaluées au regard d’indicateurs tels que le bilan hydrique, le bilan de matière azote et phosphore, l’état écologique (indicateur DCE) ainsi que la dynamique des stocks et flux associés à chacun des scénarios.</p>	
Mots-clés/ Key words : Modèle écosystémique, GAMELag, flux, stock, azote, phosphore, scénarios écologiques	
Comment citer ce document : Pete R, Malet N (2020) : Fonctionnement écosystémique de la lagune de Biguglia. Partie 3 : Scénarios écologiques. 31p. ODE/UL/LER-PAC/20.02	

Commanditaire du rapport : Europe, consortium Retralags	
Nom / référence du contrat :	
<input type="checkbox"/> Rapport intermédiaire (réf. bibliographique : XXX) <input checked="" type="checkbox"/> Rapport définitif	
Projets dans lesquels ce rapport s'inscrit (programme européen, campagne, etc.) :	
Projet Européen Interreg transfrontalier France - Italie Marittimo RETRALAGS	
Auteur(s) / adresse mail	Affiliation / Direction / Service, laboratoire
Pete Romain	RP Environnement - Consultant R&D Biologie Marine (Montpellier)
Fiandrino Annie	ODE/UL/LER-LR
Malet Nathalie	ODE/UL/LER-PAC-CORSE
Destinataires : Ifremer, Chef de file et partenaires Retralags, Gestionnaires de la réserve de la lagune de Biguglia, UDCPP, Office de l'Environnement de la Corse, Collectivité de Corse, Conservatoire du Littoral...	
Validé par : Nathalie Malet	

Table des matières

1 Introduction et site de l'étude	7
1.1 Contexte de l'étude	7
1.2 Site de l'étude	8
2 Fonctionnement de la lagune de Biguglia.....	9
3 Scénarios.....	14
3.1 Motivations des scénarios proposés.....	14
3.2 Présentation et grille de lecture des fiches synthétiques.....	15
4 Conclusions et perspectives.....	27
4.1 Conclusions	27
4.2 Perspectives	30
5 Bibliographie.....	31

Fonctionnement écosystémique de la lagune de Biguglia.

Partie 3 : Scénarios écologiques

1 Introduction et site de l'étude

1. 1.1 Contexte de l'étude

Les lagunes côtières ont subi de fortes dégradations environnementales, notamment depuis les années 1960. L'eutrophisation a été reconnue comme étant la cause majeure de cette dégradation. Entre 2000 et 2014, l'Ifremer a opéré, avec le soutien financier de la Région Languedoc-Roussillon et de l'Agence de l'Eau Rhône Méditerranée & Corse, le Réseau de Suivi Lagunaire (RSL) afin d'évaluer et suivre l'évolution de l'état de l'ensemble des lagunes du Languedoc-Roussillon en termes d'eutrophisation. Ces diagnostics ont abouti, dans les premières années, à une prise de conscience par les acteurs locaux des risques liés à la dégradation de la qualité de ces milieux. Des actions de gestion visant à réduire les apports en sels nutritifs à ces écosystèmes ont été mises en œuvre sur la plupart des lagunes (Ifremer, 2013). Aujourd'hui, dans ces milieux en phase de restauration (Derolez *et al.*, 2017), se posent les questions 1) : du temps nécessaire à la restauration de l'ensemble des compartiments de l'écosystème et 2) : des charges maximales en azote et phosphore qu'une lagune peut tolérer tout en satisfaisant aux exigences du « bon état écologique » au sens de la Directive Cadre sur l'Eau (DCE) ?

Afin d'apporter des éléments de réponse quantitatifs à ces questions, un outil numérique (GAMELag¹) a été développé en collaboration avec l'UMR ECOSYM (Le Noc *et al.*, 2013) en se basant sur l'approche LOICZ (Gordon *et al.*, 1996). Par suite ce modèle « simple » (modèle en boîtes avec calcul de bilan de matière aux interfaces) a été affiné au cours de phases successives de validation avec une meilleure prise en compte i) : des processus biogéochimiques qui gouvernent le fonctionnement de l'écosystème et ii) : des processus hydrodynamiques au sein des boîtes (Pete *et al.* 2017 ; Saguet *et al.*, 2019).

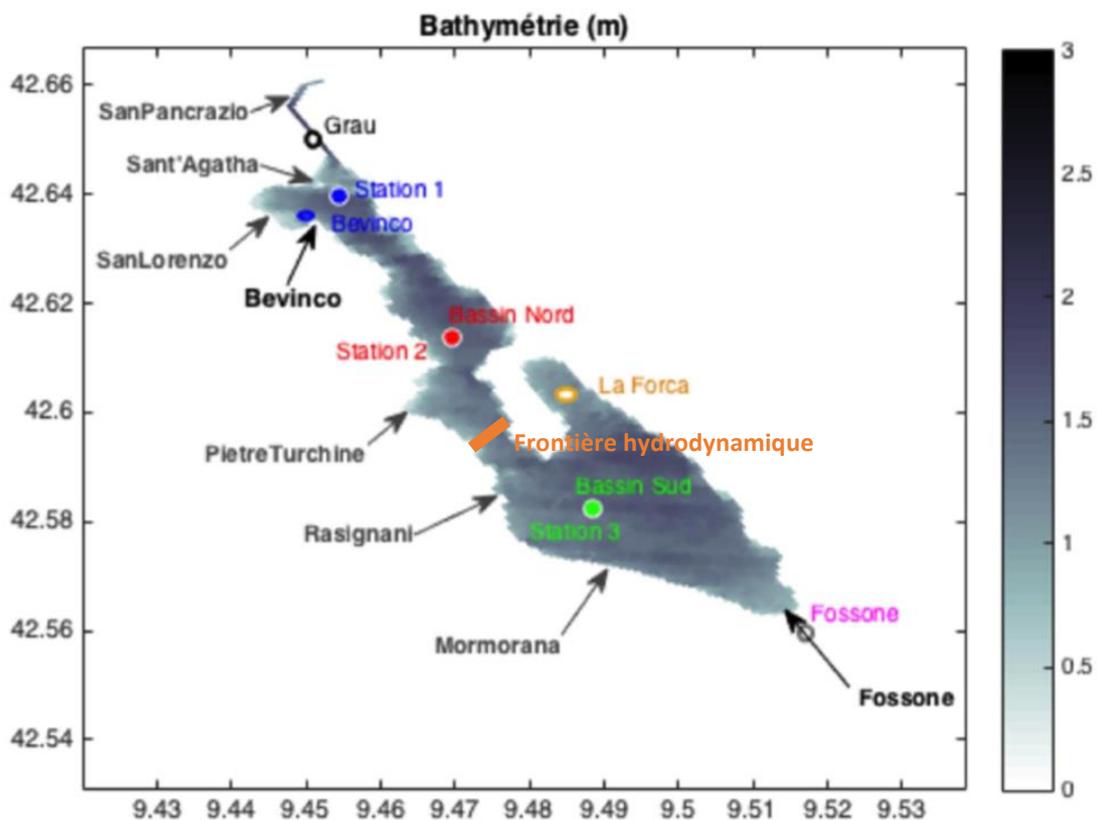
Après une phase de mise en place et de validation de ce modèle GAMELag sur la lagune de Biguglia (rapport phase 2), ce rapport présente les scénarios hydroclimatiques conjugués à des apports en azote et phosphore contrastés afin de mieux cerner la réponse de l'écosystème de Biguglia face à ces contraintes. Les comparaisons entre scénarios seront envisagées par rapport à une simulation de référence, établie dans le rapport précédent, pour les années 2017 et 2018. Les réponses de l'écosystème de Biguglia seront évaluées au regard d'indicateurs tels que le bilan hydrique, le bilan de matière azote et phosphore, l'état

¹ Modèle pour la Gestion des Aménagements des Milieux Eutrophisés : les Lagunes languedociennes

écologique (indicateur DCE) ainsi que la dynamique des stocks et flux associés à chacun des scénarios.

2. 1.2 Site de l'étude

La lagune de Biguglia est une lagune de petit fond dont les échanges avec la mer se font principalement par le biais du grau au nord et du canal du Fossone au sud (c.f. cartes ci-dessous) qui relie le sud de la lagune à l'estuaire du Golo. Le fonctionnement hydrodynamique de la lagune est soumis aux conditions météorologiques, et est dépendant des apports du bassin versant et des échanges avec la mer principalement. Les apports du bassin versant se font principalement par 2 cours d'eau permanents : le Bevinco qui débouche dans la lagune et le Golo, dont les eaux impactent le sud de la lagune par l'intermédiaire du canal du Fossone. Il existe également 5 cours d'eau temporaires qui arrivent à la lagune. Le ruissellement et les apports d'eaux souterraines peuvent également intervenir. La salinité de la lagune est très variable saisonnièrement et de façon interannuelle ; le gradient de salinité nord sud est permanent mais peut être plus fortement marqué certaines années. Le bassin sud est le plus dessalé toutefois le bassin nord selon les années hydrologiques peut également être très dessalé. L'écosystème de la lagune est donc soumis à ces fortes fluctuations interannuelles qui peuvent engendrer des évolutions drastiques des communautés, phytoplanctoniques et macrophytiques par exemple.



Très peu profond, l'étang de Biguglia fait partie d'une réserve naturelle protégée (faune et flore) depuis 1994, qui est néanmoins soumise à d'importantes pressions anthropiques. Les activités économiques de ses rives et de son bassin versant (d'une superficie de 180 km²) comprennent l'exploitation de pêche, l'agriculture, l'élevage bovin ainsi que des zones industrielles, commerciales et touristiques.

Avec une superficie de 14,5 km², l'étang de Biguglia est le plus vaste des étangs de Corse et représente près de la moitié de ses zones humides. L'établissement d'une carte bathymétrique récente (Orsoni et Tomasino 2015) a permis la mise en place d'une configuration du modèle de l'étang qui suggère un volume estimé de 18 Mm³ (Dufresne, *et al.* 2017). Dans le passé, le volume de l'étang avait été estimé entre 10,2 Mm³ (Frisoni et Dutrieux 1992) et 38 Mm³ (Orsoni, *et al.* 2001).

D'origine lagunaire, l'étang s'étend parallèlement à la mer avec laquelle il communique par un grau de 1,7 km au nord de l'étang. Au sud, le canal du Fossone peut aussi favoriser l'intrusion d'eau de mer dans l'étang lorsque les conditions sont favorables (*i.e.* vent du sud-est, niveau d'eau en mer plus élevé, faible débit du Golo, ...). Le Fossone permet aussi des échanges d'eau douce avec le fleuve Golo, légèrement en amont de son estuaire, générant un apport annuel d'environ 4 Mm³ (Frisoni et Dutrieux 1992). Les apports d'eau douce à l'étang sont engendrés par le ruissellement (lessivage du bassin versant) et par les fleuves et les cours d'eau temporaires (localisés sur la Figure 4), largement influencés par les précipitations. Dans le bassin nord, le fleuve Bevinco y coule de façon permanente et contribue à un apport d'eau douce de 19 à 20 Mm³ par an (BCEOM 2006, Frisoni et Dutrieux 1992). Ce fleuve d'une longueur de 28,1 km compte une quinzaine d'affluents et draine un bassin versant d'environ 70 km². De petits cours d'eau temporaires alimentent aussi dans l'étang en eau douce en période de crues (San Pancrazio, Sant'Agatha, San Lorenzo, Petre Turchine, Rassignani, Mormorana). Les débits de ces fleuves à leur exutoire ne sont pas référencés à notre connaissance, mais l'apport total du bassin versant (incluant les apports du Bevinco) est compris entre 27,6 à 58 Mm³·an⁻¹ selon Frisoni et Dutrieux (1992) et estimé à 43 Mm³ par Mouillot, *et al.* (2000). Les précipitations (800 et 900 mm·an⁻¹) représenteraient un apport compris entre 12 Mm³·an⁻¹ (BCEOM 2006) et 14,3 Mm³·an⁻¹ (Frisoni et Dutrieux 1992, Mouillot, *et al.* 2000).

Le vent joue un rôle primordial sur la dynamique de l'étang en exerçant un frottement à la surface de l'eau et en agissant comme moteur de la circulation, ce qui peut engendrer assez d'énergie pour remobiliser le fond sédimentaire (Mouillot, *et al.* 2000). Les échanges hydrogéologiques, jugés comme faibles (BCEOM 2006), seront négligés pour cette étude.

2 Fonctionnement de la lagune de Biguglia

Suite au déploiement de GAMELag dans la précédente phase de ce travail, il est maintenant possible de réaliser des simulations sur les années 2017 et 2018 qui serviront de « référence » dans le travail de scénarisation suivant.

Les simulations établies sur les années 2017-2018 (cf rapport précédent, « Déploiement du modèle GAMELag sur la lagune de Biguglia ») reproduisent de manière satisfaisante les variations de salinité, de chlorophylle a, les variations de concentrations en azote et phosphore inorganique (NO_3^- , NH_4^+ et PO_4^{3-}) et organique dissous (NOD et POD) ainsi que les concentrations en azote et phosphore total (NT et PT) présents dans la colonne d'eau. Ces simulations sur les deux années 2017-2018 permettent d'établir une simulation de « référence » qui sera considéré comme le point de repère pour la suite de cette étude comparative de scénarios.

Il est désormais possible d'effectuer des bilans d'eau et de matière sur chaque année aux interfaces de la lagune (cf. description du modèle dans le précédent rapport). Une représentation de ces bilans (Figure 2) montre qu'en 2017, année sèche, la lagune a reçu 83,6 Mm³ d'eau depuis son bassin versant accompagné de 40 tonnes d'azote et 4,8 tonnes de phosphore. Le bilan net des échanges lagune atmosphère montre notamment une forte évaporation avec une sortie de 7 Mm³ d'eau. Le volume résiduel ou bilan net d'eau à l'interface mer-lagune est de 76,6 Mm³. Par contraste une année humide, comme 2018, la lagune de Biguglia reçoit d'avantage d'eau avec 128,8 Mm³ provenant du bassin versant associé à un apport d'eau atmosphérique (bilan net de 0.9 Mm³). Lors de l'année 2018, la lagune a reçu 79,6 tonnes d'azote et 9,7 tonnes de phosphore (BV et atmosphère). Le bilan net à l'interface mer-lagune indique une sortie d'eau et de matière avec respectivement 129,7 Mm³ d'eau, 59,4 tonnes d'azote et 1,5 tonnes de phosphore.

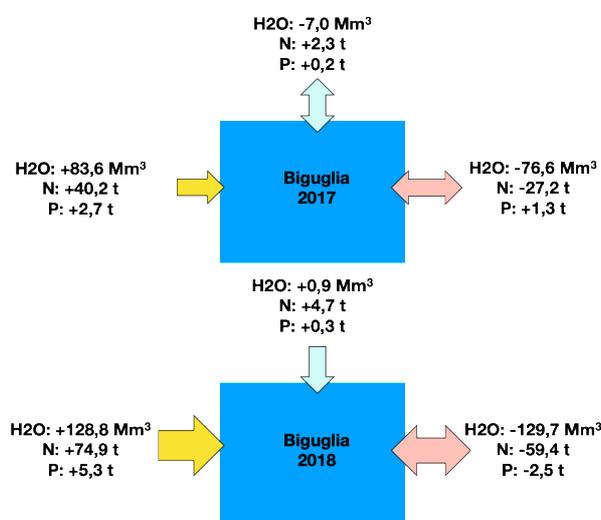


Figure 2. Bilans hydriques et de matière N et P aux interfaces de la lagune de Biguglia pour les années 2017 et 2018 (par convention le signe positif indique une entrée d'eau ou de matière dans la lagune).

Les simulations réalisées à partir de ces données de forçages aux interfaces permettent maintenant d'établir le bilan des stocks d'azote et de phosphore au sein de la lagune (Figure 3). Ces bilans montrent que les principaux réservoirs de matière au sein de la colonne d'eau sont les macrophytes (Macro) et la matière organique (dissoute et particulaire : MO), les compartiments nutriment (SN) et phytoplancton (Phyto) contiennent des quantités de matière beaucoup plus faible (environ 10 à 30 fois inférieur pour l'N et 10 à 50 fois inférieur pour le P).

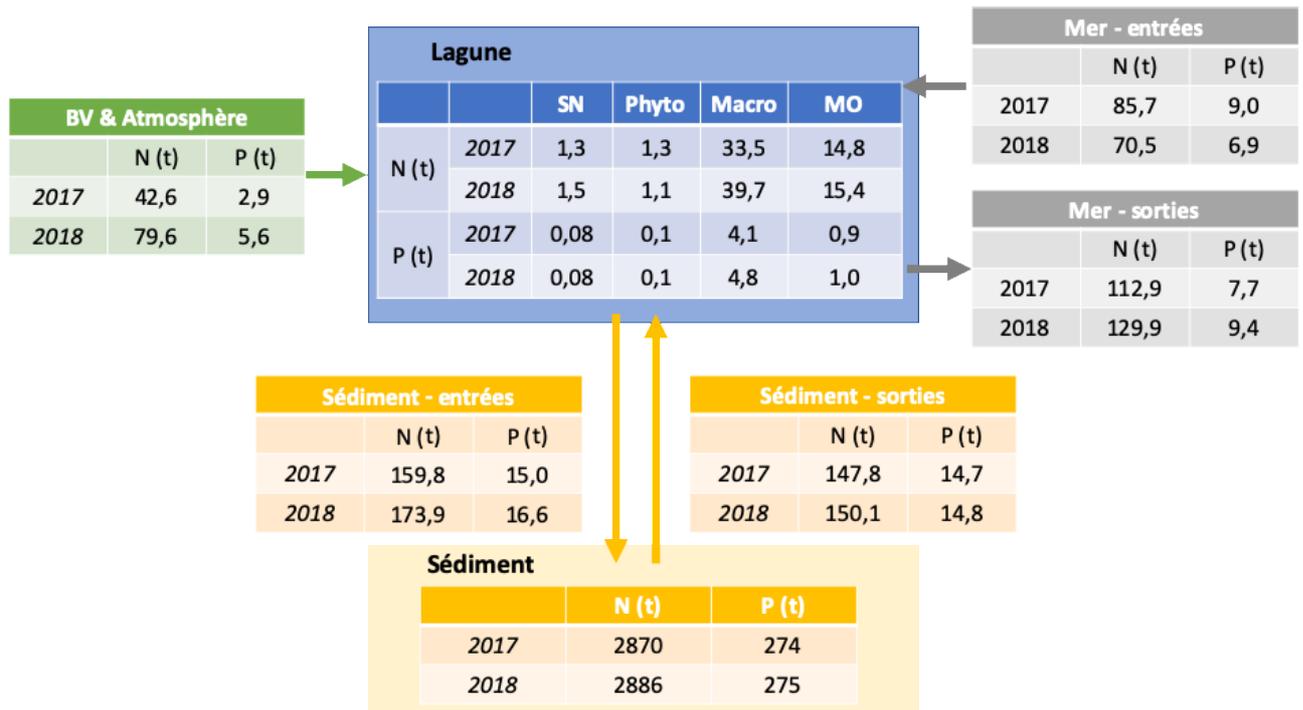


Figure 3. Bilans des stocks de matière (N & P en tonne) par compartiments (nutriments: SN, phytoplancton: Phyto, macrophytes: Macro et matière organique: MO) dans la colonne d'eau et le sédiment pour les années 2017 et 2018.

Dans la lagune, le compartiment sédimentaire est de loin le réservoir le plus important de matière avec plus de 2800 tonnes d'azote ($\sim 215 \text{ gN/m}^2$) et un peu plus de 270 tonnes de phosphore ($\sim 20 \text{ gP/m}^2$). Les échanges de matière entre le sédiment et la colonne d'eau sont contrastés entre 2017 et 2018, particulièrement pour l'azote, mais montrent pour les deux éléments un stockage dans les sédiments.

En combinant les différents flux entrants et sortants des compartiments biologiques représentés dans le modèle GAMELag, il est possible d'obtenir le détail des flux d'azote et de phosphore entre ces compartiments. La répartition de l'azote et du phosphore dans le système peut se faire dans ces différents compartiments au détriment de certains et à l'avantage d'autres mais le bilan total en azote et phosphore est toujours nul car le modèle est conservatif.

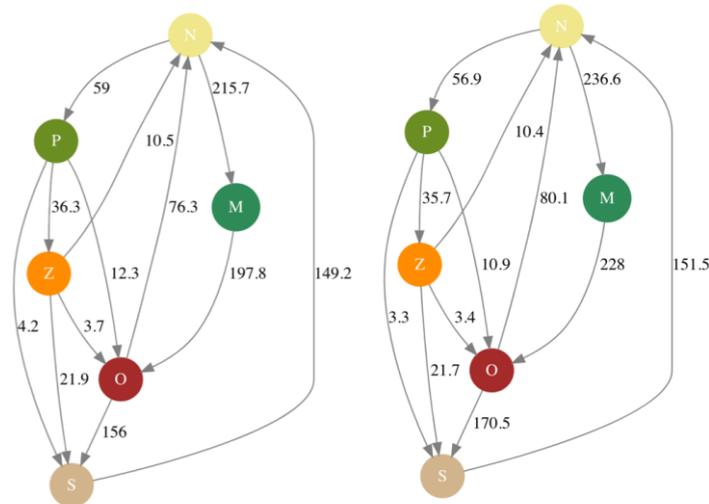


Figure 4. Schéma des flux d'azote (en tonne) entre les compartiments biologiques de l'écosystème Biguglia pour les années 2017 et 2018.

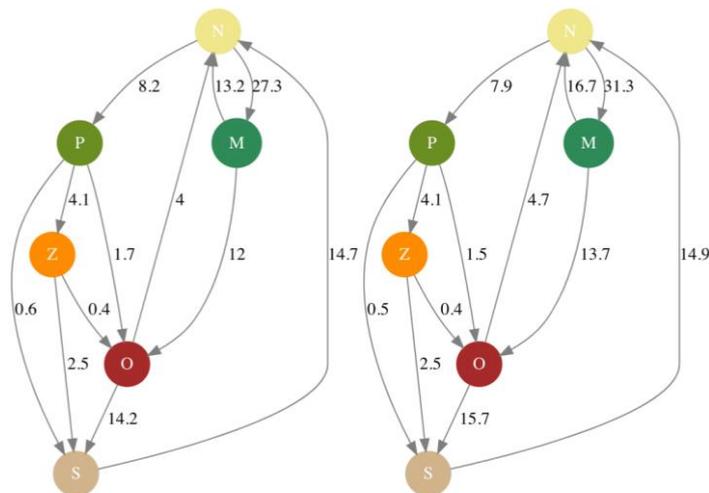


Figure 5. Schéma des flux de phosphore (en tonne) entre les compartiments biologiques de l'écosystème Biguglia pour les années 2017 et 2018.

Le bilan annuel des flux d'azote (Figure 4) et de phosphore (Figure 5) indique que ces deux éléments se propagent principalement du compartiment nutriment (N) vers le compartiment macrophyte (M) puis matière organique (O) et enfin sédiment (S). Une part importante, de 51 à 54% pour l'N et de 38 à 43% du P, sont reminéralisés en nutriments depuis le sédiment. La seconde voie de reminéralisation provient de la dégradation de la matière organique. Les flux d'azote et de phosphore inorganiques absorbés par le compartiment macrophyte sont 3 à 4 fois supérieurs aux flux entrants dans le compartiment phytoplanctonique.

Il est possible d'utiliser les sorties du modèle GAMELag sur la période estivale (1^{er} Juin au 31 Aout, n=92) pour réaliser une évaluation de l'« état écologique » de la lagune sur certains critères physico-chimiques (NID : azote inorganique dissous ($\text{NO}_3^- + \text{NH}_4^+$); PID : phosphore inorganique dissous (PO_4^{3-}); NT : azote total et PT : phosphore total). Le modèle permet également d'estimer les concentrations en chlorophylle *a* dans la colonne d'eau en utilisant les variables « petit » et « grand » phytoplancton. Ces deux variables d'état sont exprimées en

mmolN/m³ dans le modèle et converties en µg Chl_a.l⁻¹ en utilisant un facteur de conversion de 1.

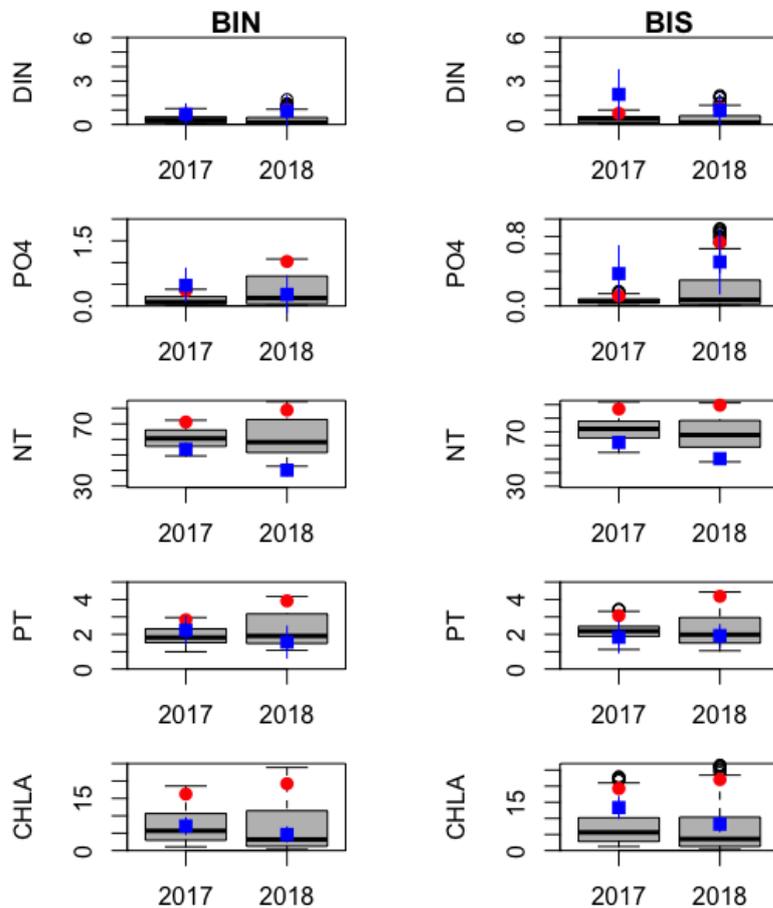


Figure 6. Variabilité (boxplot) des concentrations estivales simulées pour le NID, PID, NT, PT (µM) et Chl a (µg/l) dans les bassins nord (BIN) et sud (BIS) de la lagune de Biguglia en 2017 et 2018. Les percentiles 90 issus calculés à partir des sorties de modèle sont symbolisés par un cercle rouge, les moyennes estivale et écart-types des observations issues du RSL-DCE sont symbolisées par le carré bleu et segments bleus.

La figure 6 permet de mettre en perspective la variabilité des concentrations estivales en NID, PID, NT, PT et Chl_a simulées avec les observations (bleu) réalisées sur la lagune de Biguglia. La plupart des observations se trouvent dans le domaine de variabilité des sorties du modèle GAMELag pour les 2 années simulées et dans les 2 bassins considérés de la lagune.

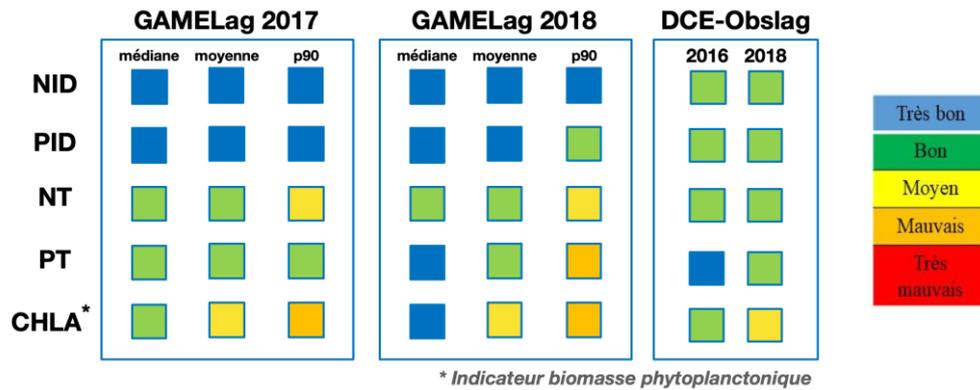


Figure 7. Classes d'état écologique pour les indicateurs physico-chimique (NID, PID, NT et PT) et la biomasse phytoplanctonique (CHLA) issues des simulations GAMELag 2017 et 2018. Les classes d'état sont données pour les valeurs statistiques médiane, moyenne et percentile 90. Les observations issues des suivis DCE-ObsLag en 2016 (2011-2016) et 2018 (2013-2018) sont données à titre de comparaison. La correspondance des classes d'état et codes couleurs sont donnés en légende (droite)

Les sorties du modèle sur cette période estivale peuvent donc être utilisées pour évaluer l'état écologique (physico-chimie et biomasse chlorophyllienne) de la lagune. A partir de ces données, l'état écologique peut être présenté sous forme de code couleur correspondant aux classes d'état décrites dans le diagnostic DCE (E.C., 2000).

Il est possible d'utiliser plusieurs valeurs statistiques pour déterminer ces classes d'état (Figure 7) et ces valeurs (moyenne, médiane et percentile 90) calculées sur la période estivale aboutissent à un diagnostic qui peut varier. Par exemple, en 2017, les sorties de modèle indiquent que la lagune est dans le « bon » état lorsque la médiane (50% des données de part et d'autre de cette valeur). En revanche, la biomasse phytoplanctonique est déclassée de l'état « bon » à l'état « moyen » lorsque la moyenne est utilisée. Ces indicateurs « simulés » seront utilisés dans la suite de cette étude pour comparer les scénarios.

3 Scénarios

3. 3.1 Motivations des scénarios proposés

La lagune de Biguglia est soumise à une forte variabilité hydrométéorologique marquée par des cumuls de précipitation et des quantités d'eau apportées par le bassin versant qui sont contrastées. Ces apports hydriques variables sont accompagnés d'apports de matière eux-aussi contrastés (40 à 80 tonnes d'N et 3 à 10 tonnes de P pour une année sèche et humide respectivement). De plus, le ratio molaire des apports d'azote et de phosphore (N:P ; mole:mole) ont évolué depuis le début des années 2000 à aujourd'hui (cf. Figure 14, rapport phase 2).

Tableau 1. Scénarios proposés dans le cadre de cette étude où sont comparées des années sèches et humides associées à des apports d'azote élevés (100 tonnes) et faibles (20 tonnes). Les apports de phosphore ont été calculés à partir de ratio N :P (mol :mol) contrastés et produisant des conditions d'apport en phosphore élevées (N :P=10) ou faibles (N :P=30). Les deux premiers scénarios constituent la « Référence » et sont représentés par les simulations des années 2017 et 2018 utilisées pour la mise en place du modèle sur la lagune de Biguglia.

Scénario	Année	Azote	Phosphore	Pluviométrie
1	2017			-
2	2018			+
3	2017	100	NP = 30	-
4	2018	100	NP = 30	+
5	2017	100	NP = 10	-
6	2018	100	NP = 10	+
7	2017	20	NP = 30	-
8	2018	20	NP = 30	+
9	2017	20	NP = 10	-
10	2018	20	NP = 10	+

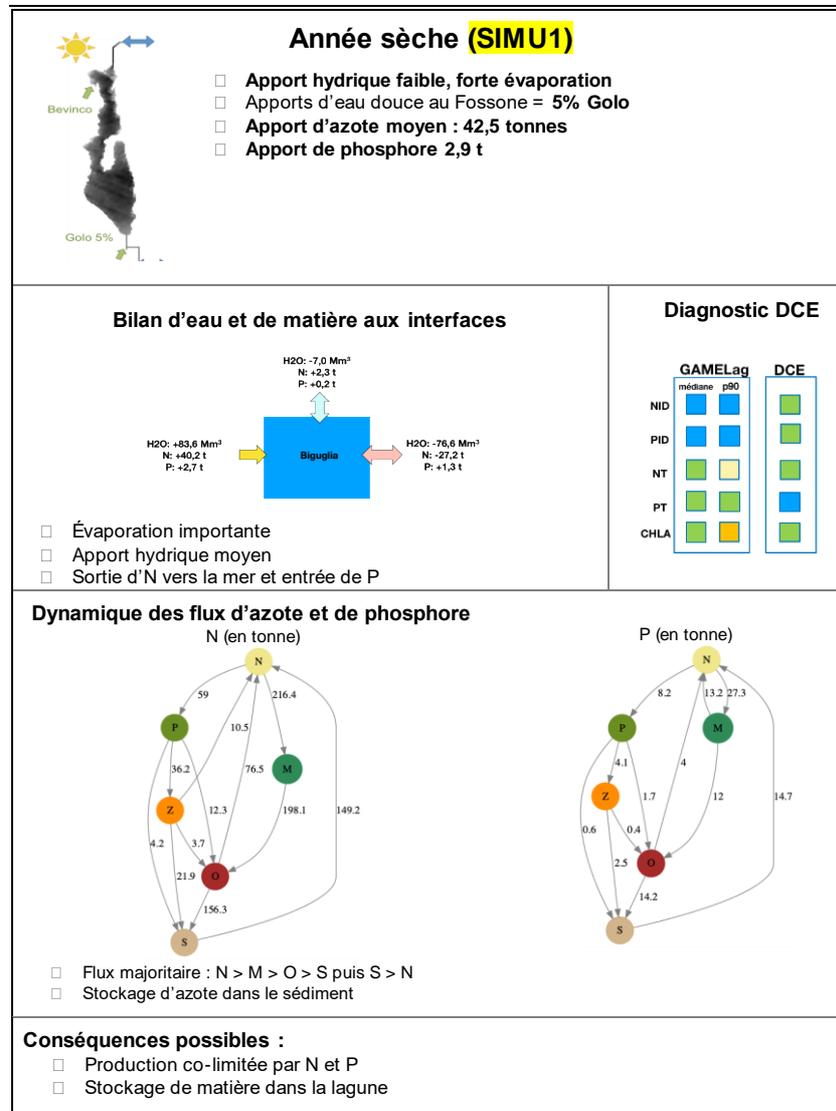
En effet, ce ratio varie entre 10 et 20 de 2000 à 2009 puis augmente de façon marquée à partir de 2010 (20-60). Les contrastes hydrométéorologiques associés à cette augmentation du ratio N :P dans les apports de matière depuis le bassin versant ont motivés la déclinaison de plusieurs scénarios visant à évaluer l'effet d'apports d'azote et de phosphore différents dans les conditions hydrométéorologiques 2017-2018 (sec vs. humide) sur la réponse de l'écosystème de la lagune de Biguglia (Tableau 1).

Les réponses de l'écosystème Biguglia ont été évaluées au regard des sorties de modèle présentées ci-dessus (cf. section 2), bilans hydriques et de matière aux interfaces, stock et flux d'azote et de phosphore dans les compartiments biologiques et état écologique de la lagune. Les résultats des simulations 1 à 10 sont présentés sous forme de fiche synthétique regroupant ces éléments d'évaluation des réponses de l'écosystème.

4. 3.2 Présentation et grille de lecture des fiches synthétiques

Pour chacun des scénarios une fiche de synthèse est proposée (Figure 7). Cette fiche regroupe 5 sections qui comprenant, tout d'abord, la **description du scénario** : année humide ou sèche, apport total d'eau, d'azote et de phosphore et le cas échéant le ratio molaire utilisé dans les apports. Un **bilan d'eau et de matière aux interfaces** de la lagune est ensuite proposé afin d'évaluer, de façon globale, les entrées et sorties. Le **diagnostic de l'état écologique** de la lagune est évalué au regard des indicateurs physico-chimiques et de biomasse phytoplanctonique présentés ci-dessus. Cet état est présenté sous forme de code couleur déterminant des classes d'état (identique au code DCE ; cf. section 2 et Figure 7). L'état écologique présenté est basé sur la valeur médiane et le percentile 90 pour chaque indicateur. Le diagnostic d'état écologique déterminé par les sorties de modèle est comparé au diagnostic DCE établi en 2018 (2013-2018 ; Derolez et al., 2019). Dans la section suivante, les **flux annuels**

d'azote et de phosphore entre les compartiments biologiques sont représentés et permettent de tracer les voies principales d'utilisation de ces deux éléments. Finalement, les **conséquences possibles** sur le fonctionnement global de la lagune de Biguglia sont proposées dans la dernière section.

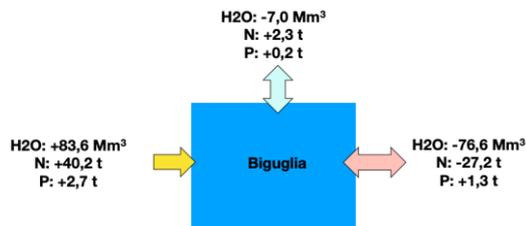


Année sèche Scénario 1



- Apport hydrique faible, forte évaporation
- Apports d'eau douce au Fossone = 5% Golo
- Apport d'azote moyen : 42,5 tonnes
- Apport de phosphore 2,9 t

Bilan d'eau et de matière aux interfaces

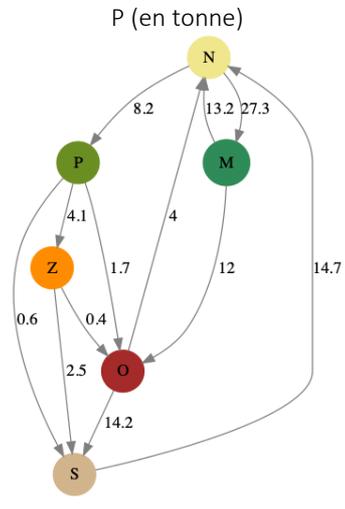
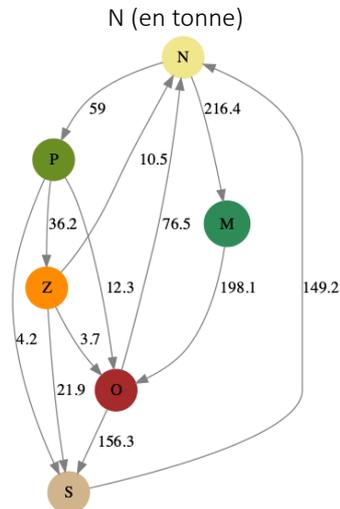


- Évaporation importante
- Apport hydrique moyen
- Sortie d'N vers la mer et entrée de P

Diagnostic DCE

	GAMELag		DCE
	médiane	p90	
NID	■	■	■
PID	■	■	■
NT	■	■	■
PT	■	■	■
CHLA*	■	■	■

Dynamique des flux d'azote et de phosphore



- Flux majoritaire : N > M > O > S puis S > N
- Stockage d'azote dans le sédiment

Conséquences possibles :

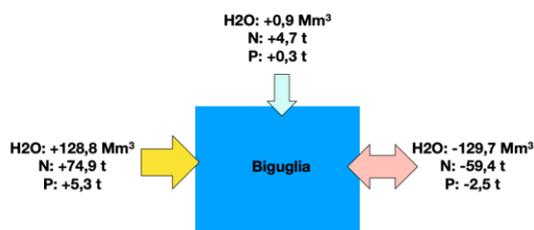
- Production co-limitée par N et P
- Stockage de matière dans la lagune

Année humide Scénario 2



- Apport hydrique fort
- Apports d'eau douce au Fossone = 5% Golo
- Apport d'azote élevé : 79,6 tonnes
- Apport de phosphore 9,7 t

Bilan d'eau et de matière aux interfaces



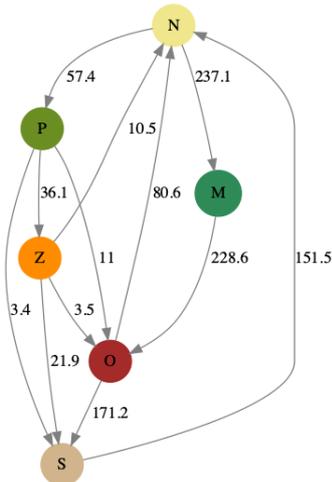
- Apport hydrique élevé
- Sortie d'N et P vers la mer

Diagnostic DCE

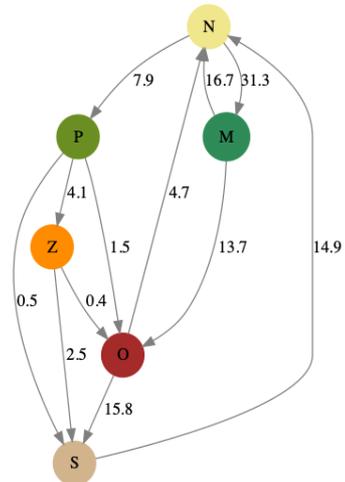
	GAMELag		DCE
	médiane	p90	
NID	■	■	■
PID	■	■	■
NT	■	■	■
PT	■	■	■
CHLA*	■	■	■

Dynamique des flux d'azote et de phosphore

N (en tonne)



P (en tonne)



- Flux majoritaire : N > M > O > S puis S > N ; plus importants qu'en année sèche
- Stockage d'azote dans le sédiment

Conséquences possibles :

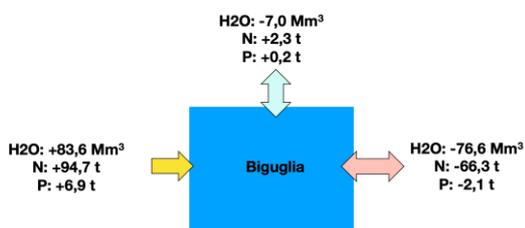
- La lagune exporte de la matière
- Stockage de matière dans la lagune



Année sèche +N -P Scénario 3

- Apport hydrique faible, forte évaporation
- Apports d'eau douce au Fossone = 5% Golo
- Apport d'azote élevé : 97 tonnes
- Apport de phosphore faible 7,1 t >> ratio molaire N:P = 30

Bilan d'eau et de matière aux interfaces

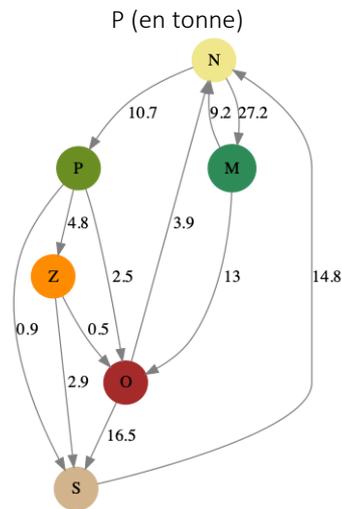
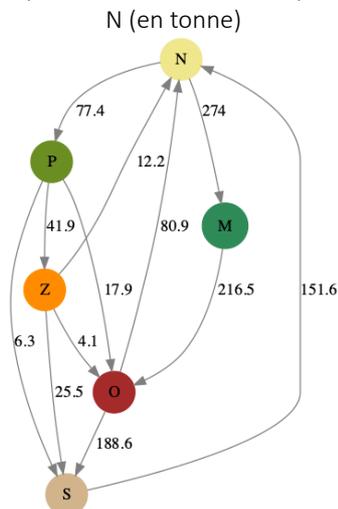


- Évaporation importante et apport hydrique moyen
- La lagune exporte 68% de l'N et 30% du P apportés
- Sortie d'N et de P vers la mer

Diagnostic DCE

	GAMELag		DCE
	médiane	p90	
NID	■	■	■
PID	■	■	■
NT	■	■	■
PT	■	■	■
CHLA*	■	■	■

Dynamique des flux d'azote et de phosphore



- Flux majoritaire : N > M > O > S puis S > N
- Augmentation de 30% du flux de nutriments vers la phytoplancton
- Stockage d'azote dans le sédiment

Conséquences possibles :

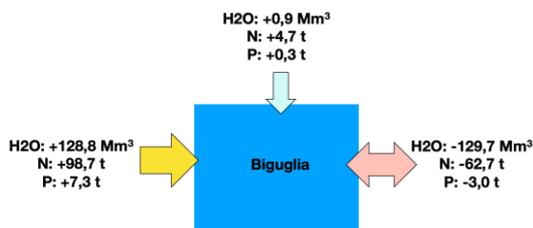
- Production limitée par P
- Stockage de matière dans la lagune



Année humide +N -P Scénario 4

- Apport hydrique fort
- Apports d'eau douce au Fossone = 5% Golo
- Apport d'azote élevé : 98,8 tonnes
- Apport de phosphore 7,3 t >> ratio molaire N:P = 30

Bilan d'eau et de matière aux interfaces

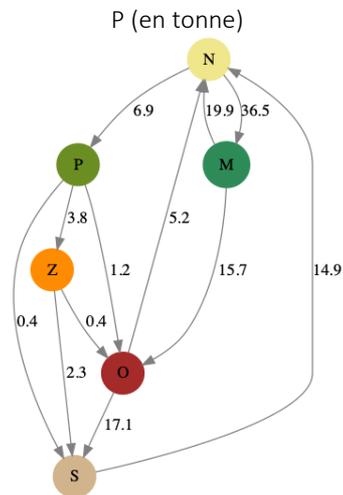
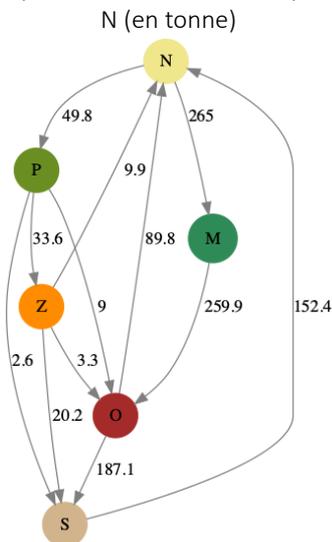


- Apport hydrique et N élevés
- Sortie d'N et P vers la mer
- État « bon » à « très mauvais »

Diagnostic DCE

	GAMELag		DCE
	médiane	p90	
NID	Blue	Blue	Green
PID	Blue	Yellow	Green
NT	Green	Yellow	Green
PT	Green	Yellow	Green
CHLA*	Blue	Red	Yellow

Dynamique des flux d'azote et de phosphore



- Flux majoritaire : N > M > O > S puis S > N ; plus importants qu'en année sèche
- Diminution de la contribution des nutriments au compartiment phytoplancton
- Stockage d'azote dans le sédiment

Conséquences possibles :

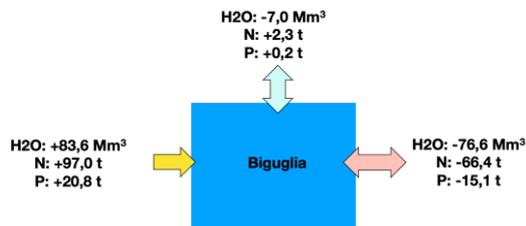
- La lagune exporte de la matière
- Stockage de matière dans la lagune



Année sèche +N +P Scénario 5

- Apport hydrique faible, forte évaporation
- Apports d'eau douce au Fossone = 5% Golo
- Apport d'azote élevé : 96,9 tonnes
- Apport de phosphore fort 14,5 t >> ratio molaire N:P = 10

Bilan d'eau et de matière aux interfaces

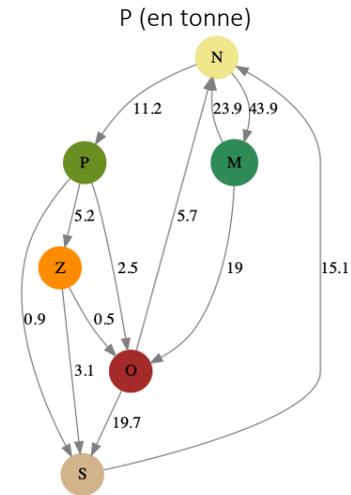
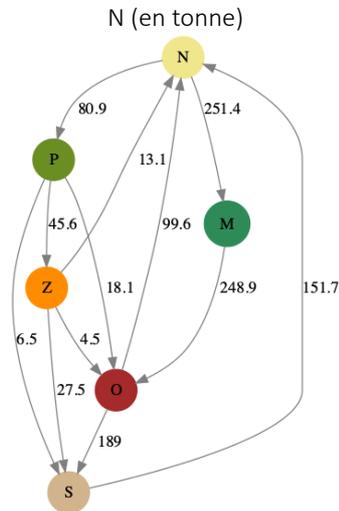


- Évaporation importante et apport hydrique moyen
- Sortie d'N et de P vers la mer (~10 x référence 2017)
- État « moyen » à « mauvais »

Diagnostic DCE

	GAMELag		DCE
	médiane	p90	
NID	■	■	■
PID	■	■	■
NT	■	■	■
PT	■	■	■
CHLA*	■	■	■

Dynamique des flux d'azote et de phosphore



- Flux majoritaire : N > M > O > S puis S > N
- + 20t d'azote vers le phytoplancton
- Stockage d'azote dans le sédiment

Conséquences possibles :

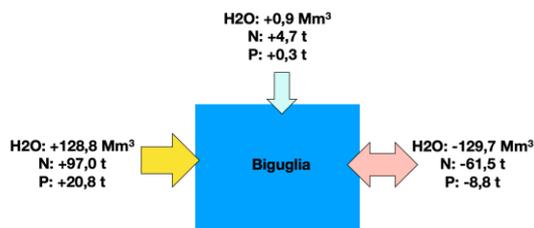
- Production co-limitée par N et P
- Stockage de matière dans la lagune
- L'excès d'azote et de phosphore dégrade l'état écologique de la lagune

Année humide +N +P Scénario 6



- Apport hydrique fort
- Apports d'eau douce au Fossone = 5% Golo
- Apport d'azote élevé : 99,1 tonnes
- Apport de phosphore 9,9 t >> ratio molaire N:P = 30

Bilan d'eau et de matière aux interfaces

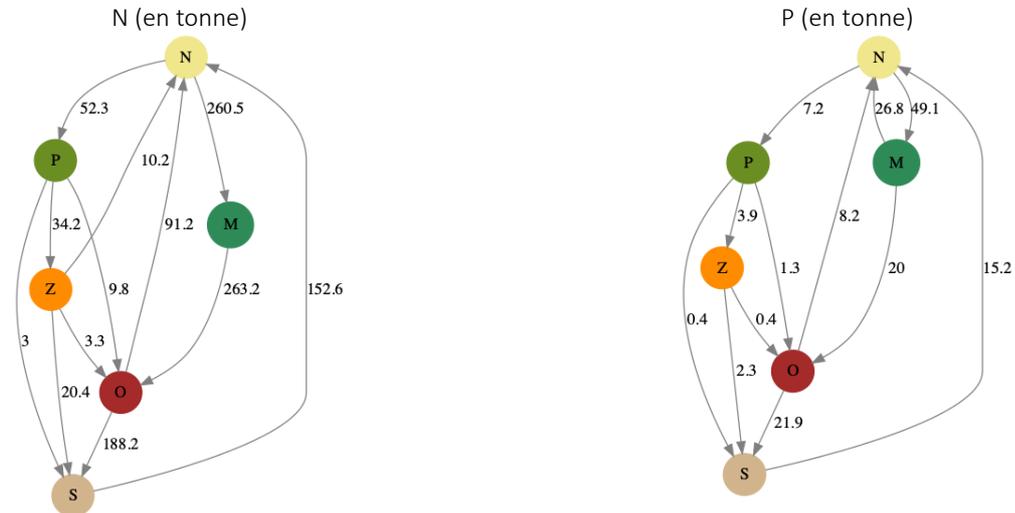


- Apport hydrique élevé
- Sortie d'N et P vers la mer
- État « moyen » à « très mauvais »

Diagnostic DCE

	GAMELag		DCE
	médiane	p90	
NID	Blue	Blue	Green
PID	Yellow	Yellow	Green
NT	Green	Yellow	Green
PT	Yellow	Red	Green
CHLA*	Blue	Red	Yellow

Dynamique des flux d'azote et de phosphore



- Flux majoritaire : N > M > O > S puis S > N ; plus importants qu'en année sèche
- Stockage d'azote dans le sédiment
- Diminution du flux N > P par rapport à la référence 2018

Conséquences possibles :

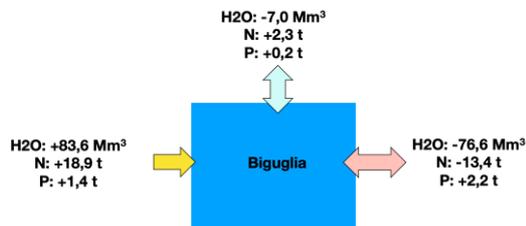
- La lagune exporte de la matière
- L'état écologique se dégrade significativement, lié à l'excès d'N et P
- Cette dégradation est plus prononcée qu'en année sèche
- Pas de limitations en N et P

Année sèche -N -P Scénario 7



- Apport hydrique faible, forte évaporation
- Apports d'eau douce au Fossone = 5% Golo
- Apport d'azote faible : 21,2 tonnes
- Apport de phosphore faible 1,6 t >> ratio molaire N:P = 30

Bilan d'eau et de matière aux interfaces

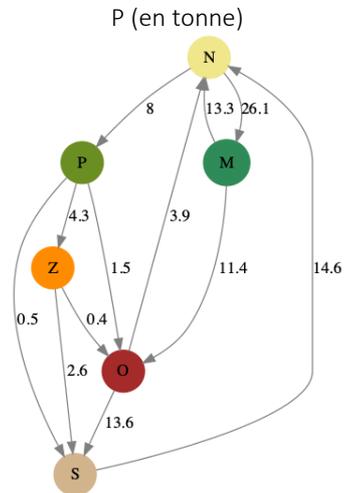
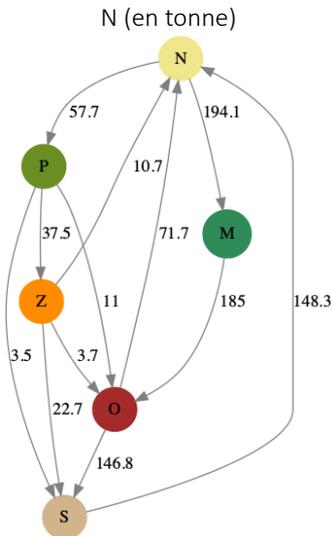


- Évaporation importante et apport hydrique moyen
- État écologique de « bon » à « mauvais »
- Sortie d'N vers la mer et **entrée de P**

Diagnostic DCE

	GAMELag		DCE
	médiane	p90	
NID	■	■	■
PID	■	■	■
NT	■	■	■
PT	■	■	■
CHLA*	■	■	■

Dynamique des flux d'azote et de phosphore



- Flux majoritaire : N > M > O > S mais moins important que la référence
- Stockage d'azote dans le sédiment
- Les flux sont similaires à la référence année sèche

Conséquences possibles :

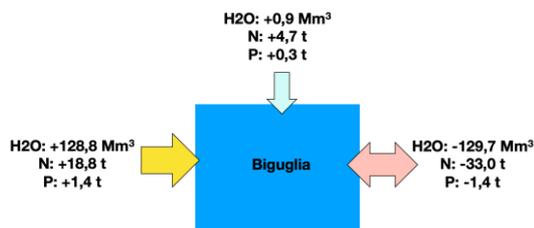
- Production globale de la lagune limitée par N et P
- Stockage de matière dans la lagune

Année humide -N -P Scénario 8



- Apport hydrique fort
- Apports d'eau douce au Fossone = 5% Golo
- Apport d'azote faible : 23,5 tonnes
- Apport de phosphore 1,7 t >> ratio molaire N:P = 30

Bilan d'eau et de matière aux interfaces



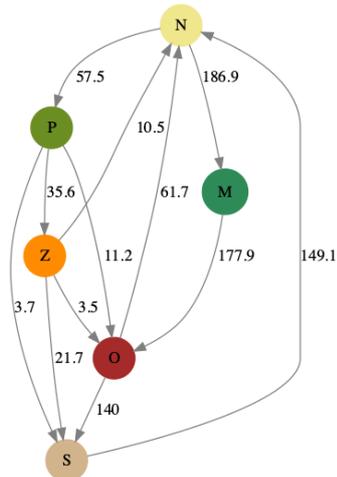
- Apport hydrique élevé, apport d'azote faible
- Sortie d'N et P vers la mer
- État écologique de « bon » à « mauvais »

Diagnostic DCE

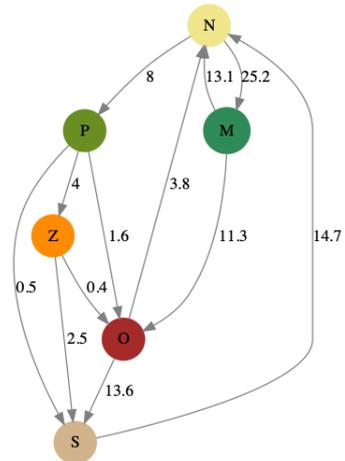
	GAMELag		DCE
	médiane	p90	
NID	■	■	■
PID	■	■	■
NT	■	■	■
PT	■	■	■
CHLA*	■	■	■

Dynamique des flux d'azote et de phosphore

N (en tonne)



P (en tonne)



- Flux majoritaire : N > M > O > S puis S > N
- Stockage d'azote dans le sédiment

Conséquences possibles :

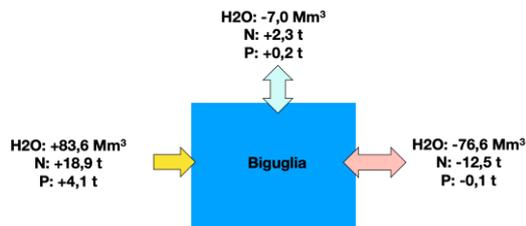
- La lagune exporte de la matière, elle est limitée par le phosphore
- Stockage de matière dans la lagune



Année sèche -N -P Scénario 9

- Apport hydrique faible, forte évaporation
- Apports d'eau douce au Fossone = 5% Golo
- Apport d'azote faible : 21,2 tonnes
- Apport de phosphore fort 4,3 t >> ratio molaire N:P = 10

Bilan d'eau et de matière aux interfaces

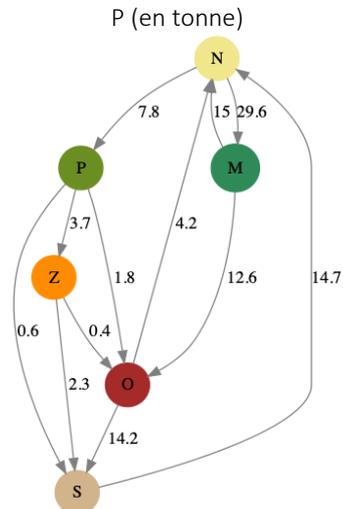
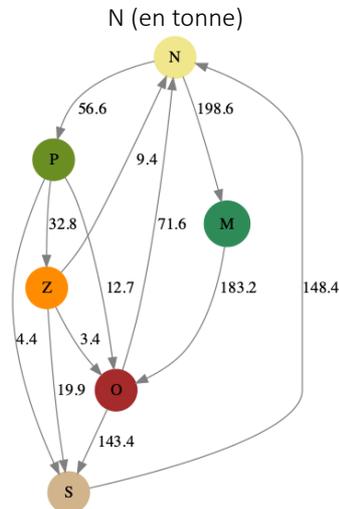


- Évaporation importante et apport hydrique moyen
- État écologique « bon » à « mauvais »
- Sortie d'N (et P, négligeable) vers la mer

Diagnostic DCE

	GAMELag		DCE
	médiane	p90	
NID	■	■	■
PID	■	■	■
NT	■	■	■
PT	■	■	■
CHLA*	■	■	■

Dynamique des flux d'azote et de phosphore



- Flux majoritaire : N > M > O > S puis S > N
- Maintien de ces flux (~référence) malgré les apports faibles en azote
- Stockage d'azote dans le sédiment

Conséquences possibles :

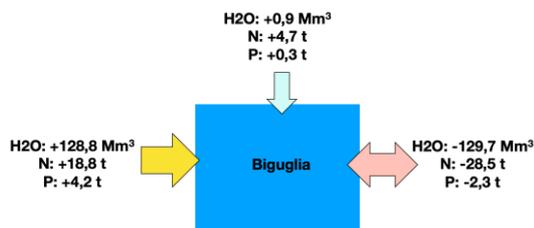
- Production co-limitée par N et P
- Stockage de matière dans la lagune
- La diminution des apports de N n'améliore pas l'état écologique. La présence de P en quantité importante permet l'utilisation de l'N

Année humide -N -P Scénario 10



- Apport hydrique fort
- Apports d'eau douce au Fossone = 5% Golo
- Apport d'azote faible : 23,5 tonnes
- Apport de phosphore fort 4,7 t >> ratio molaire N:P = 10

Bilan d'eau et de matière aux interfaces

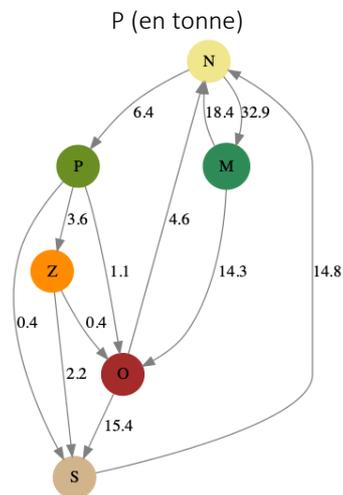
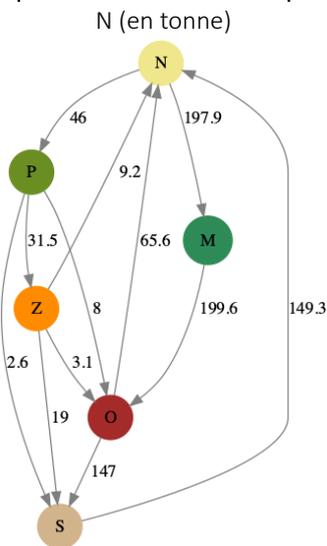


- Apport hydrique élevé
- Sortie d'N et P vers la mer moins élevées que dans la référence (SIMU2)
- État écologique de « bon » à « mauvais »

Diagnostic DCE

	GAMELag		DCE
	médiane	p90	
NID	■	■	■
PID	■	■	■
NT	■	■	■
PT	■	■	■
CHLA*	■	■	■

Dynamique des flux d'azote et de phosphore



- Flux majoritaire : N > M > O > S puis S > N
- Stockage d'azote dans le sédiment

Conséquences possibles :

- La lagune exporte moins de matière
- Sur ce scénario (-N+P) l'état se dégrade davantage par rapport à l'année sèche (SIMU9)

4 Conclusions et perspectives

5. 4.1 Conclusions

L'ensemble de ce travail a permis de déployer le modèle GAMELag, outil d'aide à la gestion des lagunes, sur la lagune de Biguglia. Les simulations réalisées sur les années 2017 et 2018 ont été validées avec les observations et permettent d'utiliser ces deux années comme références d'année sèche et humide respectivement. La scénarisation, basée sur la variabilité hydrométéorologique du site et le contraste des apports N et P provenant du bassin versant, a permis de dégager les premiers éléments de réponses quant au fonctionnement écologique de cette lagune. Cette approche par scénarisation d'apport N et P contrastés constitue également une première étape vers l'établissement de flux maximum admissible pour les deux éléments azote et phosphore.

En termes d'aide à la gestion, l'une des contraintes principales à l'heure actuelle est liée au maintien ou l'obtention du « bon » état écologique au sens de la DCE. Cet état écologique est diagnostiqué à partir d'indicateurs dont les principaux (physico-chimie et biomasse chlorophyllienne) ont été utilisés dans cette étude. La comparaison de ces indicateurs sur des années sèches et humides, déclinées en différents apports d'N et P permet d'identifier des réponses de l'écosystème de Biguglia (Figure 9).

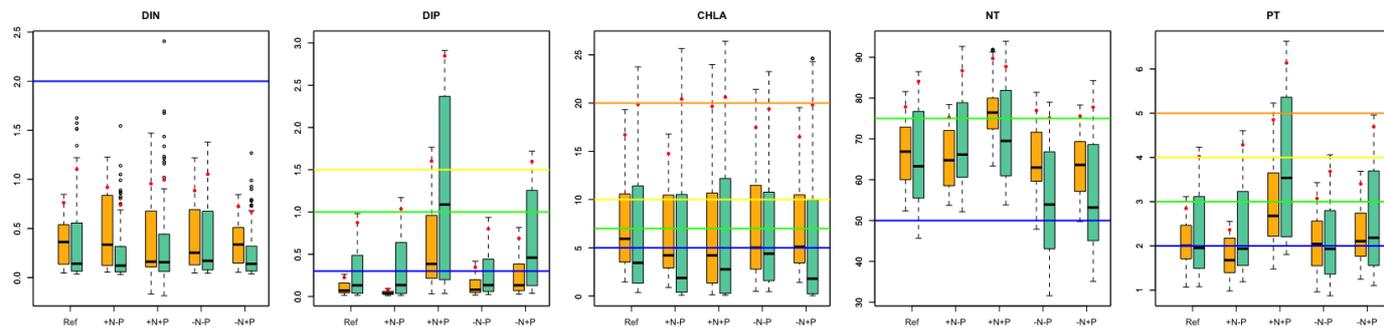


Figure 9. Variabilité (boxplot) des indicateurs d'état écologique physico-chimique (DIN, DIP, NT, PT) et de biomasse phytoplanctonique (CHLA) pour les années sèches (orange) et humides (vert). Pour chaque indicateur, les seuils de classes sont représentés avec leur code couleur.

Sur cette période estivale, le DIN est peu variable et il n'existe pas de différences significatives entre scénarios ou entre les années sèches et humides. De plus, quel que soit le scénario, les concentrations en DIN restent inférieures au seuil de classe du « très bon » état écologique. En revanche, le DIP répond de manière forte aux apports élevés d'N et P (scénario 5 et 6), en particulier lors d'année humide (scénario 6) pour lequel plus de la moitié des concentrations estivales en DIP dépassent le seuil de classe du « bon » état (médiane >1 µM). La Chl_a possède la variabilité intra-scénario la plus forte -avec des concentrations estivales étendues sur les 5 classes d'état pour 7 scénarios sur 10. Ces concentrations ne montrent pas de différences significatives entre scénarios. Le NT (azote total) réagit en particulier lorsque les apports d'N sont diminués (~20 tonnes, scénarios 7 à 10), cette diminution est d'avantage marquée en année humide (Figure 9, scénario 8 et 10). L'azote total augmente cependant mais de manière non significative, dans les scénarios 5 et 6 où les apports importants d'N sont accompagnés

d'apports importants en P (marqué dans le PID). L'ajout concomitant d'N et P lève potentiellement toute limitation de production dans l'écosystème de Biguglia ce qui se caractérise par des concentrations estivales élevées en PID, NT et PT. Le phosphore total (PT) réagit quand le ratio N:P des apports est faible (N:P=10), cette réponse étant plus marquée dans les scénarios où les apports d'azote sont importants (scénarios 5 et 6).

L'utilisation des sorties de modèle pour calculer ces indicateurs d'état selon les percentiles permet d'obtenir une grille de lecture des probabilités d'établir un état écologique souhaité (Figure 10).

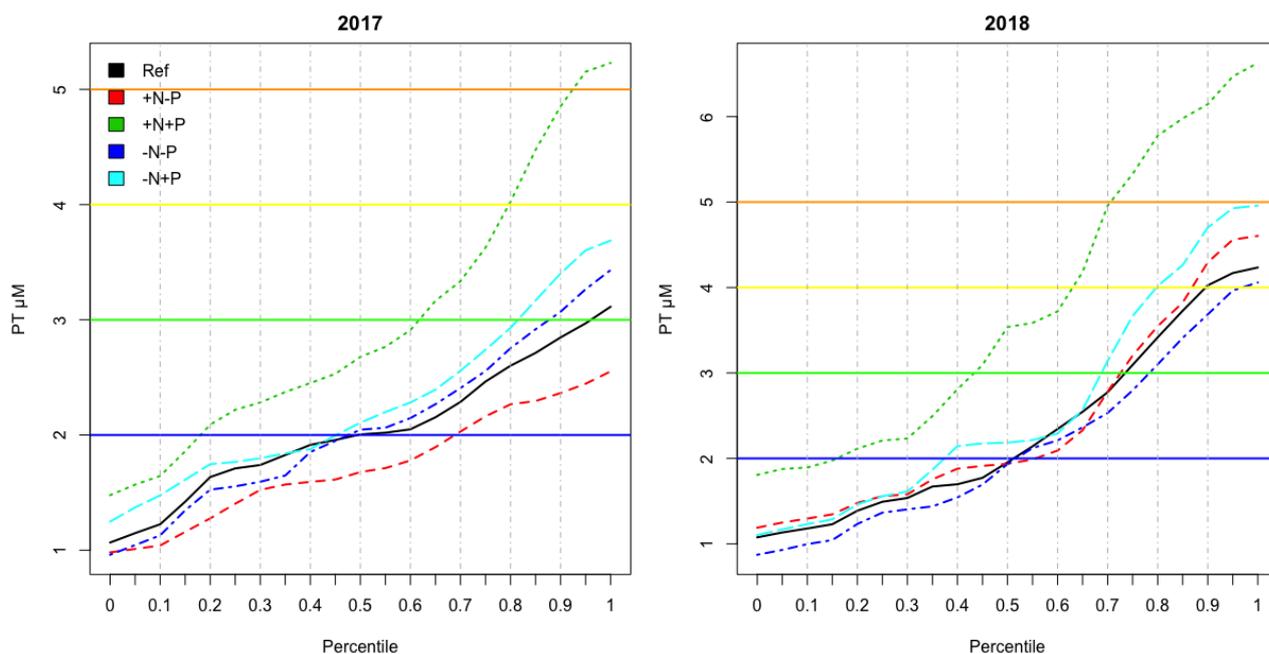


Figure 10. Percentiles (0 à 1) pour l'indicateur PT (μM) en année sèche (2017, gauche) et humide (2018, droite). Pour ces 2 conditions hydrométéorologique, les 5 cas de figure d'apport en azote et phosphore sont représentés (courbes) avec les seuils de classes d'état et leur code couleur correspondants.

Cet exemple de grille de lecture (Figure 10) montre, par exemple, que les scénarios les plus défavorables sur cet indicateur (PT) sont les scénarios avec des apports élevés d'azote et de phosphore (+N+P ; SIMU 5 et 6 ; courbe pointillés vert). Effectivement, dans le cas des simulations de référence (courbes noires en 2017 et 2018) et si l'état écologique recherché est « bon » (seuil de classe vert, $< 3\mu\text{M}$ PT), alors la probabilité de dépasser ce seuil est de 5% en année sèche et 26% en année humide (i.e. valeur du percentile pour l'intersection du seuil de classe vert et de la courbe noire « scénario référence »). Cette lecture signifie également que la probabilité de classer la masse d'eau dans le « bon » état pour cet indicateur PT est de 95% en année sèche et 74% en année humide. En poursuivant cette lecture, on obtient une probabilité de 50% de classer la masse d'eau dans le « très bon » état, ce quel que soit le type d'année.

Cette lecture par percentile permet également de comparer l'effet des différents scénarios ainsi que la réponse de l'écosystème pour chaque indicateur. Dans le cas du phosphore total (PT, Figure 10), si beaucoup d'azote et de phosphore sont ajoutés au système (+N+P, courbe pointillé vert), les probabilités de dépasser le seuil du bon état augmentent à 40% et 55% (contre 5% et 26%, cf ci-dessus) pour les années sèches et humides respectivement. En

revanche, en année sèche, seul l’ajout d’azote (+N-P, courbe tiret rouge, Scénario 3) permet de diminuer cette probabilité de dépasser le seuil du bon état (dans ce scénario la probabilité de dépasser le seuil du « bon » état est nulle). En année humide, seul le scénario pour lequel les apports d’azote **ET** de phosphore sont diminués (-N-P, courbe bleue, Scénario 9) améliore la probabilité de classer la masse d’eau dans le « bon » état (la probabilité passe de 26% à 21%). L’extension de cette grille de lecture à l’ensemble des indicateurs envisagés dans cette étude est nécessaire pour établir correctement le diagnostic d’état écologique.

Les différents scénarios d’apport envisagés impactent également les compartiments où sont stockés azote et phosphore (Tableau 2). Les deux éléments N et P sont stockés préférentiellement dans les compartiments macrophytes, matière organique et sédiment. Ce sont ces compartiments qui varient le plus suivant les scénarios d’apports. En effet, ces 3 compartiments stockent davantage d’azote lorsque les apports sont de 100 tonnes (scénario 3 à 6) alors que les stocks diminuent comparativement aux simulations de référence (scénarios 1 et 2) lorsque ces apports sont de 20 tonnes (scénarios 7 à 10). Cette diminution des stocks d’azote dans les 3 principaux compartiments (macrophytes, matière organique et sédiment) s’accompagne d’une diminution des stocks de phosphore uniquement pour les scénarios 7 et 8, c’est-à-dire les scénarios dans lesquels les apports en azote sont faibles (20 tonnes) et les apports en phosphore sont faibles également (N:P=30).

Table 2. Stocks d’azote et de phosphore (en tonne) dans les différents compartiments de l’écosystème pour les scénarios de référence (1 et 2, gras). La variation des stocks d’N et P (en tonnes) dans les scénarios 3 à 10 sont exprimés par différence (delta) par rapport aux références année sèche et humide respectivement.

	Scenario	Année	Nutriment	Phytoplancton	Zooplancton	Macrophyte	Matière organique	Sédiment
Azote	1	sec	1.32	1.29	0.22	33.60	14.86	2870.17
	2	humide	1.50	1.13	0.24	39.80	15.46	2886.59
	3	sec	2.13	0.60	0.09	1.23	1.15	41.59
	4	humide	-0.42	-0.22	-0.02	6.11	1.53	14.94
	5	sec	0.74	0.63	0.11	6.71	3.66	43.80
	6	humide	-0.85	-0.13	-0.01	5.25	1.74	19.09
	7	sec	-0.50	-0.16	0.01	-1.95	-0.90	-14.89
	8	humide	-0.86	0.04	-0.01	-7.65	-3.30	-40.85
	9	sec	-0.88	0.05	-0.04	-1.75	-0.89	-14.88
	10	humide	-1.40	-0.30	-0.05	-3.23	-2.60	-38.48
Phosphore	1	sec	0.08	0.18	0.02	0.90	4.10	274.45
	2	humide	0.08	0.16	0.03	1.09	4.81	275.27
	3	sec	0.13	0.08	0.01	0.01	-0.37	2.75
	4	humide	0.02	-0.03	0.00	0.11	0.77	1.01
	5	sec	1.12	0.09	0.01	0.30	2.25	6.90
	6	humide	0.35	-0.02	0.00	0.69	2.22	6.47
	7	sec	-0.02	-0.02	0.00	-0.02	-0.20	-0.87

	8	humide	0.00	0.01	0.00	-0.20	-0.86	-2.50
	9	sec	0.10	0.01	0.00	0.04	0.24	0.31
	10	humide	0.10	-0.04	-0.01	-0.03	0.42	-0.96

6. 4.2 Perspectives

Cette étude sur la lagune de Biguglia constitue une première étape vers une meilleure compréhension du fonctionnement de l'écosystème au regard de ses particularités hydrodynamiques (Dufresnes et *al.*, 2018 ; 2019) et trophiques. Le déploiement du modèle GAMELag a pu être réalisé selon les connaissances actuelles des apports hydriques et de matière (N & P) du bassin versant. Le modèle a pu ensuite être validé par comparaison avec les données d'observations disponibles sur la lagune de Biguglia (suivi RSL-DCE et suivis haute fréquence en 2013-2014 (Garrido & Pasqualini, 2014) puis 2017-2018² Dufresne et *al.*, 2017). Si ces comparaisons mesures-modèle montre une bonne corrélation, il reste cependant des points à éclaircir quant aux sources d'eau et de matière supplémentaires potentielles. En effet, le système Golo-Fossone, source importante d'eau et de matière montre une variabilité importante capable de causer des modifications profondes de l'écosystème (salinité, macrophytes). Le rôle du canal de ceinture de la lagune est également à préciser quant à ses apports potentiels de matière, ses relations avec la lagune et l'aquifère du bassin versant. Pour faire suite à cette étude, il est envisagé de mettre en place les outils connexes à l'outil GAMELag afin i) d'optimiser la paramétrisation du modèle GAMELag pour la lagune de Biguglia, ii) d'évaluer l'incertitude autour des sorties de modèle afin de délimiter le cadre d'utilisation de cet outil pour la gestion et iii) de déterminer les flux maximum admissible en azote et phosphore pour la lagune de Biguglia.

² – RETRALAG – N. Malet Action « fonctionnement hydrodynamique de la lagune de Biguglia »

5 Bibliographie

- BCEOM** (2006) *Etang de Biguglia. Etude hydrologique sur le périmètre de schéma d'aménagement et de gestion des eaux.*
- Saguet C, Pete R, Massinelli L, Ouisse V, Mahevas S, Derolez V, Fiandrino A** (2019) *GAMELag : de l'optimisation de l'outil à « l'exploration » des Flux Maximaux Admissibles.* RST.ODE/UL/LER-LR 19.0
- Derolez V, Gimard A, Munaron D, Ouisse V, Messiaen, Fortune M, ... Fiandrino A** (2017) *OBSLAG 2016 - volet eutrophisation. Etat DCE des lagunes méditerranéennes (eau et phytoplancton, période 2011-2016). Développement d'indicateurs de tendance et de variabilité.* Retrieved from <http://archimer.ifremer.fr/doc/00386/49744/>
- 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/>
- Dufresne C, Malet N, Fiandrino A, Coudray C** (2017) *Fonctionnement hydrodynamique de la lagune de Biguglia. Partie 1: Mise en place de la modélisation numérique 3D.* RST.ODE/UL/LER/PAC/17-14. Ifremer, L. E.-R. Provence-Azur-Corse.
- Dufresne C, Fiandrino A, Malet N** (2019) *Fonctionnement hydrodynamique de la lagune de Biguglia. Partie 3 : Indicateurs et test de scenario hydro-climatiques.* ODE/UL/LER/PAC/19-01. <https://archimer.ifremer.fr/doc/00461/57302/>
- European Community** (2000) Directive 2000/60/EC of the European parliament and of the council of 23 October 2000 establishing a framework for community action in the field of water policy.
- Frisoni & Dutrieux** (1992) *L'etang de Biguglia: Diagnostic écologique 1991-1992.* Institut des Aménagements Régionaux et de l'Environnement.
- Garrido M, Pasqualini V** (2014) *Suivi des communautés phytoplanctoniques de la lagune de Biguglia à partir de mesures in situ et d'expérimentations : Contribution à la gestion durable des milieux.* Contrat Conseil Général de la Haute Corse et Université de Corse / UMR CNRS 6134 SPE / UMS CNRS Stella Mare, Rapport intermediaire, Corte, 35p.
- Gordon D C J, Boudreau PR, Mann KH, Ong J E, Silvert W L, Smith S V ... & Yanag i T** (1996) *LOICZ Biogeochemical Modelling Guidelines.* LOICZ Reports & Studies. No 5.
- Le Noc S, Fiandrino A** (2013) *Guide méthodologique: Lagunes De La Région Languedoc-Roussillon Outil De Gestion Pour L'aménagement Des Milieux Eutrophisés Lagunaires Outil Gamelag Sous Extendsim.*
- Mouillot D, Titeux, Migon, Sandroni, Frodello et Viale** (2000) *Anthropogenic influences on a mediterranean Nature Reserve: modelling and forecasting.* Environmental Modeling & Assessment 5(4):185-92.
- Orsoni V, Souchu P, Sauzade D** (2001) *Caractérisation de l'état d'eutrophisation des trois principaux étangs corses (Biguglia, Diana et Urbino), et proposition de renforcement de leur surveillance.* Rapport final. Ifremer.
- Orsoni V, Tomasino C** (2015) *Bathymétrie de l'étang de Biguglia : Synthèse et cartographie.* ODE/LITTORAL/LER-PAC/15/06. Ifremer.
- 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.