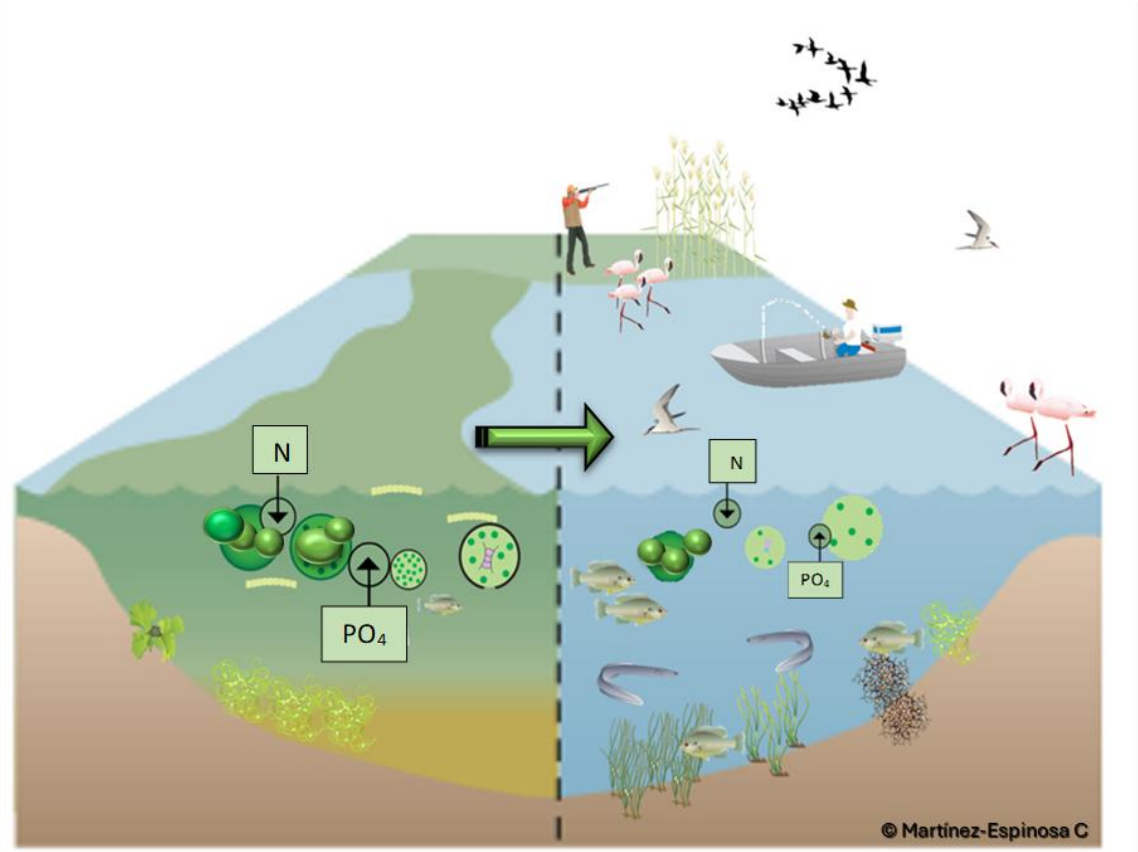
Démarche de connaissance de flux admissibles- Application de GAMELag à l'étang de Campignol

Phase II : Situation Repère et Phase III : Scénarisation



Auteures :

Columba Martínez-Espinosa[1], Julie Regis[1] et Annie Fiandrino[2]

[1] Tour du Valat, [2] Ifremer

Avec la collaboration de :

Laurent Benau, Nicolas Mañas (Parc Naturel Régional de la Narbonnaise en Méditerranée) et Anaïs Giraud (Agence de l'Eau)

Table des matières

Glossaire 4
1. Contexte de l'étude : milieux lagunaires et eutrophisation 7
1.1. Typologie des lagunes 7
1.2. Etats des lagunes oligo-mésohalines vis-à-vis de l'eutrophisation 7
1.3. Démarche d'évaluation des flux admissibles en nutriments par les lagunes 8
1.4. Etat écologique de l'étang de Campignol 9
1.5. Un site aux enjeux importants 10
1.6. Les objectifs du plan de gestion 11
2. GAMELag, un outil d'accompagnement à la mission Flux Admissibles. 13
2.1. Objectif du modèle 13
2.2. Structure du modèle 13
2.3. Interactions entre les compartiments 15
3. Application de GAMELag à l'étang de Campignol 18
3.1. Définition de la lagune et interfaces 18
3.2. Données de forçage 18
3.2.1 Bassin versant 19
3.2.2 Milieu marin 22
3.2.3 Atmosphère 23
4 Construction d'une Situation Repère 25
4.1. Validation du fonctionnement hydrologique de la lagune 25
4.2. Comparaison statistique mesure/modèle 27
4.3. Validation des processus biochimiques internes. 28
4.4. Dynamique saisonnière 31
4.4.1. Dynamique hivernale 31
4.4.2. Dynamique printanière 32
4.4.3. Dynamique estivale 33
4.4.4. Dynamique automnale 34
5. Scénarisation 36
5.1. Scenario théorique : sans apport de nutriments du bassin versant 36
5.2. Définition de scénarios de gestion 37
5.3. Dynamique annuelle des compartiments biogéochimiques. 40
5.3.1. Azote 40
5.3.2. Phosphore 42
5.3.3. Compartiments biologiques 44
6. Scenario de gestion envisagé à court terme : « Epuration par marais périphériques » 46

6.1. Dynamique saisonnière 47
6.1.1. Dynamique hivernale 47
6.1.2. Dynamique printanière 48
6.1.3. Dynamique estivale 48
6.1.4. Dynamique automnale 49
6.2. Réflexion autour des indicateurs DCE 50
7. Perspectives et conclusions 53
Références 54
Annexes 56

Glossaire

Abréviation	Signification	Définition / Sens dans le contexte du rapport
ASA	Association Syndicale Autorisée	Groupement légal de propriétaires pour la gestion collective de l'eau ou d'ouvrages d'aménagement.
AE	Agence de l'Eau Rhône-Méditerranée-Corse	Établissement public chargé de la gestion intégrée de l'eau sur le bassin Rhône-Méditerranée-Corse, partenaire du projet GAMELag.
BV	Bassin versant	Zone géographique délimitée où toutes les eaux de pluie et cours d'eau s'écoulent vers un point commun, tel qu'une rivière, un lac ou une lagune.
CHLA (ou CHLORO A)	Chlorophylle a	Pigment photosynthétique quantifié pour évaluer la biomasse du phytoplancton et l'état trophique de la lagune.
DIN	Dissolved Inorganic Nitrogen / Azote Minéral Dissous	Formes minérales dissoutes de l'azote : ammonium (NH_4^+), nitrate (NO_3^-), nitrite (NO_2^-).
DON	Dissolved Organic Nitrogen / Azote Organique Dissous	Azote sous forme organique dissoute dans l'eau.
DOP	Dissolved Organic Phosphorus / Phosphore Organique Dissous	Phosphore sous forme organique dissoute dans l'eau.
GAMELag	Modèle d'Aide à la Gestion des Aménagements sur les Milieux Eutrophisés Lagunaires	Outil de modélisation dynamique pour appuyer la gestion écologique des lagunes eutrophisées, développé par Ifremer et partenaires.
HYDRIAD	Nom de fournisseur de données hydrologiques / monitoring	Bureau d'études responsable du suivi hydrologique et de l'apport de données pour la modélisation.
Ifremer	Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la Mer	Établissement public de recherche océanographique français, partenaire dans le développement de GAMELag.
Mol	Mole (quantité de matière)	Unité du Système international pour mesurer la quantité de matière correspondant à 6.022×10^{23} entités élémentaires (atomes, molécules, ions, etc.). Utilisée notamment dans les calculs de concentrations chimiques et flux de nutriments dans les écosystèmes.

Abréviation	Signification	Définition / Sens dans le contexte du rapport
N ou Azote	Nitrogène	Nutriment clé impliqué dans les phénomènes d'eutrophisation.
NH_4^+	Ammonium	Forme minérale de l'azote issue de processus biologiques ou activités humaines.
NO_3^-	Nitrate	Forme minérale d'azote, principal nutriment d'origine agricole ou urbaine.
NT	Azote total	Ensemble de l'azote, toutes formes confondues (minérales et organiques).
OBSLAG	Observatoire des lagunes méditerranéennes	Réseau d'observation des lagunes méditerranéennes françaises, dédié au suivi écologique et à l'évaluation des impacts environnementaux, notamment l'eutrophisation et la contamination.
P ou Phosphore	Phosphore	Nutriment clé impliqué dans les phénomènes d'eutrophisation.
PO_4^{3-}	Orthophosphate	Forme minérale du phosphore dissous, biodisponible et impliquée dans la production primaire.
POP	Particulate Organic Phosphorus / Phosphore Organique Particulaire	Phosphore sous forme organique particulaire dans l'eau.
PON	Particulate Organic Nitrogen / Azote Organique Particulaire	Azote sous forme organique particulaire dans l'eau.
PNR Narbonnaise	Parc Naturel Régional de la Narbonnaise en Méditerranée	Aire protégée française visant à préserver les patrimoines naturel, culturel et paysager de la zone littorale et lagunaire autour de Narbonne, impliquée dans la gestion durable des milieux lagunaires.
PT	Phosphore total	Ensemble du phosphore, toutes formes confondues (minérales + organiques).
PSU	Practical Salinity Unit (Unité Pratique de Salinité)	Unité normalisée pour mesurer la salinité de l'eau.
Ramsar	Convention Ramsar	Convention internationale de 1971 à Ramsar (Iran) pour la protection, gestion durable et coopération autour des zones humides d'importance internationale.

Abréviation	Signification	Définition / Sens dans le contexte du rapport
RSL	Réseau de Suivi Lagunaire	Programme ou dispositif de suivi environnemental dédié à la surveillance des paramètres physico-chimiques, biologiques et hydrologiques des lagunes.
SAGE	Schéma d'Aménagement et de Gestion des Eaux	Dispositif réglementaire de gestion locale de l'eau en France.
SDAGE	Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux	Planification à l'échelle de grands bassins hydrographiques en France.
TdV	Tour du Valat	Fondation reconnue pour la conservation des zones humides méditerranéennes, partenaire impliqué dans le développement de GAMELag.

1. Contexte de l'étude : milieux lagunaires et eutrophisation

Les lagunes sont des étendues d'eau peu profondes, localisées en bout de bassin versant et qui présentent des communications plus ou moins directes avec la mer via des « graus », ouvrages hydrauliques, réseaux de canaux ou d'autres lagunes. Ces écosystèmes côtiers particulièrement présents le long du littoral méditerranéen français (80 340 ha, Barral et al. 2007), sont malheureusement confrontés à un certain nombre de pressions anthropiques favorisant des phénomènes d'**eutrophisation**. Ce processus, caractérisé par un enrichissement excessif en nutriments, principalement l'azote et le phosphore, entraîne une prolifération de micro et macroalgues et des plantes aquatiques flottantes ou submergées comme le *potamogeton spp.* ou *lemna spp.,* qui peuvent résister à des niveaux élevés de nutriments. Dans le contexte méditerranéen, l'eutrophisation des lagunes est fortement dépendante de l'agriculture intensive et l'urbanisation croissante des bassins versants ainsi que des rejets d'eaux usées insuffisamment traitées par le passé. L'occurrence et l'intensité de ces phénomènes menacent gravement l'équilibre écologique de ces milieux uniques, affectant la biodiversité et la qualité de l'eau, révélant des défis majeurs pour la gestion durable de ces écosystèmes fragiles.

1.1. Typologie des lagunes

Les lagunes méditerranéennes présentent une diversité de configurations : certaines sont confinées, d'autres sont interconnectées entre elles, et quelques-unes sont reliées artificiellement à la mer. La salinité de ces masses d'eau est fortement influencée par plusieurs facteurs : leur degré de connectivité avec la mer, la taille de leur bassin versant, et les conditions climatiques locales (notamment les précipitations et les vents). En conséquence, ces lagunes connaissent des fluctuations importantes de salinité, qui varient dans le temps et selon la morphologie spécifique de chaque lagune (Menu et al. 2019). Cette variabilité permet de définir différents types de lagune en fonction de leurs caractéristiques hydrologiques et de leur régime de salinité :

- oligohalines dont la salinité moyenne annuelle varie entre 0,5 et 5 PSU ;
- mésohalines dont la salinité moyenne annuelle varie entre 5 et 18 PSU ;
- polyhalines dont la salinité moyenne annuelle varie entre 18 et 30 PSU ;
- euhalines dont la salinité moyenne annuelle varie entre 30 et 40 PSU.

Ces différences de salinité influencent les habitats présents au sein de chaque lagune et de ce fait les communautés de macrophytes et phytoplanctons, indicateurs de la qualité écologique du milieu (Menu et al. 2019).

1.2. Etats des lagunes oligo-mésohalines vis-à-vis de l'eutrophisation

Sur l'ensemble des lagunes méditerranéennes françaises, 28 d'entre elles font l'objet d'un suivi réglementaire établi par la DCE (Directive Cadre sur l'Eau 2000/60/CE du 23 octobre 2000). Parmi ces masses d'eau, 9 lagunes oligo-mésohalines sont concernées (Figure 1), et selon le rapport le plus récent, ces lagunes présentent toutes un mauvais état écologique (Boutron et al. 2022).

Les méthodes d'évaluation de l'état écologique des lagunes oligo-mésohalines ont connu une amélioration significative, comme en témoigne l'Arrêté du 9 octobre 2023 (NOR :

TREL2325808A). Ces nouvelles grilles d'évaluation offrent désormais une plus grande pertinence et fiabilité dans l'analyse de ces écosystèmes complexes.

Concernant l'état écologique de ces lagunes oligo-mésohalines, aucune amélioration notable n'a été constatée depuis 2013. Les paramètres déclassants varient selon les masses d'eau, mais dans l'ensemble, les indicateurs physico-chimiques révèlent une situation préoccupante. Les concentrations d'azote inorganique dissous (NID), de phosphates (PO_4^{3-}), d'azote total (NT) et de phosphore total (PT) dans la colonne d'eau atteignent fréquemment des niveaux qualifiés de "mauvais", indiquant une eutrophisation prononcée de ces milieux.

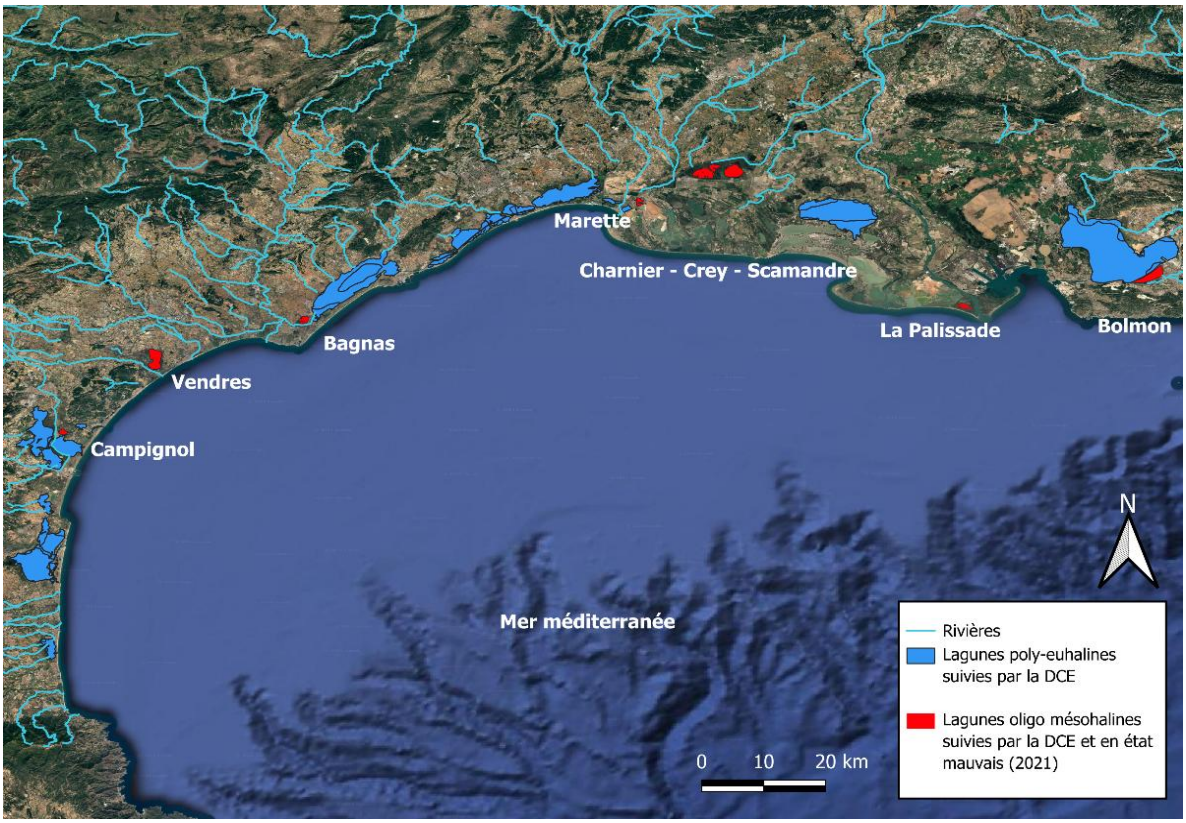


Figure 1 Masses d'eau oligo-mésohalines suivies au titre de la DCE sur la façade méditerranéenne et leurs états DCE 2021.

1.3. Démarche d'évaluation des flux admissibles en nutriments par les lagunes

Comme pour les lagunes poly-euhalines, l'inertie de restauration des lagunes oligo-mésohalines, peut être imputée à un passé d'eutrophisation intense et une charge en nutriments issue de leur bassin versant qui soutient encore actuellement cette eutrophisation (Derolez et al. 2019). Ces masses d'eau se localisent à l'aval de bassins versants fortement agricoles et sont les réceptacles de nombreux canaux d'irrigation. De plus, du fait de leur faible connexion voire de l'absence de connexion à la mer se sont des milieux fortement confinés.

Afin d'améliorer l'état vis-à-vis de l'eutrophisation de ces milieux, la démarche de connaissance des Flux Admissibles en nutriments, réalisée avec la contribution de l'Agence de l'Eau Rhône Méditerranée Corse (**AERMC**), la **Tour du Valat** et l'**Ifremer,** accompagne les gestionnaires pour affiner la compréhension du fonctionnement de leur lagune et réduire les charges en nutriments

issues du bassin versant. Cette démarche se base sur l'estimation de flux admissibles par une lagune ou un plan d'eau, correspondant à la charge polluante entrante en provenance de son bassin versant et parfois des canaux qui les traversent. Cette charge représente un seuil à ne pas dépasser pour que le milieu aquatique puisse fonctionner dans de bonnes conditions et que les divers usages puissent s'y exercer.

Ce flux admissible ne constitue pas pour autant un droit à polluer. Il s'agit avant tout d'un repère pour comprendre comment, et avec quelle ambition, agir sur les flux polluants, dans le cadre des plans d'actions mis en œuvre pour la restauration du bon fonctionnement et du bon état écologique de ces milieux emblématiques (HYDRIAD, 2022).

Selon les cas cette démarche peut s'accompagner de l'utilisation de l'outil de Gestion pour l'Aménagement des Milieux Eutrophisés Lagunaires (GAMELag) conçu spécifiquement pour les lagunes méditerranéennes par l'Ifremer avec le soutien de l'AERMC. Cet outil simule l'évolution des quantités d'azote et de phosphore stockées au sein des principaux compartiments de l'écosystème (sédiments, phytoplancton, macrophytes, colonne d'eau) en fonction des flux de nutriments apportés par les bassins versants et échangés (exportés et importés) avec la mer (Fiandrino et al. 2022). Cette étude se concentre sur l'étang de Campignol dont l'état vis-à-vis de l'eutrophisation est mauvais (Figure 1) et où la mobilisation des gestionnaires a permis de l'inscrire dans la démarche des flux admissibles avec l'outil GAMELag.

1.4. Etat écologique de l'étang de Campignol

L'étang de Campignol fait partie du complexe des étangs du narbonnais comprenant également les lagunes d'Ayrolle, de Bages-Sigean et de Gruissan. C'est une lagune oligo-mésohaline dont l'état écologique est documenté depuis 2001 par le réseau de suivi lagunaire régional (RSL), et depuis 2013 dans le cadre de la DCE.

Cette lagune, comme bon nombre de lagune oligo-mésohalines, est un milieu historiquement eutrophisé (Guillemot et al. 2021). Dès le début de son suivi dans le cadre du RSL, les concentrations en nutriments mesurées dans la colonne d'eau ainsi que les indicateurs du phytoplancton présentaient des niveaux "mauvais" (Ifremer 2014). Actuellement l'étang de Campignol présente toujours un état « mauvais » vis-à-vis des paramètres physico-chimie mais « médiocre » vis-à-vis des paramètres du phytoplancton et « moyen » vis-à-vis des indicateurs macrophytes (Figure 2) (Boutron et al. 2022). Les concentrations en nutriments se sont améliorées au cours du temps pour les paramètres phosphate (PO_4^{3-}), azote total (NT) et phosphore total (PT) mais les niveaux en azote inorganique dissous (NID) sont encore quatre fois au-dessus des seuils « bon » (Boutron et al. 2022).

Les indicateurs liés au phytoplancton ont également montré des signes d'amélioration mais cette évolution s'est révélée plus lente et irrégulière comparée à celle des nutriments (Ifremer 2014). Cet enrichissement en NID ne permet pas le rétablissement d'un équilibre écologique et la diminution de la biomasse de phytoplancton en période printanière et estivale ; conditions nécessaires à l'installation de communauté de macrophytes de référence. Les espèces de macrophytes les plus présentes sont d'ailleurs les espèces de macroalgues vertes (Boutron et al. 2022) notamment du genre *Chaetomorpha* qui sont des espèces opportunistes, tolérantes à une eutrophisation soutenue du milieu et aux eaux troubles (Lauret et al. 2011).

D'après le dernier suivi de 2010, les sédiments sont dans un état « moyen » indiquant une charge sédimentaire encore élevée en azote et phosphore particulaire, issue de l'eutrophisation historique (Figure 2). Cette charge est dépendante des conditions environnementales (ex :

température, épisode de vent) qui ponctuellement par des désoxygénations du sédiment et/ou une forte turbulence de la colonne d'eau, peut être remobilisée. Cette remobilisation peut soutenir des boucles de rétroactions biologiques entretenant l'eutrophisation du milieu.

Au niveau de la contamination chimique, liée aux concentrations en métaux lourds et pesticides, la colonne d'eau présentait un « Bon » état selon la dernière campagne de 2015. Néanmoins, les compartiments biotopes et sédiments n'ont pas été évalués et une étude prospective spécifique aux pesticides, réalisée au printemps 2010, indiquait que l'étang de Campignol faisait partie des lagunes les plus touchées par un cumul de plus de 37 pesticides (Munaron et al. 2013). Cette vulnérabilité est également soulignée dans le rapport OBSLAG 2017-2019 où l'étang de Campignol est présenté comme vecteur potentiel de pesticide pour la lagune d'Ayrolle qui reçoit ces eaux (Munaron et al. 2022).

	Etat Général (Mauvais) - 2021				
	Etat écologique (Mauvais) - 2021			Etat chimique (Bon) - 2015	
Compartiments	Physico-chimie	Phytoplancton	Macrophytes	Chimie eau	Chimie biote
Nombre stations	1	1	5	0	0
Etat grilles spécifiques / Etat DCE	Mauvais	Médiocre	Moyen	Bon	/
Tendances de l'état	→	→	↗	/	/

Programmes de suivis complémentaires

Compartiments	Nutriments dans les sédiments - 2010		Pesticides dans l'eau – 2017-2019	Chimie des sédiments - 2017
	Azote total	Phosphore total		
Nombre stations	4	4	0	0
Etat/niveau (hors DCE)	Moyen	Moyen	/	/
Tendance de l'état/niveau	→	→	/	/

Légende des tendances : ↘ Dégradation ; ↗ Amélioration ; → Stabilité ; « / » Inconnue.

Figure 2 Evaluation de l'état écologique et chimique des compartiments colonne d'eau (2021), sédiments (2010) et biote comprenant les macrophytes, invertébrés, phytoplancton (2015) (Guillemot et al. 2021)

1.5. Un site aux enjeux importants

L'étang de Campignol et ses zones humides périphériques sont situés sur la commune de Gruissan au sein du Parc naturel régional de La Narbonnaise en Méditerranée. Ce site est inclus au réseau européen Natura 2000 et est reconnu d'importance internationale au titre de la Convention de Ramsar. Cette zone humide couvre 722 ha dont 110 ha d'eau libre saumâtre (Figure 3) et fait l'objet de préconisations du Schéma d'Aménagement et de Gestion des Eaux de la basse vallée de l'Aude (SAGE BVA). De nombreux habitats d'intérêt communautaire (lagune côtière, fourrés halophiles, prés-salés méditerranéens) y sont présents et cet espace est un site privilégié pour l'avifaune. En plus de son fort intérêt écologique, l'étang de Campignol est le

support de plusieurs activités humaines : la pêche lagunaire professionnelle (notamment basée sur l'anguille) et la chasse au gibier d'eau.

Des dysfonctionnements connus et anciens

Cet étang connaît depuis plus d'une quarantaine d'années des dysfonctionnements multiples, notamment l'apport d'eau douce de qualité moyenne, en volumes importants à la période estivale où les lagunes n'en reçoivent naturellement que peu, et dont les conséquences principales sont les suivantes :

- Une inversion de la courbe temporelle de salinité des eaux de la lagune qui devraient être naturellement plus salées en été qu'en hiver, impliquant une perturbation des migrations de poissons vers la lagune et en amont (non-adéquation des apports d'eau douce avec les rythmes biologiques des poissons)
- Une mauvaise qualité écologique des eaux de la lagune, en particulier du point de vue de l'eutrophisation

Ces deux phénomènes, responsables du développement des massifs très imposants de « cascail », ver tubicole envahissant, entraînent des difficultés pour la circulation des bateaux de pêche. Plus globalement, la diminution des apports d'eau douce hivernaux et la déconnexion hydrologique des marais périphériques bouleversent les milieux naturels autour de la lagune en basculant les habitats doux (roselières) vers des milieux plus salés (sansouïres).

Des plans de gestion et gestionnaires qui se succèdent

Un premier plan de gestion a été rédigé par la Tour du Valat en 1996, et des travaux ont été entrepris dans le cadre du projet de Parc naturel régional de la Narbonnaise en Méditerranée. Mais, faute de gestionnaire unique clairement identifié, les investissements n'ont pas permis d'atteindre les objectifs fixés. En 2008, le Syndicat mixte du delta de l'Aude (SMDA) a missionné le bureau d'études BRL pour rédiger le plan de gestion de ce site. Le SMDA a assuré la mise en œuvre partielle des actions préconisées mais a rencontré des difficultés pour une gestion sereine des ouvrages, faute de gestionnaire d'ouvrages bien identifié. Avec le temps, une mise à jour du plan de gestion de 2008 est devenue nécessaire afin de mieux y intégrer les enjeux liés à la biodiversité, à la raréfaction de la ressource en eau, aux usages présents et aux changements climatiques en cours. En 2017, le Parc naturel régional de la Narbonnaise en Méditerranée, a repris la gestion du site et procède actuellement à la mise à jour du plan de gestion de 2008, ainsi qu'à sa mise en œuvre. Le plan de gestion de l'étang de Campignol et ses zones humides périphériques actuel a été finalisé et validé en comité de gestion en décembre 2023.

1.6. Les objectifs du plan de gestion

Les objectifs de ce nouveau plan de gestion visent à répondre aux menaces qui pèsent sur le site et aux enjeux identifiés. Les objectifs présentés ci-après ont été définis à la suite de plusieurs réunions de concertation :

- Améliorer la qualité de l'eau (nutriments, pesticides) à différentes échelles
  - Temporelle (à court, moyen et long terme)
  - Spatiale (dans la lagune et ses marais, dans la basse plaine de l'Aude et à l'échelle du bassin versant)
- Restaurer la saisonnalité des apports
  - Pour réduire l'eutrophisation du milieu
  - Pour répondre aux besoins de la pêche

- Pour redonner une saisonnalité favorable à la restauration de la lagune et à la préservation de l'anguille
- Pour apporter de l'eau au milieu lorsque la ressource est davantage disponible

• Préserver la biodiversité
- Les espèces phares (anguille, avifaune, chiroptères)
- La diversité des habitats (roselières et prés salés)

• Renforcer les connaissances
- Sur la qualité de l'eau
- Sur la biodiversité

• Améliorer la circulation de l'eau (à la fois dans la lagune et dans les marais périphériques)

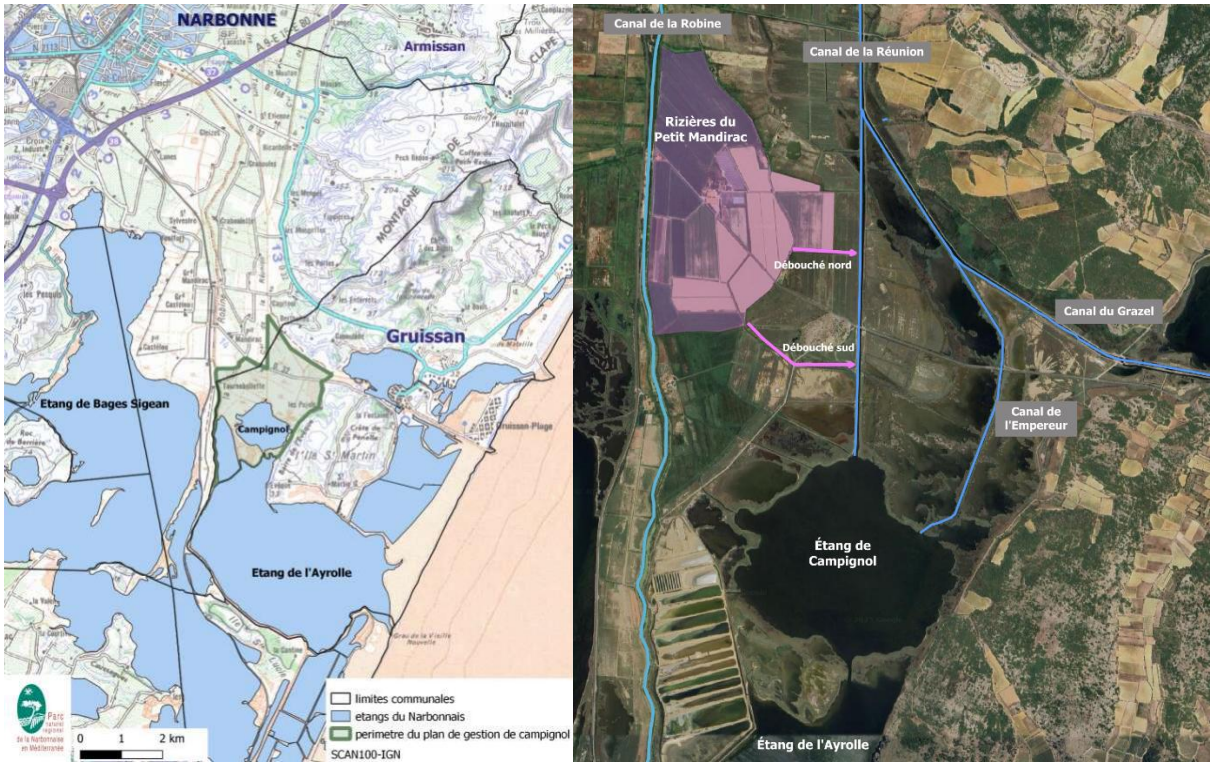


Figure 3 Périmètre du plan de gestion de l'étang de Campignol (à gauche) et localisation des réseaux de canaux principaux et rizières concernées dans cette étude (à droite).

A retenir :

- Les lagunes méditerranéennes, classées selon leur salinité et menacées par l'eutrophisation d'origine humaine, présentent souvent un mauvais état écologique nécessitant des actions de gestion ciblées.
- L'évaluation des flux admissibles en nutriments est une démarche clé pour aider les gestionnaires à la fois à comprendre et réduire la pollution aux nutriments des lagunes, et à restaurer ces écosystèmes.
- La lagune de Campignol, en état eutrophisé, fait l'objet d'un plan de gestion pour améliorer la qualité de l'eau, restaurer la saisonnalité des apports d'eau douce et préserver la biodiversité.

2. GAMELag, un outil d'accompagnement à la mission Flux Admissibles.

2.1. Objectif du modèle

L'objectif principal du modèle GAMELag est de servir d'outil d'analyse et d'aide à la décision pour comprendre et restaurer les écosystèmes lagunaires méditerranéens eutrophisés. Le modèle vise à répondre à des questions cruciales sur le fonctionnement écologique des lagunes, notamment déterminer les flux admissibles en azote et phosphore, et analyser le devenir de la matière dans l'écosystème lagunaire. Son développement répond à un besoin prégnant, car plus de 80% des masses d'eau lagunaires des bassins Rhône-Méditerranée et Corse ne sont pas en bon état écologique (Boutron et al. 2022).

Le modèle GAMELag permet également de réaliser des scénarios, ce qui constitue un atout majeur pour l'aide à la décision. Cette fonctionnalité permet de simuler différentes conditions environnementales ou interventions humaines et d'en évaluer les impacts potentiels sur l'écosystème lagunaire. Par exemple, il est possible de tester des scénarios de réduction des apports en nutriments du bassin versant, des modifications de la saisonnalité de ces apports ou encore des modifications d'échanges avec la mer. Cette capacité à explorer divers scénarios aide les gestionnaires à anticiper les effets de différentes stratégies de gestion et à choisir les actions les plus efficaces pour la restauration et la préservation des lagunes méditerranéennes.

2.2. Structure du modèle

La structure du modèle GAMELag repose sur une conceptualisation de la lagune en "boîtes physiques" et "compartiments biogéochimiques" (Figure 4). Cette approche permet de simuler les processus physiques et biogéochimiques entre les principaux compartiments de l'écosystème lagunaire. Le modèle prend en compte les interfaces cruciales qui sont le bassin versant, l'atmosphère et le milieu marin (Figure 4). Le milieu marin est la seule interface où l'interaction est bidirectionnelle, puisqu'il constitue l'exutoire de la lagune (sortie d'eau saumâtre et de matière) et l'alimente en eau marine et en matière (entrée). Cette structure modulaire permet d'adapter le modèle à différentes lagunes méditerranéennes, comme cela a été fait pour la lagune de Bages-Sigean et la lagune de l'Or (Fiandrino et al. 2022)

Plus précisément, GAMELag décrit l'évolution des stocks d'azote et de phosphore au sein des compartiments clés que sont la colonne d'eau, le phytoplancton, le zooplancton, les macrophytes et les sédiments superficiels (Figure 4). Ces stocks évoluent selon différentes fonctions qui contrôlent l'assimilation des charges entrantes par les organismes vivants, les échanges de matière entre les différents compartiments, le stockage et/ou le relargage sédimentaire, l'export de matière vers le milieu extérieur.

Pour déployer le modèle sur une lagune spécifique, il faut définir :

- Le nombre de boîtes représentant la lagune
- Les forçages hydrologiques aux interfaces (apports du bassin versant, échanges avec la mer, etc.)
- Les forçages biogéochimiques (concentrations initiales, paramètres biologiques, etc.)

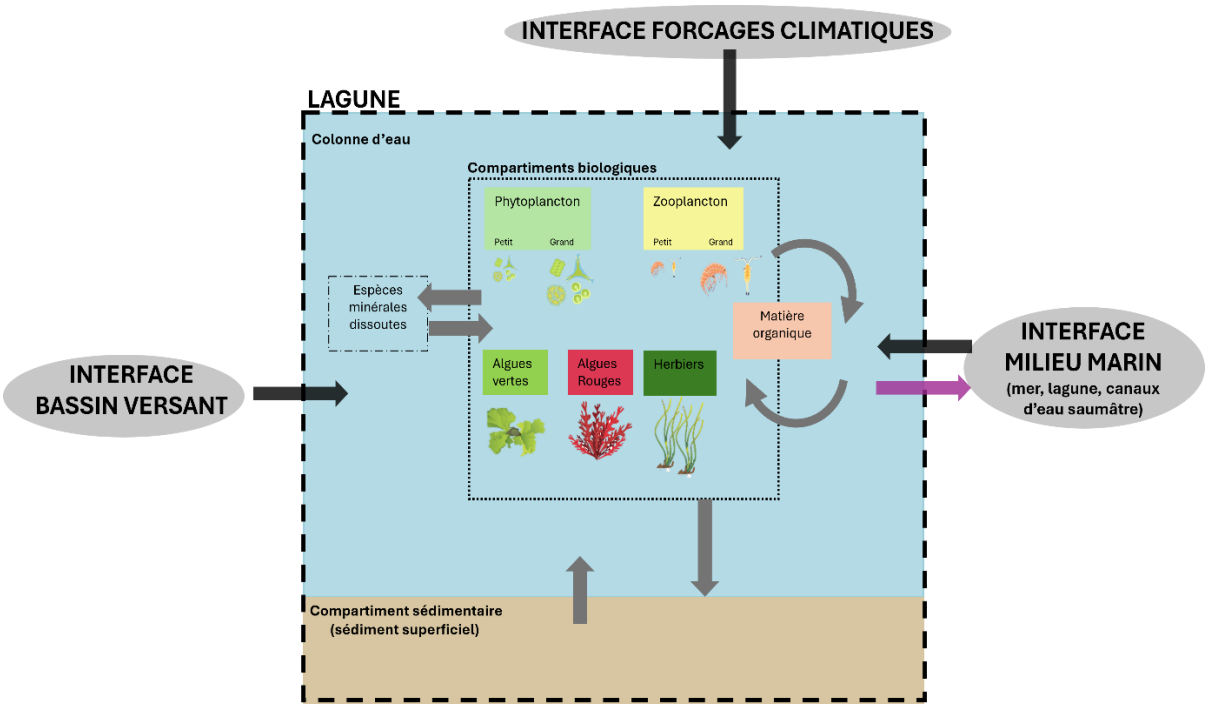
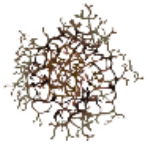


Figure 4 Interfaces et compartiments biogéochimiques de la boîte lagune du modèle GAMELag. Les flèches représentant les flux entrants (noires), sortants (violettes) et entre les compartiments (grises).

L'outil GAMELag initialement développé dans le cadre d'une collaboration entre l'Ifremer et l'Agence de l'Eau RMC pour les lagunes poly-euhalines (Fiandrino et al. 2022), a été récemment adapté aux lagunes oligo-mésohalines dans le cadre de la mission Flux Admissibles (Martinez-Espinosa et al. 2023). Cette adaptation a consisté à modifier (1) l'espèce de référence des herbiers, qui était à l'origine *Zostera noltii* en *Ruppia cirrhosa*, *Zostera noltii* n'étant pas présente dans les lagunes oligo-mésohalines et (2) les interactions de cette nouvelle espèce avec les autres macrophytes en termes de compétition. De même que les paramètres définissant le groupe des algues opportunistes ont été entièrement définis avec les caractéristiques du genre *ulves*, certains paramètres correspondant au genre *chaetomorpha* ont été utilisés spécifiquement pour le cas des lagunes oligo-mésohalines (Tableau 1).

Malgré sa puissance, le modèle présente des limites, notamment dans la modélisation des compartiments "Macrophytes" et "Sédiments". Son développement se poursuit en continu pour améliorer ces aspects, conscients que la précision du modèle conditionne sa capacité à répondre aux enjeux de restauration écologique. Les perspectives d'amélioration visent à affiner la compréhension des processus de stockage et de relargage des nutriments, élément clé pour comprendre la dynamique de l'eutrophisation dans ces écosystèmes sensibles.

Tableau 1 Espèces références des compartiments macrophytes de la version GAMELag-Oligo-mésohaline.

MACROPHYTES	
Variable d'état	**Description**
Algues vertes : **Chaetomorpha et Ulva** 	Les macroalgues du genre *Chaetomorpha* qui sont assez tolérantes à une eutrophisation soutenue du milieu et aux eaux troubles (Veraart et al. 2004; Lauret et al. 2011), et les *Ulves* qui sont des macroalgues vertes nitrophiles dont l'abondance élevée est indicatrice d'une augmentation des teneurs en nutriments et donc de l'eutrophisation du milieu (Sfriso et al. 2007; Sfriso et al. 2009; Orfanidis et al. 2011; Lauret et al. 2011).
Algues rouges : **Gracilarias** 	Ces espèces, qui résistent à une certaine turbidité et un certain degré d'eutrophisation du milieu, ne sont cependant pas capables de surmonter une dégradation continue et poussée de celui-ci (Sfriso et al. 2007; Sfriso et al. 2009; Orfanidis et al. 2011; Lauret et al. 2011). Les macroalgues rouges sont assez souvent des espèces compagnes des herbiers dans les lagunes méso-halines et elles sont considérées plus sensibles à l'eutrophisation du milieu que les macroalgues vertes (Sfriso et al. 2007; Sfriso et al. 2009; Orfanidis et al. 2011).
Herbiers : **Ruppia** 	*Ruppia cirrhosa* est, parmi les angiospermes potentiellement présentes dans ces lagunes peu saumâtres, la plus sensible à l'eutrophisation du milieu et à la turbidité (Orfanidis et al. 2011). Cette faible tolérance s'explique par la position de son appareil photosynthétique qui reste proche du substrat (ne pouvant s'allonger jusqu'à la surface de l'eau comme le font d'autres angiospermes telles que *Stuckenia pectinata*).

2.3. Interactions entre les compartiments

Au sein de la lagune, le modèle GAMELag permet de reproduire l'évolution des stocks d'azote et de phosphore à partir de variables d'état (Annexe 1, Tableau A.1.) dans tous les compartiments (Figure 5). Ces interactions sont calculées à l'échelle de temps journalière pour les processus physiques et à l'échelle de temps infra horaire (à minima toutes les 10 minutes) pour les processus biologiques.

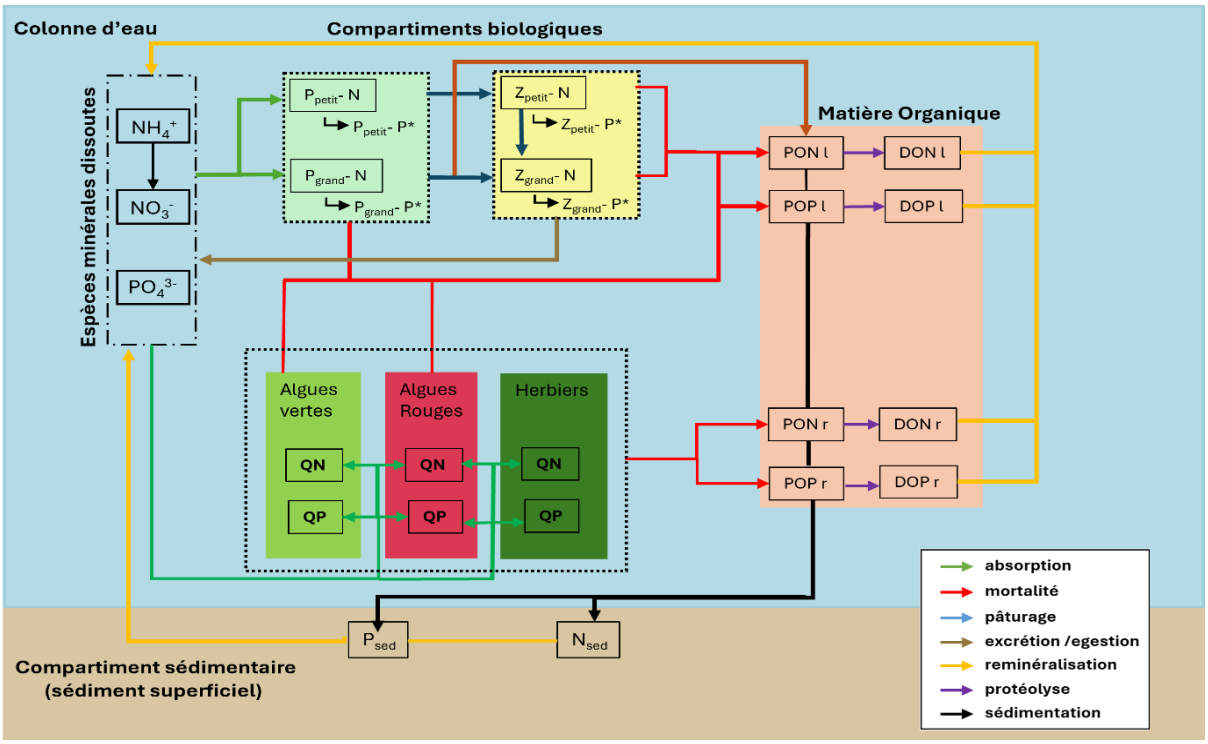


Figure 5 Variables d'état du modèle biogéochimique GAMELag et leurs interactions

Tableau 2 Ensemble des processus physiques et biogéochimiques se produisant entre les différents compartiments, pris en compte dans le modèle GAMELag.

Processus	Description
Absorption	Défini par un nombre fini de sites (n) que possède une cellule et où les ions nutritifs rencontrés peuvent être manipulés. Chaque site occupe une surface finie (A) de la membrane où la capture d'ions est possible. Par conséquent, le produit (n x A), qui peut varier, correspond à la surface totale de la membrane où la rencontre d'ions peut conduire à une absorption.
Mortalité	Défini par différentes fonctions liées au broutage, dans le cas du plancton, ou aux changements saisonniers (température), à la disponibilité des nutriments et à la concurrence.
Pâturage	Fait référence à l'effet du zooplancton de grande taille sur le phytoplancton (petit et grand) et le zooplancton de petite taille.
Egestion/ Excrétion	Rejet des matières non digérées par le zooplancton après s'être nourri.
Reminéralisation	Désigne la décomposition ou la transformation de la matière organique en formes inorganiques les plus simples. Ces transformations constituent un lien crucial au sein des écosystèmes car elles sont responsables de la libération de l'énergie stockée dans les molécules organiques et du recyclage de la matière au sein du système pour qu'elle soit réutilisée comme nutriments par d'autres organismes.
Protéolyse	Correspond à la segmentation des protéines en ses fragments de base (acides aminés) dans la biodégradation
Sédimentation	Correspond au processus par lequel les solides en suspension sont décantés au fond de la colonne d'eau et intégrés à la couche superficielle des sédiments.

A retenir :

- Sensibilité à la paramétrisation : Le modèle est sensible aux valeurs des paramètres utilisés, ce qui nécessite une calibration soigneuse pour chaque site d'application.
- Validation site-spécifique : La capacité du modèle à atteindre les objectifs fixés doit être confirmée pour chaque nouveau site d'application, ce qui requiert des données de terrain suffisantes et de qualité.
- Incertitudes sur les sorties du modèle : Comme tout modèle, GAMELag produit des résultats avec un certain degré d'incertitude qu'il est important de quantifier et de communiquer.

Pour en savoir plus consulter : Fiandrino et al. 2022.

3. Application de GAMELag à l'étang de Campignol

3.1. Définition de la lagune et interfaces

L'étang de Campignol est modélisé comme une boîte physique unique dont le volume est supposé constant à 576 410 m^3 et la profondeur moyenne de 0.6 m (Figure 6).

Parmi les trois interfaces génériques prises en compte dans le modèle, certaines interfaces peuvent êtres spécifiques à certaines lagunes. Dans le cas de GAMELag-Campignol, le bassin versant est divisé en écoulement de surface et souterrain, et le milieu marin est défini par la lagune d'Ayrolle (Figure 6).

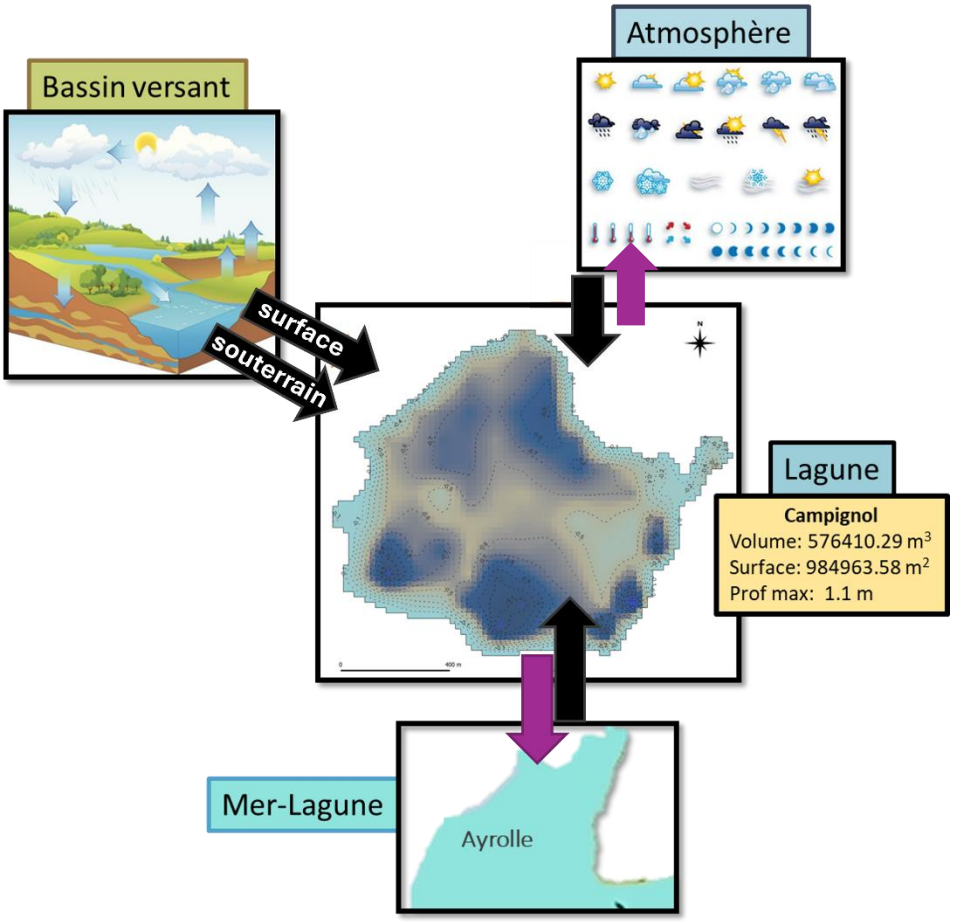


Figure 6 Représentation des trois interfaces définies pour l'établissement de GAMELag (bassin versant, atmosphère et milieu marin) qui interagissent par des apports (flèches noires) et des exports (flèche violette) avec l'étang de Campignol, représenté par la boîte unique.

3.2. Données de forçage

Dans chaque site d'étude où GAMELag doit être appliqué, l'inventaire de tous les apports d'eau et de matière présents dans le bassin et susceptibles de se déverser dans la lagune, est nécessaire afin de savoir quelles données sont disponibles et lesquelles sont manquantes. Si toutes les données ne sont pas à disposition pour tous les affluents, le niveau d'incertitude du modèle sera déterminé en fonction de ce manque.

En règle générale, trois types de données (Tableau 3) sont nécessaires pour décrire les interactions de l'interface avec la lagune pour chaque étude. Ces données doivent couvrir au moins une année hydrologique et les interfaces principales sont définies en fonction.

Tableau 3 Ensemble des données utilisées pour définir les forçages et la situation repère de l'étang de Campignol

Type	Donnes	Fréquence	Source
Hydro physique	Débit, salinité et température	10 minutes	Données de terrain HYDRIAD
Nutriments	Formes minérales dissoutes (NH_4^+, NO_3^-, PO_4^{3-}) Organiques dissoutes (DON, DOP) et particulaires (PON et POP)	Mensuelle ou ponctuelle en cas de crue	Données de terrain HYDRIAD et Suivie DCE
Météo	Précipitation, Evaporation, Température de l'air, Humidité de l'air, Vitesse du vent et Rayonnement global.	Horaire et journalière	Stations Météo France Leucate, Narbonne, Perpignan

Dans le cas de l'étang de Campignol une campagne de terrain a été réalisée d'octobre 2020 à avril 2022, couvrant plus d'une année hydrologique. Cette étude de terrain a été réalisée par le bureau d'études HYDRIAD, dans le cadre de la mission Flux Admissible Phase I (HYDRIAD 2022).

La période analysée comprend deux phases « anormales » : une période de sécheresse extrême d'octobre 2020 à septembre 2021, suivie de six mois marqués par des conditions anormalement humides. Il en résulte qu'aucune condition hydrologique « normale » n'a été observée durant cet intervalle.

Par la suite les données ponctuelles sont lissées pour extrapoler la dynamique saisonnière de chaque interface, en prenant en compte une variabilité environnementale inhérente.

3.2.1 Bassin versant

L'interface Bassin versant définit le flux d'eau chargé en nutriments qui atteint la lagune et qui est issu de toutes les activités qui ont lieu sur le périmètre du bassin versant. Cette interface concentre donc un ensemble d'apports (1) de surface et (2) souterrains. Les concentrations de ces apports dépendent directement de l'occupation du sol sur le bassin versant (e.g. forte anthropisation, agriculture, sites miniers). Selon le type de pollution et leur localisation par rapport à l'embouchure, ces apports pourront ou non être épurés avant d'atteindre la lagune.

Les apports de surface

Canal de la Réunion : correspond au principal apport d'eau douce de surface à la lagune. Son débit est dépendant de la mise en œuvre de la Convention Raonel (ANNEXE 3), des ressuyages agricoles et des précipitations qui se produisent en amont. Deux épisodes de crues où les volumes d'eau entrant ont dépassé 100 000 m^3 ont été interceptés au cours du suivi (Figure 7A). Ces apports d'eau importants aux mois de novembre-décembre et mars-avril correspondent au régime pluviométrique classiquement observé en région méditerranéenne avec de forts cumuls de pluie en automne et au printemps (Drobinski et al. 2014). Parallèlement les apports en nutriments au sein de la lagune suivent également les épisodes de crues, les concentrations en

NO_3^-, PO_4^{3-}, DON, DOP présentent des pics lors de la crue de fin novembre 2021 (Figures 7B, D, E, F), seul le NH_4^+ ne semble pas suivre cette dynamique et présente un pic de concentration deux mois avant les épisodes pluvieux (Figure 7C).

En ce qui concerne la gestion, le canal de la Robine prévoit une période de chômage de deux mois, qui, par convention, a été établie à partir du 1er janvier. Cette organisation est effectivement en vigueur depuis 2023, impliquant ainsi un arrêt en janvier-février. Toutefois, lors de l'établissement du scénario repère en 2020-2022, le chômage avait lieu en novembre-décembre, période durant laquelle les volumes envoyés par la convention Raonel avaient ensuite repris à partir de fin janvier. Le fonctionnement du canal de la Robine exerce ainsi une forte influence sur les flux dans le canal de la Réunion.

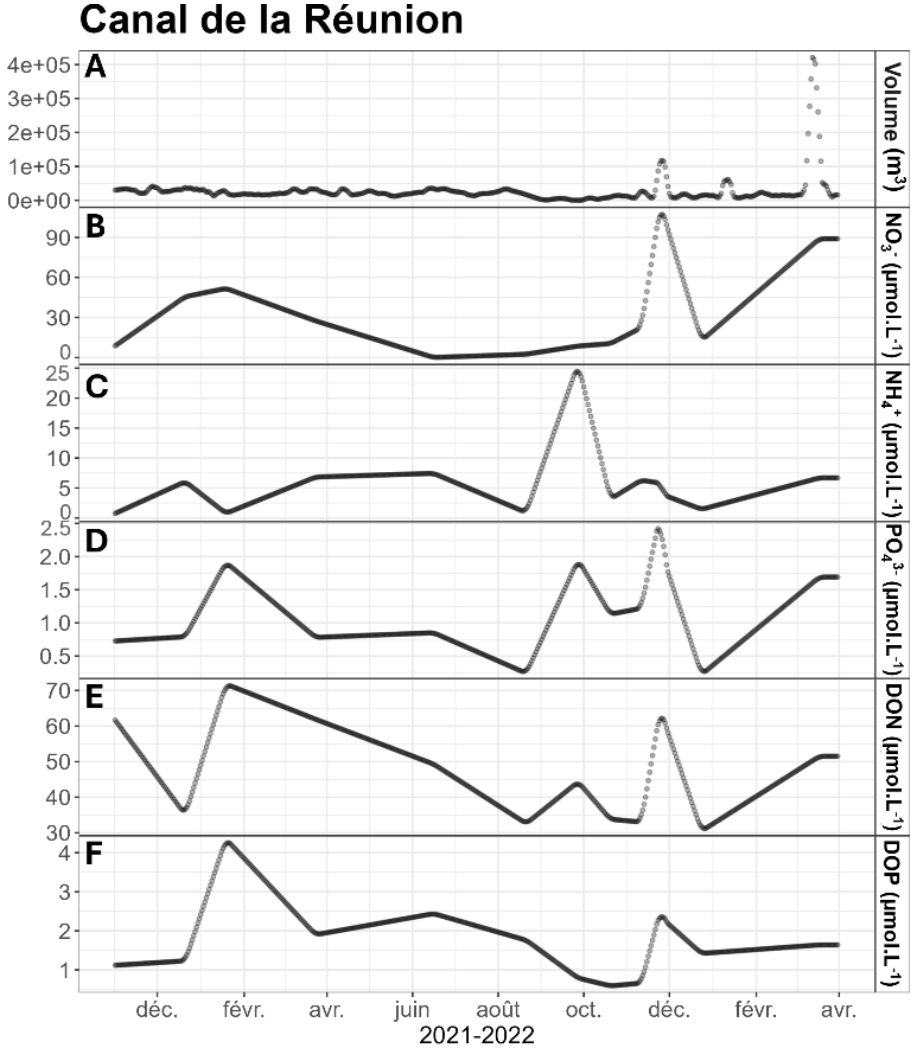


Figure 7. Séries temporelles du volume d'eau journalier atteignant l'étang de Campignol via le canal de la Réunion (A) ainsi que les flux de nutriments entrants, calculés à l'échelle journalière en nitrate (NO_3^-) (B), en ammonium (NH_4^+) (C), en phosphate (PO_4^{3-}) (D), en azote organique dissous (DON) (E) et en phosphore organique dissous (DOP) (F).

Sorties d'eau des rizières : Il existe plusieurs parcelles à la périphérie de l'étang de Campignol, dont la plupart se rejettent au sud du roc de Conhilac. Sauf les deux parcelles de rizières au nord de la lagune : rizière Sud et Nord (Figure 3), dont les flux sont discontinus (dépendants des pratiques agricoles) ont été quantifiés. Les rejets de la rizière Sud, les plus utilisés ces dernières années, sont ceux qui ont été suivis par l'instrumentation de terrain et pris en compte comme

une source de surface supplémentaire aux volumes venant du canal de la Réunion. Avec le canal de la Réunion, ces deux apports superficiels composent l'interface bassin versant du modèle. Les apports d'eau se sont concentrés en période estivale jusqu'à la mi-automne (Figure 8A) et les concentrations en NO_3^- présentent deux pics, un en début d'été (mi-juin) et un à la fin de l'automne. Les concentrations en NH_4^+ présentent un pic au début de l'automne (octobre) (Figure 8C) et pour les concentrations en PO_4^{3-}, DON, DOP un pic est visible à la fin de l'automne un peu avant le pic de NO_3^- (Figures 8B, D, E, F).

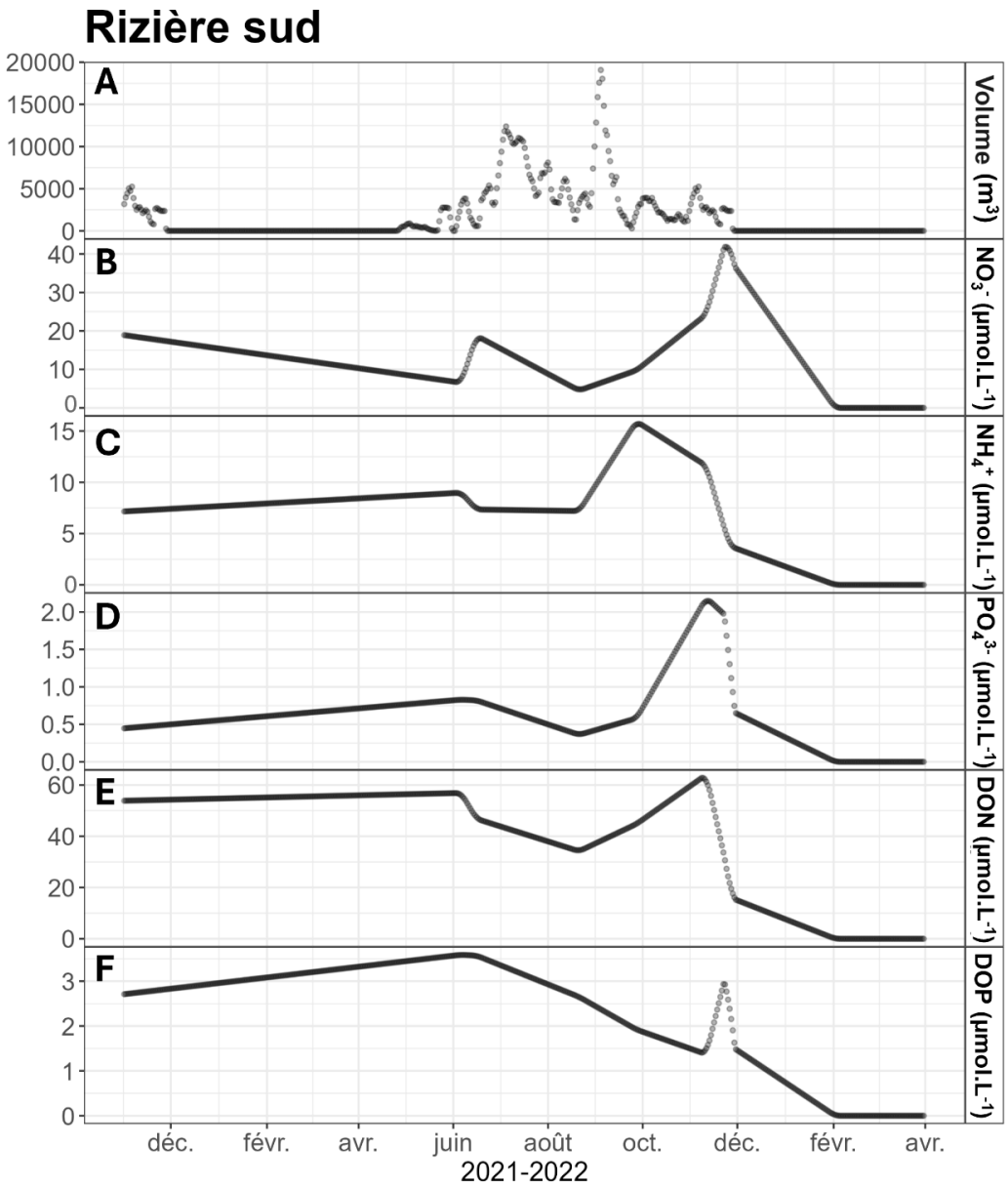


Figure 8 Séries temporelles du volume d'eau journalier atteignant l'étang de Campignol via les rizières sud (A), ainsi que les flux de nutriments entrants, simulés à l'échelle journalière en nitrate (NO_3^-) (B), en ammonium (NH_4^+) (C), en phosphate (PO_4^{3-}) (D), en azote organique dissous (DON) (E) et en phosphore organique dissous (DOP) (F).

Les apports souterrains

Les apports d'eau souterraine ont été modélisés en identifiant les sources potentielles d'apports et leur temporalité compte tenu du fonctionnement physique du bassin versant et des flux d'eau. De cette manière, quatre sources ont été identifiées : des fuites du canal de la Robine, des

infiltrations le long du canal de la Réunion, des résurgences naturelles et des résurgences boostées par les recharges des Associations Syndicales Autorisées ASAs (Figure 9). En termes de qualité, toutes les eaux souterraines ont été considérées comme ayant la même composition. Les quantités de NH_4^+ et de PO_4^{3-} ont été considérées comme négligeables et seul le NO_3^- a été pris en compte, à une concentration constante de 2 $mgN.L^{-1}$. Cette concentration a été définie sur la base de l'étude complémentaire menée par HYDRIAD (HYDRIAD 2023).

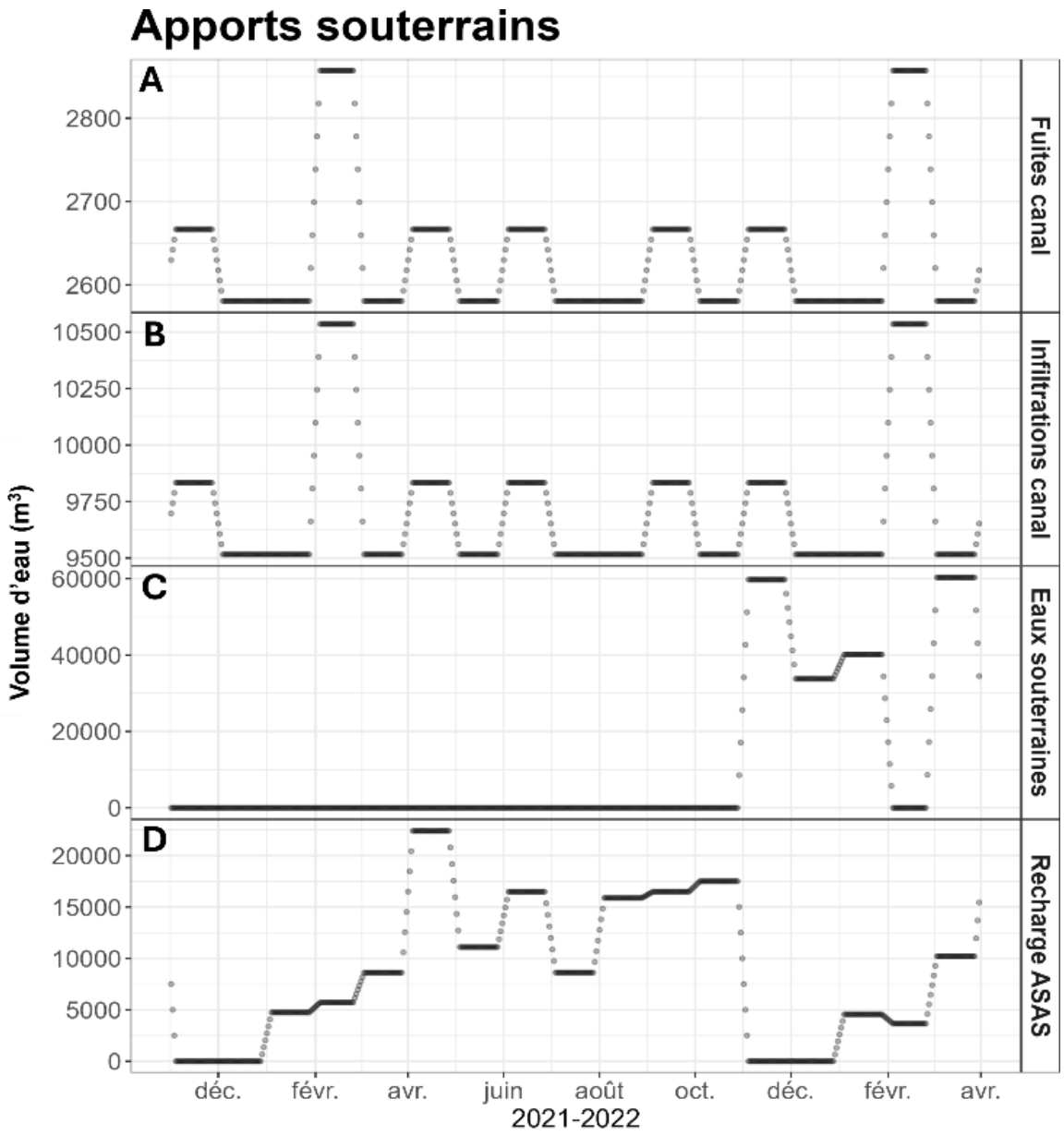


Figure 9. Séries temporelles du volume journalier d'eau atteignant l'étang de Campignol via les quatre sources souterraines.

3.2.2 Milieu marin

Dans le cas de l'étang de Campignol, l'échange avec la lagune d'Ayrolle constitue l'interface marine principale. Cette connexion régule les fluctuations de salinité dans l'étang de Campignol, influençant ainsi son équilibre hydrologique et écologique. S'il y a des périodes d'intrusion d'eau de mer, la salinité de la lagune augmente. En revanche, les précipitations et la quantité d'eau

provenant du bassin versant diminuent cette salinité. L'information obtenue à l'interface entre les deux lagunes (volumes d'eau journaliers entrants et sortants) permet de calculer le volume de mélange, celui-ci étant plus intense en périodes estivale et hivernale notamment lors de l'épisode de tempête de fin novembre 2021 (Figure 10A). L'apport en nutriment par la lagune d'Ayrolle est plus faible que l'apport par le bassin versant mais certains épisodes de pics non négligeables sont visibles pour les paramètres NO_3^- , NH_4^+, PO_4^{3-}, DON, fin novembre 2021 (Figures 10B, C, D, E) et courant janvier 2021 pour le NH_4^+ (Figure 10C).

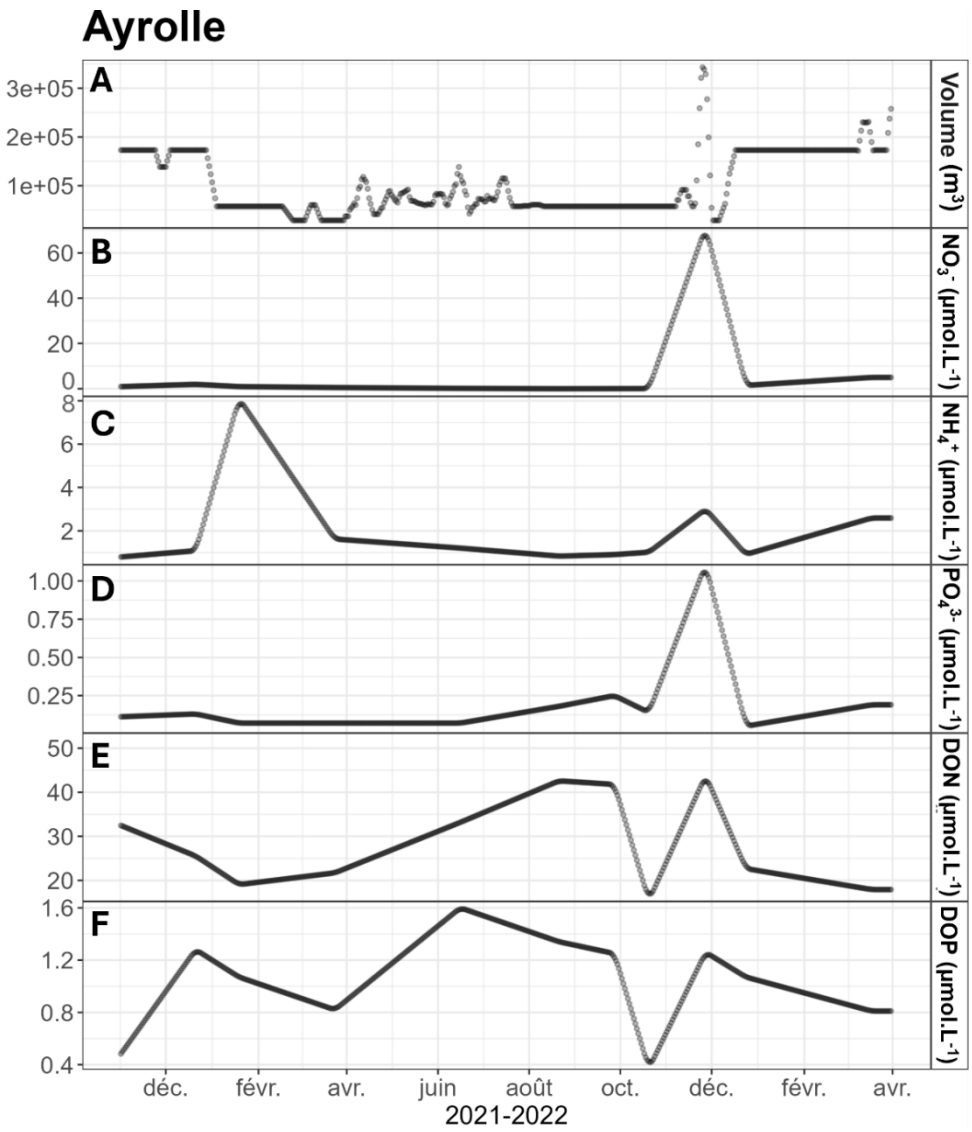


Figure 10. Séries temporelles du volume de mélange entre l'étang de Campignol via la lagune d'Ayrolle (A), ainsi que les concentrations dans l'étang de l'Ayrolle, interpolées à l'échelle journalière en nitrate (NO_3^-) (B), en ammonium (NH_4^+) (C), en phosphate (PO_4^{3-}) (D), en azote organique dissous (DON) (E) et en phosphore organique dissous (DOP) (F).

3.2.3 Atmosphère

L'ensemble des données météorologiques ont été obtenues par les stations Météo-France de Narbonne, Leucate et Perpignan les plus proches de l'étang de Campignol, à pas de temps horaire et journalier selon les paramètres. Cela permet d'estimer les flux d'eau et de chaleur entre la lagune et l'atmosphère essentiels pour comprendre son fonctionnement hydrologique et biogéochimique.

Pour les données de précipitations journalières (Figure 11A), un module intégré au modèle convertit ces valeurs en volumes d'eau précipités sur l'étang, en multipliant la hauteur de pluie par la surface de boîte physique qui représente la lagune. Les concentrations en azote dans l'eau de pluie sont estimées à partir de valeurs constantes. Ces valeurs sont basées sur une étude similaire réalisées sur l'étang de La Marette en 2009 (Derolez 2013)

L'évaporation journalière est calculée en utilisant la formule de Penman (1948). Cette formule prend en compte : La température de l'air (Figure 11B), la pression atmosphérique, l'humidité relative (Figure 11C), la vitesse du vent (Figure 11D) et le rayonnement global (Figure 11F).

Le rayonnement global (Figure 11F) joue aussi un rôle crucial dans la limitation de la croissance des algues, des herbiers et du phytoplancton. En l'absence de limitation par les nutriments, la photosynthèse augmente avec l'intensité lumineuse jusqu'à atteindre un taux de croissance maximal. Il est important de noter que la relation entre le rayonnement global et la croissance n'est pas toujours linéaire. Dans GAMELag la limitation par la lumière est prise en compte pour réguler la croissance des compartiments photosynthétiques.

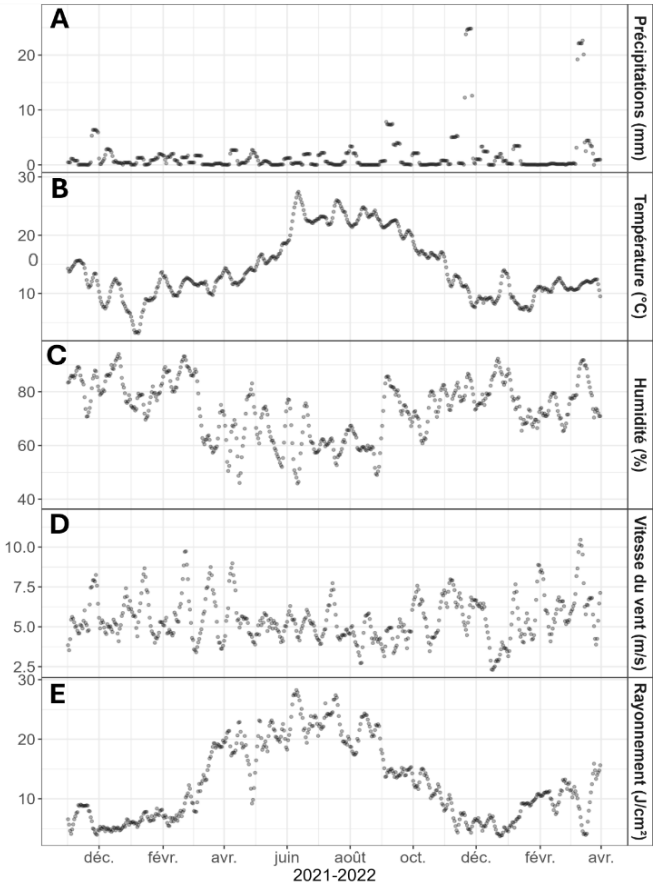


Figure 11. Données météorologiques journalières de la station Météo France de Narbonne, Leucate et Perpignan sur la période 2021-2022, (A) précipitations, (B) température de l'air, (C) humidité de l'air, (D) vitesse du vent et (E) rayonnement global.

4 Construction d'une Situation Repère

Dans le cadre de la démarche d'estimation des Flux Admissibles, la première étape de la modélisation consiste à définir et préciser une situation repère, qui représente la situation la plus réaliste possible sur une période donnée qui doit couvrir à minima une année hydrologique (de septembre à août).

Cette situation « repère » sert de base à la validation du modèle et à l'analyse de scénarios. En complément de forçages réalistes (i.e. dont les caractéristiques en termes de météorologie, de flux échangés avec la mer, apportés par le bassin versant et les eaux souterraines sont représentatifs des flux observés au cours des "dernières années"), des données sont nécessaires sur cette période « repère » dans la lagune afin de les comparer aux variables simulées par le modèle ([NID], [PO4], [NOD], [POD], [Chlo.a], Biomasses algales). Cette situation repère est ainsi une représentation de la lagune dans son état de gestion actuel, en termes d'hydrologie et de flux de nutriments où sont pris en compte les interactions avec les autres interfaces (i.e. Bassin Versant, Atmosphère et Milieu marin). Il faudrait préciser ici explicitement les dates de début et de fin de la période repère pour Campignol

4.1. Validation du fonctionnement hydrologique de la lagune

Après avoir consolidé les conditions de forçage, en s'appuyant sur des données de terrain relatives à la quantité et à la qualité d'eau entrant et sortant du système, l'étape suivante consiste à évaluer la capacité du modèle à représenter fidèlement le fonctionnement hydrologique actuel de la lagune.

Pour ce faire, la salinité simulée est comparée aux mesures *in situ* (Figure 12) sur la « période repère ». L'évolution de la salinité simulée est la résultante du mélange des eaux saumâtres de la lagune avec d'une part les eaux douces des bassins versants et d'autre part les eaux échangées (entrantes et sortantes) avec le milieu extérieur, dans le cas présent la lagune d'Ayrolle.

La dynamique de salinité mesurée dans l'étang de Campignol suit la même évolution temporelle que celle dans l'étang de l'Ayrolle (Figure 12), mais les salinités sont systématiquement plus faibles sur l'étang de Campignol indiquant l'influence des apports d'eaux douces dans cette lagune.

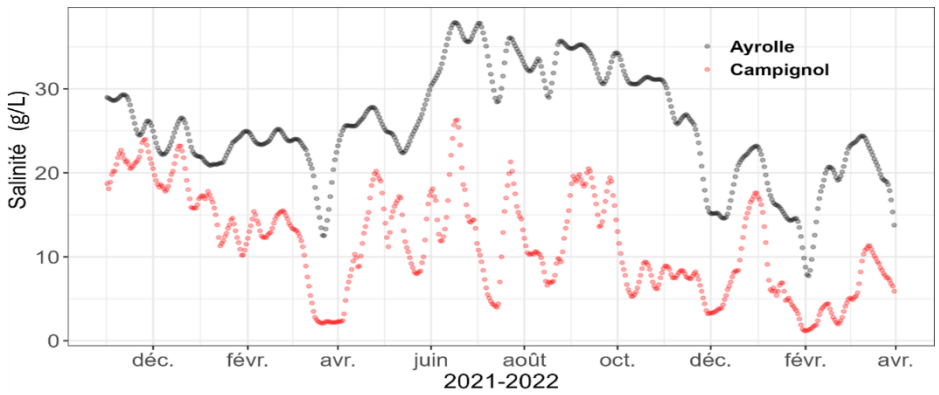


Figure 12. Séries temporelles de la salinité mesurée dans la lagune d'Ayrolle (points noirs) et dans l'étang de Campignol (points rouges), chronique lissée sur 7 jours au cours des années 2021-2022.

Le bilan hydrique obtenu pour l'année 2021 pour la situation repère est présenté dans la figure 13. Ce bilan illustre les différents postes d'entrées et de sorties en eau qui régissent le fonctionnement hydrologique de la lagune et permet de quantifier leur contribution respective. Les apports principaux proviennent d'une part des écoulements continentaux générés par les bassins versants, qui représentent une source non négligeable d'eau douce, et une partie moins importante des précipitations directes sur la surface de la lagune. À l'inverse, les pertes sont dominées par les échanges d'eau avec la lagune de l'Ayrolle auxquels s'ajoute l'évaporation, fortement conditionnée par les paramètres climatiques saisonniers (figure 11 B et E).

L'analyse de l'ensemble de ces flux indique que, pour l'année considérée, le bilan hydrique apparaît globalement équilibré : les volumes entrants compensent de manière satisfaisante les volumes sortants. Cette situation traduit le rôle majeur joué par les échanges avec la lagune de l'Ayrolle, qui assurent un mécanisme de régulation et limitent les déséquilibres hydriques potentiels.

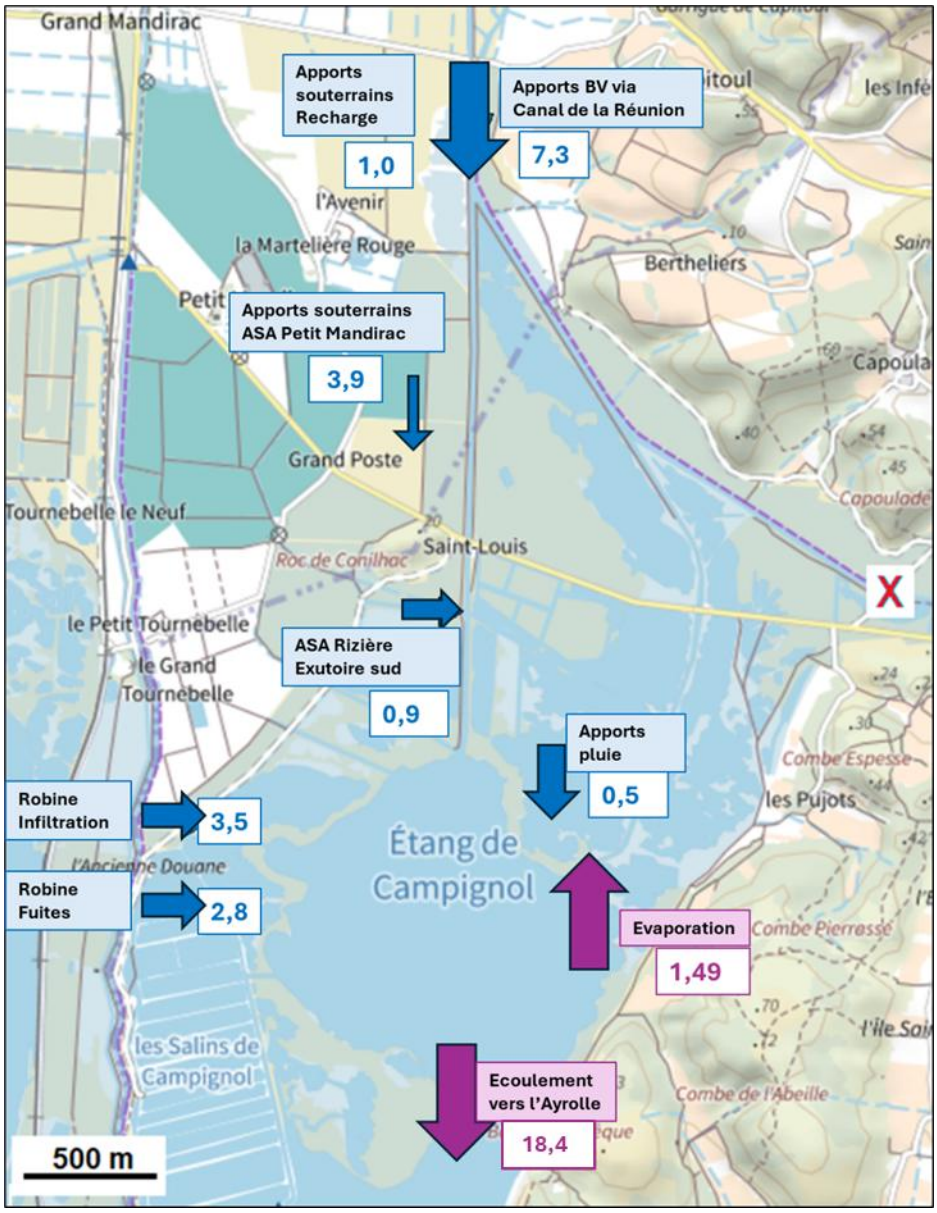


Figure 13. Bilan hydrique (exprimé en $10^6 m^3$) de l'année 2021 calculé par GAMELag, pour l'étang de Campignol.

4.2. Comparaison statistique mesure/modèle

Une régression linéaire a été effectuée afin d'évaluer la corrélation entre les valeurs simulées et observées de la salinité dans l'étang de Campignol. L'équation obtenue est la suivante :

$$\text{Salinité}_{\text{Obs}} = 7.15 + 0.54 \times \text{Salinité}_{\text{Sim}}$$

Les coefficients de régression indiquent une relation positive et significative entre les valeurs simulées et les observations (p-value < 0,001 pour les deux paramètres). Le modèle explique environ 50 % de la variabilité observée (R^2=0,50), ce qui traduit une capacité moyenne à reproduire la variabilité des mesures réelles.

L'interception de 7,15 indique qu'une salinité simulée nulle correspondrait à une salinité observée d'environ 7,15, traduisant une tendance du modèle à surestimer les faibles salinités. La pente de 0,54, inférieure à 1, met en évidence une sous-estimation des fortes salinités. Cette tendance est particulièrement visible pour les valeurs supérieures à 15, où le modèle représente moins fidèlement les observations.

L'analyse des résidus montre une dispersion centrée autour de zéro (médiane : 0,00), avec la plupart des écarts compris entre -2,1 et 2,0. Toutefois, quelques valeurs extrêmes (entre -7,6 et +9,4) suggèrent des zones ou des périodes où le modèle reproduit moins bien la réalité. Ces écarts plus importants sont principalement observés durant l'été, lorsque la salinité fluctue fortement sous l'effet des apports d'eau douce liés au Canal de la Réunion et à la connexion avec l'étang de l'Ayrolle. Dans cette période, les gradients verticaux et horizontaux de salinité deviennent marqués, et la salinité moyenne simulée sur l'ensemble de la masse d'eau ne reflète plus les valeurs locales mesurées à proximité de la surface ou dans les zones plus confinées.

Dans l'ensemble, la salinité modélisée reproduit convenablement la dynamique globale observée dans l'étang de Campignol. Les écarts résiduels s'expliquent par la variabilité spatiale et temporelle propre au système lagunaire ainsi que par la position de la sonde de mesure dans la colonne d'eau. Bien que le modèle présente un certain degré d'incertitude, il parvient à représenter de manière satisfaisante la dynamique saisonnière de la salinité et son évolution temporelle, confirmant la pertinence du modèle GAMELag pour la zone étudiée (Figure 14).

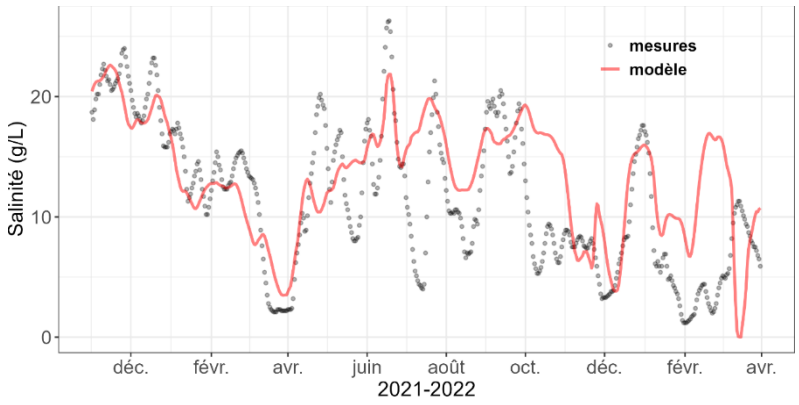


Figure 14. Séries temporelles de la salinité mesurée et modélisée dans l'étang de Campignol entre octobre 2020 et avril 2022.

4.3. Validation des processus biochimiques internes.

Cette deuxième étape de validation assure que le modèle représente adéquatement les processus biogéochimiques de la lagune, en comparant les mesures de terrain (Table A.2, Annexe 2) aux valeurs simulées pour la période de la situation « repère » (Figure 15). Cette étape évalue si le modèle représente de manière cohérente la dynamique saisonnière des paramètres biogéochimiques suivissur le terrain. Sont utilisés comme indicateurs de la qualité de l'eau, les paramètres suivants :

- Les formes inorganiques dissoutes d'azote (NID) et de phosphore (PID)
- Les concentrations totales en azote (NT) et phosphore (PT)
- La chlorophylle a (Chlo.a)

Ainsi, ces paramètres permettent de vérifier la capacité du modèle à reproduire les limitations de production par la disponibilité des nutriments ; les ordres de grandeur et l'évolution temporelle des stocks de matière dans la colonne d'eau ; le fonctionnement du compartiment sédimentaire comme source ou puits de nutriments.

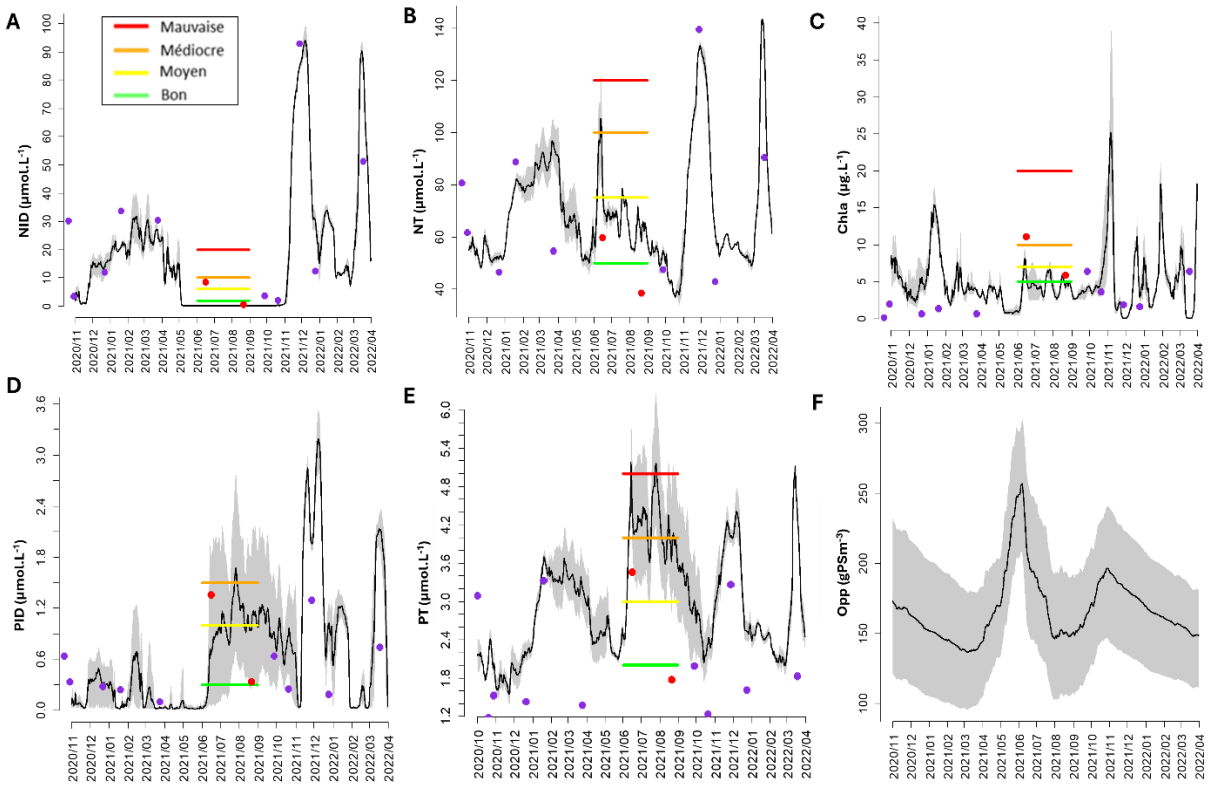


Figure 15 Evolution des indicateurs de la qualité de l'eau modélisés (courbe noire) par rapport aux points d'échantillonnage (violets) et prélèvements DCE (rouges) sur la période repère pour (A) les concentrations en azote inorganique dissous, (B) les concentrations en azote total, (C) les concentrations en Chlorophylle a, (D) les concentrations en phosphore inorganique dissous, (E) les concentrations en phosphore total et (F) l'indicateur de biomasse d'algues vertes opportunistes. Le calque gris représentant la plage des valeurs obtenues avec les différents ensembles de paramètres utilisés pour la situation repère, définit ainsi l'incertitude du modèle. Les seuils de qualité déterminant les états écologiques ont été projetées sur la période estivale.

Durant l'été, les concentrations de NID mesurées oscillent entre les niveaux "bon" et "moyen" tandis que le modèle indique une ligne constante à zéro, représentant utilisation totale de NID, pendant la période estivale (Figure 15 A). Les écarts où la courbe du modèle diverge des mesures , suggère que le modèle ne capture pas parfaitement toutes les variations. Ces fluctuations restent acceptables puisque le modèle représente une situation moyenne de l'ensemble de la lagune et retransmet la dynamique générale du NID sans reproduire les fluctuations possibles issues de la variabilité environnementale.

Semblable au NID, le NT présente des pics de concentration à la fin de 2020 et au début de 2022, avec une grande variabilité tout au long de 2021, indiquant des périodes de stress pour l'écosystème aquatique en raison de l'excès d'azote (Figure 15 B).

Pour la chlorophylle a, les concentrations modélisées indiquent des fluctuations considérables, liés à des pics réguliers de phytoplancton (Figure 15 C). A noter que les niveaux se maintiennent généralement dans une fourchette basse pendant la majeure partie de 2021, bien qu'il y ait des épisodes de concentrations plus élevées. En début d'été (juin 2021), le modèle sous-estime les concentrations en chlorophylle a.

Les concentrations de PID sont faibles au début de l'année, puis à partir de l'été les concentrations augmentent et atteignent un pic hivernal, qui peut être lié aux apports entrant suite aux pluies hivernales sur l'ensemble du bassin versant (Figure 15 D). Le pic suivant correspond à la grande crue enregistrée en mars 2022. Les écarts entre les mesures et le modèle sont relativement faibles, ce qui suggère que le modèle reproduit bien la dynamique du PID, néanmoins en période estivale ces écarts sont plus importants mais les concentrations mesurées restent dans la fourchette d'incertitude du modèle. Du point de vue de la disponibilité en nutriment, le modèle est cohérent avec les observations qui indiquent une limitation de la production primaire par l'azote.

Le modèle surestime les concentrations en phosphore total mais reproduit correctement la variabilité saisonnière (Figure 15 E). La dynamique du PT a trois pics: au printemps, en été et en hiver. De même que pour l'azote, ces pics sont importants et sont le signe d'une production excessive de matière dans le milieu.

La production d'algues verte opportunistes indique un signal saisonnier clair, avec des pics au printemps et en été, ce qui est typique de l'activité photosynthétique des macrophytes (Figure 15 F). Forte en période estivale, en raison de la luminosité et des températures plus élevées, la production primaire peut contribuer à la variabilité des concentrations de chlorophylle a et l'épuisement des nutriments (notamment du NID). Les algues meurent ensuite avec la baisse des températures et la diminution du temps d'ensoleillement, rendant les nutriments disponibles dans la colonne d'eau à des concentrations élevées, et contribuant ainsi à l'eutrophisation de la lagune.

Les modèles des lagunes côtières, comme GAMELag, sont confrontés à plusieurs sources d'incertitudes : La complexité des processus biogéochimiques ; la variabilité spatiale et temporelle des paramètres environnementaux ; les limites des données d'entrée et des observations. Il est donc important de considérer les résultats des modèles comme des estimations plutôt que des prédictions exactes, et d'interpréter les sorties du modèle dans le contexte de ces incertitudes.

A retenir :

Situation de référence : La première étape consiste à établir une situation repère qui couvre au moins une année hydrologique (septembre à août) pour valider le modèle.

- **1ère validation par la salinité :** Le modèle reproduit bien la salinité, mais avec des écarts notables en été vraisemblablement liés à la variabilité locale non reproductible par le modèle ;
- **2ème validation par les processus biogéochimiques :** Le modèle capture les tendances générales des paramètres biogéochimiques ainsi que la limitation de la production primaire estivale par l'azote., Il présente néanmoins des différences avec les mesures ponctuelles, notamment pour la chlorophylle a et le phosphore total.
- L'absence de données de biomasse de macrophytes présentes dans le milieu limite notre capacité à caler l'évolution de ce compartiment et augmente l'incertitude des résultats du modèle.

4.4. Dynamique saisonnière

Le cycle des nutriments dans l'étang de Campignol est marqué par des variations saisonnières significatives, influencées par une combinaison de facteurs environnementaux. Les changements dans les apports en eau douce et en eau de mer affectent les niveaux de salinité, ce qui favorise la présence de cascail. Bien que le modèle ne tienne pas directement compte de la présence et du stockage des nutriments via le cascail, l'amélioration de la saisonnalité des apports ainsi que le contrôle de la qualité des apports réduiront la présence du cascail. Le bassin versant constituant la principale source d'apports en azote et phosphore, un épisode de crue majeur à la fin du mois de novembre double les apports mensuels, illustrant l'impact crucial des événements hydrologiques ponctuels. En outre, chaque saison présente un pic modéré de nutriments, reflétant les cycles biogéochimiques naturels qui régissent cet écosystème lagunaire.

Pour analyser l'impact des événements météorologiques (inondations, sécheresses) et des variations saisonnières (température, lumière, vent), ainsi que celui de la gestion anthropique du bassin versant alimentant Campignol, une comparaison saisonnière est essentielle. Le cycle saisonnier de la production biologique et des flux de matière dans la lagune montre des variations importantes tout au long de l'année, mettant en évidence les interactions complexes entre les apports externes et les processus internes.

4.4.1. Dynamique hivernale

Dans un climat méditerranéen, cette période est caractérisée par des températures douces et des précipitations modérées à intenses, qui entraînent un lessivage des terres agricoles et augmentent les apports en nutriments, principalement sous forme de nitrates. Ces transferts sont majoritairement liés aux crues des cours d'eau et aux apports diffus provenant du bassin versant ponctuellement, tandis que les rejets urbains assurent un apport continu d'ammonium et de phosphate. Cette dynamique est également reflétée dans l'évolution piézométrique locale, le cycle hydrologique 2020-2021 présente une légère augmentation des niveaux au cours de l'automne et l'hiver, puis un tarissement qui débute en mars 2021 et se poursuit jusqu'à la crue du 25/11/2021. Le niveau augmente alors de près de 2 m, la nappe devient affleurante.

Les niveaux piézométriques ont été environ 50 cm plus haut sur le cycle hydrologique 2021-2022 due aux précipitations ayant été deux fois plus abondantes lors du second cycle hydrologique. La piézométrie semble être grandement influencée par les précipitations et plus modérément par les pompages locaux (Fleury et al. 2022). Malgré une lumière moins abondante qu'en période estivale, l'activité biologique est maintenue grâce à la faible profondeur de la lagune, qui favorise une pénétration suffisante de la lumière pour soutenir la production primaire. Les processus de reminéralisation à l'interface eau-sédiment jouent également un rôle clé en régénérant les stocks d'azote inorganique, notamment sous forme d'ammonium, ce qui profite au développement du phytoplancton (Le Fur 2018; Trinquier 2009; Deslous-Paoli 1996). A cette période, les concentrations en phosphate sont faibles en raison d'un relargage sédimentaire limité par les températures basses aussi on observe une exportation importante d'azote vers la lagune d'Ayrolle. Pendant cette période des épisodes de « vidange » des masses d'eau de l'étang de Campignol vers l'étang de l'Ayrolle par basculement de l'étang lors des périodes prononcées de vents de secteur nord-ouest, sont fréquents. Ces périodes peuvent servir à évacuer d'importantes charges de nutriments de la colonne d'eau. Dans l'état actuel de la lagune, les algues opportunistes représentent le stock d'azote et de phosphore le plus important et recouvre les herbiers aquatiques, en période hivernale (Figure 16).

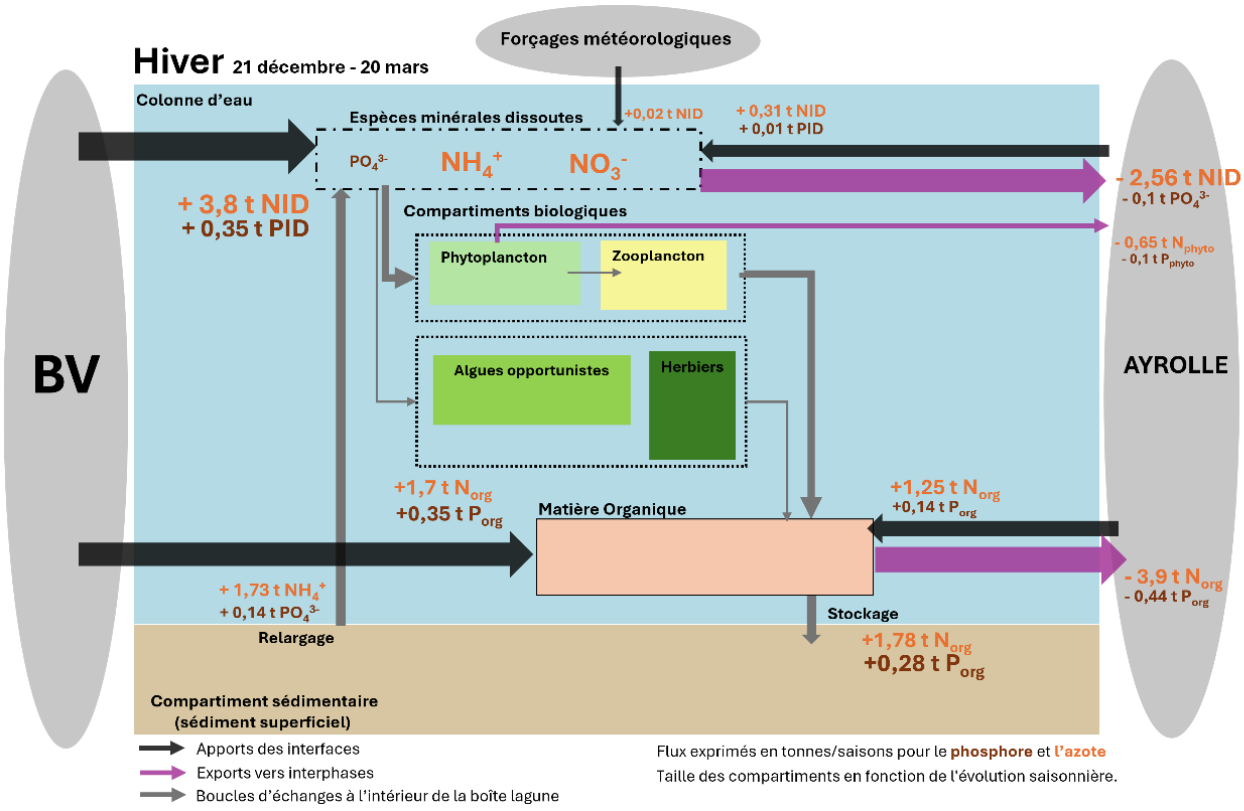


Figure 16 Schéma conceptuel des interfaces et compartiments de l'étang de Campignol en période hivernale, les flèches représentant les flux de nutriments entrants (noires), sortants (violet) et entre compartiments (grises). La taille des composantes donne une indication sur les échanges de nutriments les plus importants et les compartiments stockant davantage de nutriments.

4.4.2. Dynamique printanière

Au printemps, l'augmentation de la lumière et de la température stimule la croissance des producteurs primaires, notamment le phytoplancton et les macrophytes (macroalgues et herbiers). Les températures augmentant, l'activité microbienne de reminéralisation des nutriments à l'interface eau-sédiment est amplifiée, et le relargage de nutriments vers la colonne d'eau augmente. Le phytoplancton profite également de ces conditions favorables pour entrer en phase de croissance rapide, souvent marquée par des efflorescences. Cependant, il entre en compétition avec les macrophytes pour les ressources lumineuses et nutritives. Les macroalgues filamenteuses, par exemple, peuvent former des tapis denses qui limitent la pénétration de la lumière dans la colonne d'eau, affectant ainsi le phytoplancton situé en profondeur (Ligorini et al. 2022).

Cette production primaire soutient le développement du zooplancton, qui agit comme un lien trophique essentiel en transférant l'énergie des producteurs primaires vers les niveaux trophiques supérieurs (poissons, oiseaux). La diversité et l'abondance du zooplancton augmentent au printemps grâce à la disponibilité accrue de phytoplancton comme source alimentaire. En retour, le broutage par le zooplancton peut réguler les populations de phytoplancton, influençant ainsi la structure trophique globale (Cocquempot et al. 2019).

En résumé, au printemps, l'étang de Campignol est caractérisé par une forte activité biologique où macrophytes, phytoplancton et zooplancton interagissent étroitement. Ces interactions façonnent non seulement la dynamique des nutriments mais également les flux d'énergie au sein de cet écosystème complexe (Figure 17).

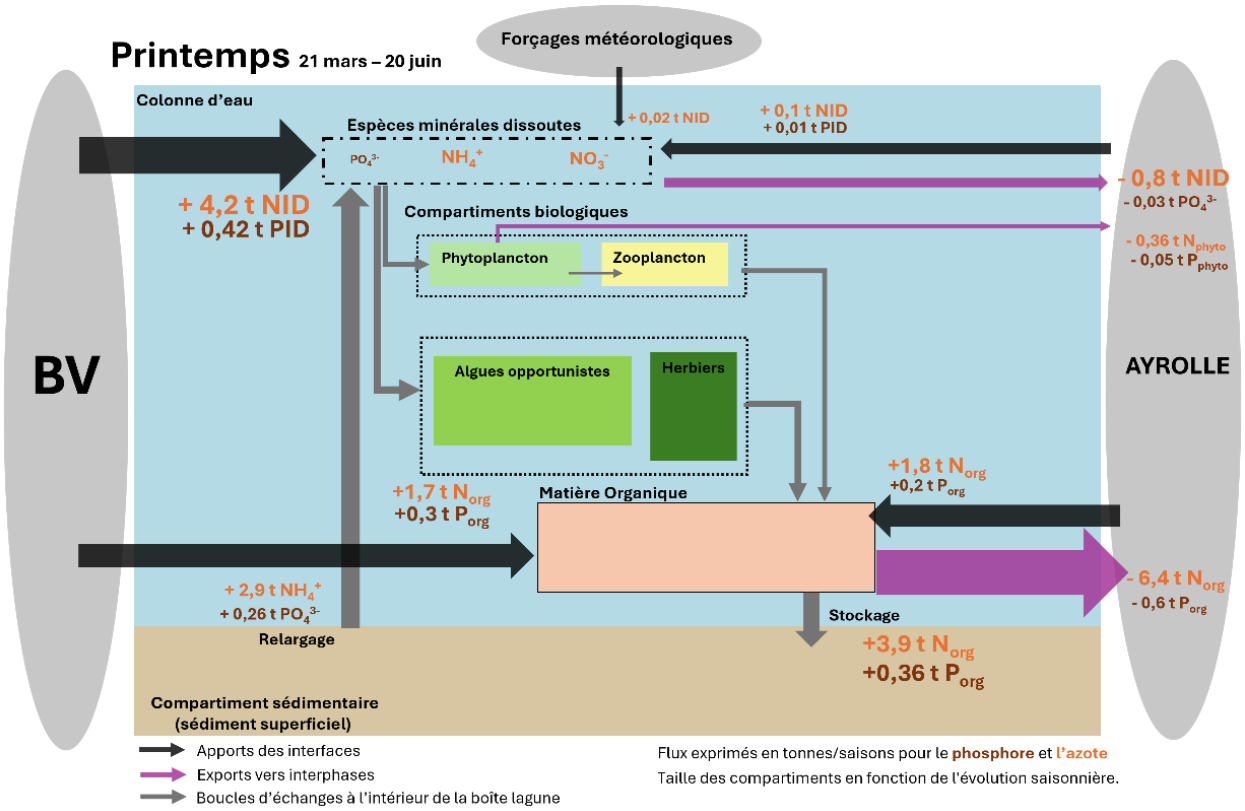


Figure 17 Schéma conceptuel des interfaces et compartiments de l'étang de Campignol en période printanière, les flèches représentant les flux de nutriments entrants (noires), sortants (violet) et entre compartiments (grises). La taille des composantes donne une indication sur les échanges de nutriments les plus importants et les compartiments stockant davantage de nutriments.

4.4.3. Dynamique estivale

Le relargage sédimentaire de nutriments favorisés par la hausse des températures et des apports exogènes ponctuels, comme ceux issus des précipitations estivales ou des rejets anthropiques tels que les vidanges des rizières et le drainage des eaux d'irrigation agricole du bassin versant peuvent provoquer des pics temporaires de biomasse phytoplanctonique.

La production biologique globale diminue durant cette période, la génération de matière organique reste significative, favorisant le stockage d'azote et de phosphore organique dans les sédiments. Parallèlement, le compartiment sédimentaire libère davantage de phosphore que d'azote vers la colonne d'eau. Dans la continuité du printemps, les formes inorganiques dissoutes d'azote (NID) présentes dans la colonne d'eau sont entièrement consommées (Figure 18).

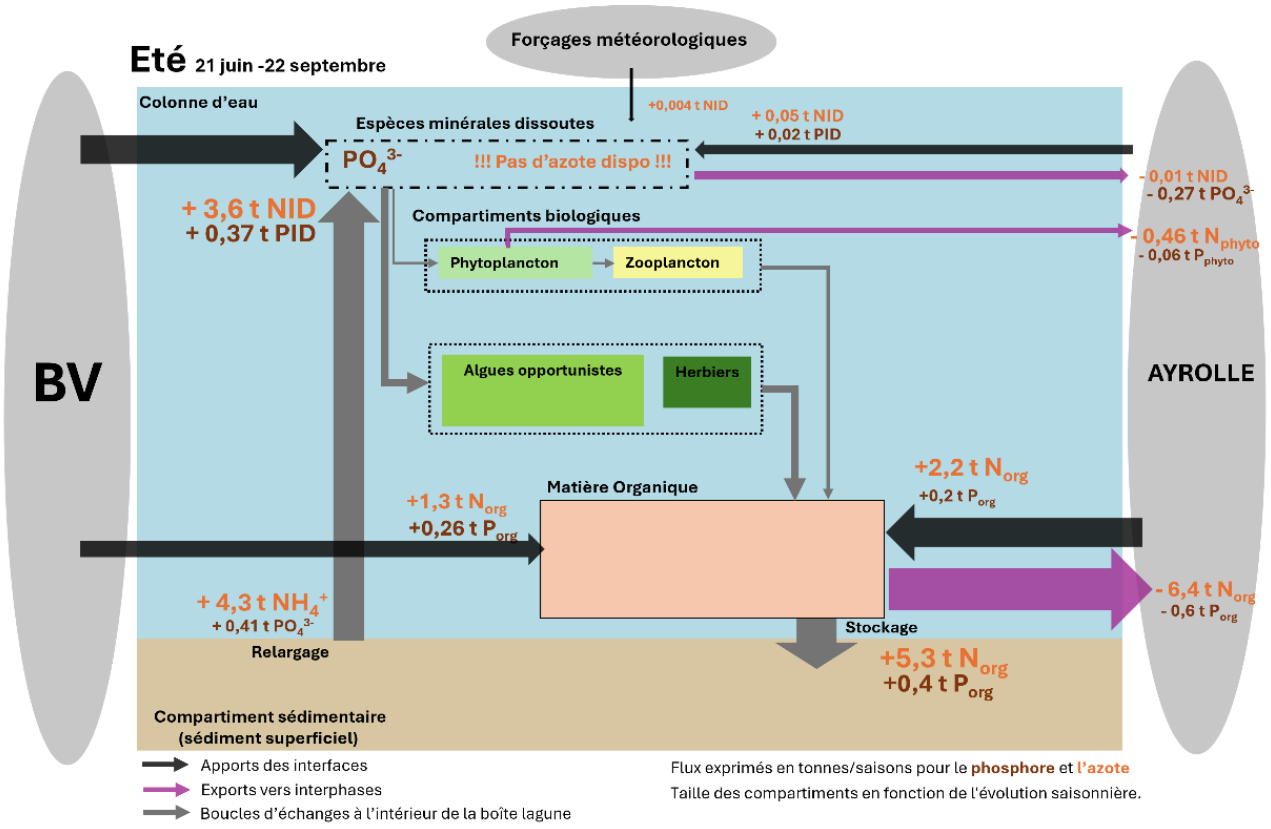


Figure 18 Schéma conceptuel des interfaces et compartiments de l'étang de Campignol en période estivale, les flèches représentant les flux de nutriments entrants (noires), sortants (violet) et entre compartiments (grises). La taille des composantes donne une indication sur les échanges de nutriments les plus importants et les compartiments stockant davantage de nutriments.

4.4.4. Dynamique automnale

En automne, la dynamique des nutriments et de la production primaire dans l'étang de Campignol est influencée par des changements saisonniers marqués, notamment par les précipitations croissantes et une diminution progressive de la température et de la lumière. Contrairement aux saisons précédentes, les niveaux de NID dans la colonne d'eau recommencent à augmenter.

L'automne est une période clé pour le renouvellement des nutriments dans la colonne d'eau. Les précipitations automnales et la pratique de submersion entraînent un lessivage des terres agricoles du bassin versant, apportant des nitrates et des phosphates à la lagune. Ces apports externes augmentent temporairement les concentrations en azote et en phosphore disponibles pour le phytoplancton (Giordano et al. 2010). Cela peut entraîner une reprise modérée de l'activité phytoplanctonique, bien que celle-ci soit limitée par la réduction progressive de l'intensité lumineuse.

Les macrophytes (herbiers et macroalgues) commencent à décliner en biomasse en raison de la baisse de température et de lumière (Lauret et al. 2011). Cependant, leur dégradation contribue à libérer des nutriments organiques dans l'eau, pouvant être reminéralisés en formes inorganiques utilisables par le phytoplancton. Les macrophytes jouent également un rôle important en stabilisant les sédiments et en limitant leur remise en suspension lors des épisodes venteux caractéristiques de cette saison (Le Fur 2018) (Figure 19).

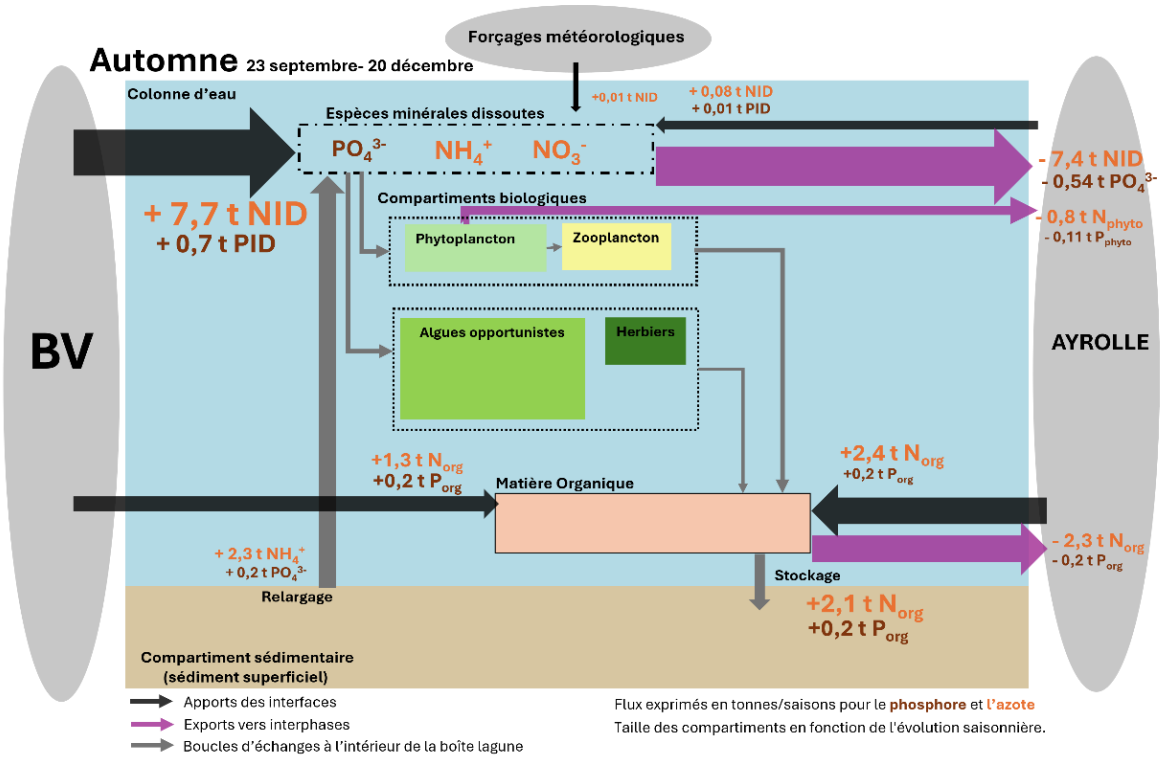


Figure 19 Schéma conceptuel des interfaces et compartiments de l'étang de Campignol en période automnale, les flèches représentant les flux de nutriments entrants (noires), sortants (violet) et entre compartiments (grises). La taille des composantes donne une indication sur les échanges de nutriments les plus importants et les compartiments stockant davantage de nutriments.

En résumé, la modélisation de la dynamique des nutriments dans l'étang de Campignol révèle des variations saisonnières marquées, influencées par des facteurs environnementaux tels que les **précipitations**, la **température** et la **lumière**.
Les résultats indiquent que chaque saison présente des caractéristiques distinctes en termes d'apports de nutriments du bassin versant, de processus biologiques et d'interactions entre les différents compartiments de l'écosystème.
Bien que le modèle mette en évidence une sensibilité de la lagune aux apports de nutriments, notamment lors des événements de crue, il permet également de mieux comprendre les mécanismes de régulation naturels et l'importance des interactions entre les compartiments en déséquilibre.
Le phytoplancton et les algues opportunistes apparaissent comme des compartiments dominants représentant un stock important de matière organique. Alors que le compartiment herbivore se limite à une croissance au printemps, qui s'éteint ensuite par compétition avec les algues opportunistes.

A retenir :

- Le modèle met en évidence des variations saisonnières distinctes dans la dynamique des nutriments ;
- Les apports excessifs de nutriments favorisent la prolifération d'algues opportunistes, un point critique à surveiller ;
- Le modèle souligne l'importance des interactions entre les compartiments (eau, sédiments, organismes) pour réguler les flux de nutriments ;

5. Scénarisation

Une fois la configuration GAMELag sur l'étang de Campignol mise en place, le modèle devient un outil pour aider les gestionnaires et les acteurs locaux à visualiser les conséquences des mesures de gestion envisagées, ainsi qu'à visualiser l'impact des régimes de précipitations futures.

Le modèle GAMELag repose sur le bilan d'eau présenté dans la situation repère (Figure 13). Pour rappel, une part importante des apports d'eau douce provient d'apports souterrains ou d'apports diffus qui ne sont pas maîtrisables. Ainsi les différents scénarios testés ne proposent qu'une variation des apports d'eau douce provenant des apports superficiels du bassin versant et drainés par le canal de la Réunion (noté « Apports BV » sur les schémas et « situation repère canal » dans les tableaux de synthèse). Ces apports proviennent des prélèvements notamment agricoles réalisés en amont par les ASA et sont donc modulables en fonction de la gestion de l'eau réalisée. Tous les autres apports sont pris en compte dans les scénarisations, bien que leurs volumes associés ne soient pas affichés dans les tableaux de synthèse, et leurs volumes sont identiques à ceux du scénario repère.

Les scénarios sont testés à partir des volumes identifiés sur les 18 mois de la situation repère, mais les résultats dans les tableaux synthétiques correspondent à l'année civile 2021. Les volumes décrits sur le scénario repère intègrent les volumes d'eau envoyés à l'étang de Campignol via la Convention Raonel, volumes distribués cette année-là entre le 21 janvier et le 8 mai et s'élevant à 2 786 942 m^3. Les débits ont été d'environ 400 $L.s^{-1}$ entre le 21 janvier et le 12 mars, nuls entre le 12 et le 26 mars, puis variant entre 400 et 100 $L.s^{-1}$ entre le 27 mars et le 8 mai 2021 ; soit 1,8 Mm^3 envoyés entre fin janvier et mi-mars et 0,9 Mm^3 de fin mars à début mai.

5.1. Scenario théorique : sans apport de nutriments du bassin versant

Afin d'analyser le fonctionnement de la lagune en l'absence de perturbations extérieures et d'évaluer la part du stock sédimentaire dans la dynamique interne des nutriments, une première simulation est réalisée sans apports de nutriments issus du bassin versant. Ce scénario théorique, nommé « BV nul », correspond à une épuration complète des nutriments avec les volumes d'eau entrants maintenus.

Les résultats de ce scénario indiquent une amélioration des paramètres, se situant en dessous du seuil « Bon - Moyen » de la DCE en période estivale (Figure 20). Ces résultats montrent que la charge sédimentaire en nutriments ne contribue pas de façon significative à l'eutrophisation de la lagune et que des stratégies sur les apports en eau issus du bassin versant représentent des leviers d'actions possibles et efficaces.

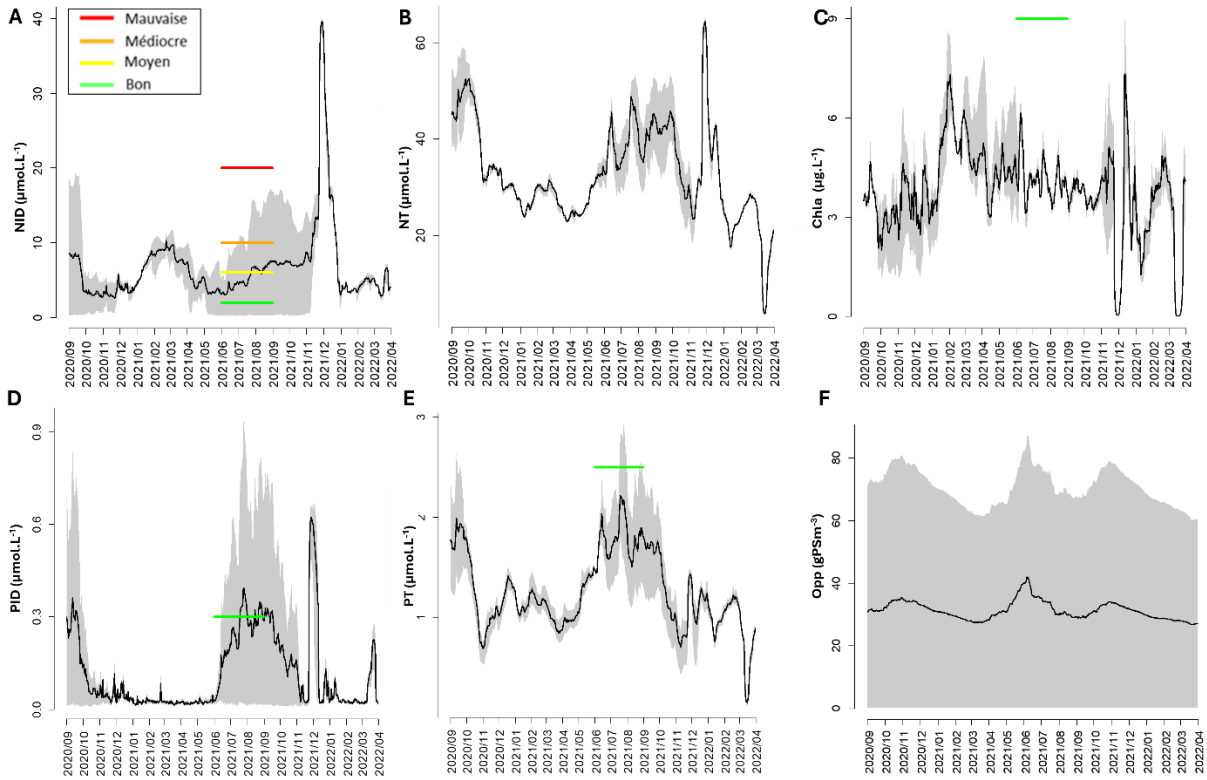


Figure 20. Evolution des indicateurs de la qualité de l'eau modélisés (courbe noire) pour la simulation « BV nul » correspondant à une épuration complète des flux intrants de nutriments au sein de l'étang de Campignol : (A) les concentrations en azote inorganique dissous, (B) les concentrations en azote total, (C) les concentrations en Chlorophylle a, (D) les concentrations en phosphore inorganique dissous, (E) les concentrations en phosphore total et (F) l'indicateur de biomasse d'algues vertes opportunistes. Le calque gris représentant la plage des valeurs obtenues avec les différents ensembles de paramètres utilisés pour la situation repère, définissant ainsi l'incertitude du modèle. Les limites de qualité déterminant les états écologiques ont été projetées sur la période estivale.

5.2. Définition de scénarios de gestion

Au cours du processus de consultation au sein du comité technique et du comité de pilotage, un total de 13 scenarios à tester, ont été définis. Les leviers d'action de chaque scénario correspondent à des mesures possibles pour résoudre le problème d'eutrophisation de l'étang de Campignol. Ces scénarios ont été regroupés par thèmes et chacun répond à une situation particulière dont le contexte est détaillé en Annexe 4, ainsi :

A. Demande des usagers

- **Scénario A.1 « demande des pêcheurs avec gestion » :** ajout de 1,7 Mm^3 sur novembre et décembre et ajout de 0,3 Mm^3 en mars soit ajout de 2 Mm^3 en hiver par rapport au scénario de référence.

- **Scénario A.2 « ressuyage des parcelles » :** Dans ce scénario, l'eau de ressuyage des terres agricoles qui bordent le canal de la Réunion et qui se déversait directement dans la lagune (1,2 Mm^3) est récupérée et transférée sur des parcelles de la Clape (principalement des vignobles) pendant les mois d'été (juin à septembre). Ces 1,2 millions de m^3 n'atteignent plus la lagune.

B. Convention de pêche

- **Scénario B.1« printemps » :** Ce scenario répond à la question de l'impact potentiel du retard de la Convention de pêche. Les apports d'eau prévus dans cette convention au mois de novembre ou au mois de mars sont décalés aux mois de mars, avril et mai, après le chômage du canal de la robine.

- **Scénario B.2 « hivernal »** : Ce scénario représente une optimisation du calendrier de la Convention de pêche en tenant compte du chômage du canal de la Robine. Il s'agit de concentrer les 2,6 millions d'apports d'eau douce via le canal de la Raonel principalement sur les mois de novembre et décembre.

C. Météo

- **Scénario C.1 « petites crues » :** suppression de l'événement de crue automnale et répartition d'arrivées d'eau reproduisant des petites crues.

- **Scénario C.2 « sécheresse estivale » :** réduction de 2,1 Mm^3, correspondant au volume maximal pouvant être réduit, d'apports sur les mois de juin, juillet et août.

D. Saisonnalité des apports

- **Scénario D.1 « modéré » :** réduction de 1,5 Mm^3 pendant l'été (du 21 juin au 20 septembre) et ajout de 1,5 Mm^3 pendant les mois d'hiver (du 21 décembre au 20 mars).

- **Scénario D.2 « optimisé » :** réduction de 2,1 Mm^3 (correspondant au volume maximum possible) d'apports sur juin, juillet et août et ajout de 2,1 Mm^3 d'eau pendant les mois de novembre, décembre et mars.

- **Scénario D.3 « contraint » :** réduction de 1,5 Mm^3 pendant les mois d'été (juin, juillet, août), suppression des 1,2 Mm^3 apportés en janvier-février, concentration des volumes apportés par la Convention de pêche en novembre, décembre et mars et redistribution de seulement 0,3 Mm^3 des économies estivales pendant les mois d'hiver (novembre, décembre, mars et avril), pour tenir compte du chômage du canal et de potentielles contraintes sur les prélèvements hivernaux. Soit une réduction de 1,2 Mm^3 des apports d'eau annuels à la lagune par rapport au scénario repère.

E. Saisonnalité des apports avec abattement annuel arbitraire des nutriments

- **Scénario E.1 « abattement à 25 % » :** réduction maximale des apports sur juin, juillet et août soit 2,1 Mm^3 et ajout de 2,1 Mm^3 d'eau sur novembre, décembre et mars avec en parallèle la mise en place de 25% d'abattement sur les nutriments toute l'année.

- **Scénario E.2 « abattement à 50 % » :** réduction maximale des apports sur juin, juillet et août soit 2,1 Mm^3 et ajout de 2,1 Mm^3 d'eau sur novembre, décembre et mars avec en parallèle la mise en place de 50% d'abattement sur les nutriments toute l'année.

F. Saisonnalité des apports avec épuration par les marais périphériques

- **Scénario F.1 « Canal » :** réduction maximale des apports sur juin, juillet et août soit 2,1 Mm^3 par le canal de la Réunion et ajout de 2,1 Mm^3 d'eau de la Robine sur novembre, décembre et mars en faisant transiter ces eaux dans les zones humides périphériques, permettant un abattement de 50% sur les azotes et de 5% sur le phosphore, restituant l'eau plus épurée.

- **Scénario F.2 « Canal + rizières » :** même scénario que le scénario F.1, pour lequel 1 Mm^3 d'eau de rejet de la rizière bénéficie de l'abattement par les marais périphériques et n'est plus rejeté à la lagune durant l'été.

  Nb : Ce volume d'eau provenant des rizières, qui est bien pris en compte dans le fonctionnement du modèle (comme d'autres forçages) ainsi que dans les autres scénarios, est identifié de façon spécifique dans ce scénario comme une action ciblée sur ce rejet. Pour cette raison, il est repris dans le tableau récapitulatif en deux lignes spécifique (le canal et la rizière).

La traduction de l'éventail des scénarios examinés par le COPIL, en termes de volumes d'eau mensuels (Mm^3) et de charge annuelle en nutriments (tonnes d'azote et de phosphore) est présenté dans le Tableau 6.

Tableau 4. Apports mensuels en eau dans l'étang de Campignol via le canal de la Réunion et bilans annuels des flux d'azote et de phosphore sur l'année 2021-2022 pour la situation repère et pour l'ensemble des scénarios définis dans l'étude. Les augmentations ou la diminution des volumes mensuels par rapport à la situation repère du Canal de la Réunion, sont représentés en dégradés de bleu pour les volumes d'eau, orange pour l'azote et marron pour le phosphore.

Situation repère dans le canal Volumes d'eau: - + Bilan annuel N : - + Bilan annuel P : - +			Volumes d'eau mensuels (Mm^3)												Bilan annuel 2021		
			Janv	Fev	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Sept	Oct	Nov	Déc	Eau (Mm3)	Azote (Tonnes)	Phosphore (Tonnes)
	situation repère canal		0.67	0.50	0.86	0.66	0.58	0.88	0.63	0.65	0.08	0.26	1.13	0.40	7.3	9.1	1.2
	Repère rizière		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.10	0.30	0.10	0.20	0.10	0.10	0.00	0.9	0.7	0.1
Noms des scénarios	Demande des usagers	demande des pêcheurs	0.72	0.50	1.14	0.67	0.59	0.87	0.63	0.67	0.08	0.25	2.20	1.00	9.3	12.0	1.6
		ressuyage des parcelles	0.67	0.50	0.86	0.67	0.57	0.50	0.35	0.36	0.08	0.26	1.09	0.44	6.3	8.4	1.1
	Convention de pêche	hivernale	0.00	0.00	0.86	0.66	0.58	0.88	0.63	0.64	0.08	0.26	1.68	0.97	7.3	9.6	1.2
		printanière	0.03	0.02	0.86	1.22	1.16	0.90	0.63	0.64	0.08	0.26	1.09	0.43	7.3	8.5	1.1
	Météo	Petites crues	0.67	0.50	0.90	0.70	0.60	0.90	0.60	0.70	0.10	0.20	0.90	0.50	7.3	8.8	1.2
		sécheresse estivale	0.67	0.50	0.86	0.66	0.58	0.00	0.00	0.00	0.08	0.26	1.13	0.40	5.1	7.5	0.9
	Saisonnalité	modérée	1.20	0.89	1.30	0.66	0.58	0.60	0.06	0.06	0.01	0.26	1.13	0.50	7.3	10.0	1.3
		optimisé	0.67	0.50	1.53	0.70	0.60	0.00	0.00	0.00	0.08	0.26	1.82	1.10	7.3	10.6	1.3
		contraint	0.00	0.00	1.31	0.68	0.57	0.28	0.19	0.20	0.08	0.26	1.41	1.14	6.1	9.6	1.2
	Saisonnalité avec abbattement annuel	abattement à 25%	0.67	0.50	1.53	0.70	0.60	0.00	0.00	0.00	0.08	0.26	1.82	1.10	7.3	7.9	0.9
		abattement à 50%	0.67	0.50	1.53	0.70	0.60	0.00	0.00	0.00	0.08	0.26	1.82	1.10	7.3	5.3	0.6
	Epuration par marais	Eau du canal	0.67	0.50	1.53	0.70	0.60	0.00	0.00	0.00	0.08	0.26	1.71	1.22	7.3	5.7	0.8
		Eau du canal	0.67	0.50	1.53	0.70	0.60	0.00	0.00	0.00	0.08	0.26	1.71	1.22	7.3	5.7	0.8
		et rizière	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.20	0.10	0.30	0.30	0.9	0.5	0.1

Ce tableau synthétise les résultats d'une phase intensive de modélisation et de consultation impliquant des gestionnaires, des acteurs locaux et des scientifiques. Cela constitue une pièce maîtresse, reflétant les impacts combinés des volumes d'eau et des flux de nutriments provenant du bassin versant et entrant par le canal de la Réunion, principale source d'eau de surface, intégrant ainsi les divers points de vue et expertises mobilisés au cours de ce processus.

Cela illustre aussi globalement quels scénarios augmentent ou diminuent la charge entrante en nutriments (par rapport à la situation repère). Les scénarios dans lesquels la charge en nutriments est fortement augmentée sont ceux pour lesquels les volumes d'eau entrants sont augmentés pendant la période hivernale, sans aucune épuration. Partant de ce constat l'analyse plus fine des flux entrants sur les processus internes de l'étang de Campignol est nécessaire, en

tenant compte des indicateurs biogéochimiques internes afin d'extraire les informations apportées par chaque scénario en termes de dégradation ou de restauration de la fonctionnalité de l'écosystème.

L'étape finale de la mission Flux Admissibles, a donc été de présenter et discuter au COPIL les résultats des indicateurs des scenarios afin de décider collégialement des mesures de gestion à mettre en œuvre à court terme et d'identifier les risques si rien n'est mis en place. Les éléments modélisés ont donc permis d'avoir des bases pour établir une vision à long terme et à l'échelle du bassin pour orienter les décisions et promouvoir une gestion durable, anticiper la croissance démographique dans la région et prendre les mesures nécessaires pour stopper les flux de nutriments à la source. En d'autres termes cela a permis de chercher une stabilité des débits entrants avec une charge de nutriments qui ne menace pas la fonctionnalité de la lagune et permet la restauration du bon état écologique.

A retenir :

- La modélisation avec GAMELag permet de simuler différents scénarios de gestion et de visualiser leurs conséquences sur l'état de la lagune, en particulier en termes d'eutrophisation ;
- Un scénario théorique sans apport de nutriments du bassin versant montre que la charge sédimentaire a un impact limité sur l'eutrophisation, suggérant que les répercussions des actions sur les apports en eau du bassin versant pourront être rapidement visibles ;
- Treize scénarios de gestion ont été définis en consultation avec les acteurs locaux, regroupés par thèmes (demandes des usagers, Convention de pêche, météo, saisonnalité, épuration par marais périphériques), et évalués en termes d'apports d'eau et de charge en nutriments.

5.3. Dynamique annuelle des compartiments biogéochimiques.

Les multiples modélisations successives ont permis d'obtenir pour chaque scénario des valeurs moyennes mensuelles des compartiments biogéochimiques NID, NT, PID, PT (Tableaux 7 à 10), de chlorophylle a (Tableau 11) et des poids secs d'algues opportunistes (Tableau 12). Les scénarios sont comparés à la situation de référence et aux indicateurs estivaux de la DCE (Annexe 5). Les moyennes présentées intègrent les différents paramétrages utilisés dans la situation de référence qui donnent une plage de réponses possibles. La fourchette de valeurs (min-max) que chaque scénario produit n'est pas indiqué dans ces tableaux.

5.3.1. Azote

L'indicateur NID sépare les scénarios en deux typologies de fonctionnement de la lagune : les scénarios, incluant la situation de référence où en été le NID est complètement consommé, indiquant donc une limitation de la production primaire par ce paramètre et d'autres scénarios où les concentrations estivales présentes dans la colonne d'eau sont très élevées et se situent dans la fourchette qui définit la lagune comme étant dans un mauvais état écologique (Tableau 7).

Cela peut sembler contre-intuitif si ce paramètre est analysé isolément, mais en regardant les autres indicateurs, les niveaux élevés de NID présents dans la lagune témoignent d'une inversion du fonctionnement écologique de lagune vers une production primaire limitée par le phosphore. Dans ce cas, les processus de croissance du phytoplancton et des algues opportunistes consomment la totalité du PID disponible dans la colonne d'eau et laisse du NID en excès.

L'augmentation d'un ordre de grandeur plus élevé, est significative. Les scénarios de la Convention de pêche et de la demande des usagers locaux sont les seuls à refléter une diminution des concentrations de NID pendant les mois d'hiver (janvier-février) et mars.

Tableau 5. Moyennes mensuelles sur l'année 2021 des concentrations de NID (azote inorganique dissous) dans la lagune des scénarios testes par rapport à la situation de référence (gris). Les dépassements par rapport à la situation de référence sont indiqués en gris foncé et les réductions en blanc. Les valeurs moyennées en juin juillet août ont été colorées par rapport aux seuils DCE (Annexe 5).

			NID (µmol.L^{-1})											
			janv	fev	mars	avr	mai	juin	juil	aout	sept	oct	nov	dec
	situation repère		20.4	26.1	25.0	14.0	1.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	51.6	56.9
Noms des scénarios	Demande des usagers	demande des pêcheurs	22.3	25.3	25.9	13.8	1.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	52.2	60.8
		ressuyage des parcelles	18.4	23.4	24.6	15.0	1.3	0.1	0.1	0.1	0.1	0.3	51.7	56.9
	Convention de pêche	hivernale	16.4	19.1	23.4	14.1	1.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	51.7	58.8
		printanière	15.4	19.4	23.4	15.5	1.3	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	51.6	57.0
	Météo	Petites crues	20.3	26.1	24.7	13.9	1.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	50.8	55.8
		sécheresse estivale	33.7	40.2	50.6	46.5	28.8	22.4	20.3	32.1	38.6	49.1	76.8	60.5
	Saisonnalité	modérée	25.1	30.5	28.6	15.4	1.3	0.1	0.1	0.1	0.1	0.3	52.4	56.4
		extrême	34.4	39.3	47.7	45.3	29.0	21.7	17.2	28.3	35.2	49.0	76.1	59.7
		contraint	21.5	25.8	27.3	15.5	1.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.3	52.8	57.5
	Saisonnalité avec abbattement annuel	abattement à 25%	32.0	38.5	44.9	44.1	28.3	23.1	20.4	32.5	38.7	49.1	71.9	55.8
		abattement à 50%	29.9	37.4	41.7	42.3	27.4	24.7	23.7	36.4	41.6	48.7	68.1	51.9
	Epuration par marais	Eau du canal	18.3	21.2	22.6	24.8	19.5	18.6	16.1	25.8	34.0	47.6	51.0	35.0
		Eau du canal et rizière	18.2	21.2	22.7	25.1	19.9	18.4	15.9	26.5	34.4	47.8	49.4	33.5

En ce qui concerne l'indicateur NT qui reflète les composantes inorganique et organique d'azote présentes dans la colonne d'eau, les résultats sont moins contrastés entre scénario, ces différentes formes d'azote étant très variables (Tableau 8). Dans l'ensemble, une augmentation pendant les mois d'été et d'automne et une diminution au printemps et en hiver, est constatée. Seuls les deux scénarios représentant la modification de la saisonnalité des apports modérée et gérée, obtiennent des valeurs mensuelles égales ou inférieures à la situation de référence pendant les mois d'été.

Tableau 6. Moyennes mensuelles sur l'année 2021 des concentrations de NT (azote total) des scénarios testes par rapport à la situation de référence (gris). Les dépassements par rapport à la situation de référence sont indiqués en gris foncé et les réductions en blanc. Les valeurs moyennées en juin juillet août ont été colorées par rapport aux seuils DCE (Annexe 5).

			NT (µmol.L^{-1})											
			janv	fev	mars	avr	mai	juin	juil	aout	sept	oct	nov	dec
	situation repère		73.5	81.5	90.5	70.2	56.2	75.0	68.9	61.1	53.8	43.2	99.5	92.3
Noms des scénarios	Demande des usagers	demande des pêcheurs	75.8	81.2	94.9	71.2	56.6	75.8	69.0	61.2	53.7	42.9	101.3	96.4
		ressuyage des parcelles	67.0	73.9	88.1	73.1	57.9	75.2	68.7	61.5	53.7	43.4	99.5	92.6
	Convention de pêche	hivernale	58.7	63.0	84.5	70.2	56.1	74.9	68.8	61.1	53.8	43.2	100.7	94.4
		printanière	57.5	63.1	84.6	76.4	60.8	76.4	69.2	61.2	53.8	43.2	99.5	92.7
	Météo	Petites crues	73.7	82.0	89.9	70.3	56.1	75.5	68.9	61.4	53.7	43.3	98.8	92.5
		sécheresse estivale	72.1	82.1	98.8	85.8	70.8	75.7	76.5	85.2	83.1	81.2	103.4	89.0
	Saisonnalité	modérée	84.4	92.1	101.6	72.2	56.2	75.1	68.8	62.4	53.6	43.7	100.3	92.7
		extrême	73.0	81.1	104.5	86.5	70.3	74.4	74.6	82.7	79.9	80.6	103.6	91.0
		contraint	74.3	81.2	97.9	73.1	56.2	74.6	68.6	62.0	53.6	43.7	101.4	93.7
	Saisonnalité avec abbattement annuel	abattement à 25%	66.0	75.1	91.4	79.9	67.0	75.1	76.3	85.3	82.8	80.3	97.2	83.7
		abattement à 50%	58.4	68.3	77.1	72.2	63.2	76.5	79.2	88.7	85.7	79.7	90.8	76.1
	Epuration par marais	Eau du canal	48.7	54.5	60.6	57.7	59.0	73.1	74.1	80.4	78.6	78.9	73.4	59.3
		Eau du canal et rizière	49.2	54.5	60.8	58.2	59.4	72.4	72.7	80.3	78.6	78.7	71.6	56.9

5.3.2. Phosphore

L'indicateur du phosphore inorganique dissous (PID) diminuant dans la plupart des scénarios (Tableau 9), indique une nette amélioration aux changements de gestion proposés par les différents scénarios par rapport à la situation de référence. Dans certains scénarios seulement, celui de la Convention de pêche hivernale et ceux des saisonnalités modérée ou gérée, une légère augmentation est observée au cours de la saison automne-hiver.

Le phosphore total (PT) indique une tendance générale à la baisse pour l'ensemble des scénarios sauf pour le scénario « Petites crues » qui montre des valeurs égales à la situation de référence (Tableau 10). Par ailleurs, les scénarios de ressuyage des parcelles et Convention de pêche printanière, montrent une augmentation de la concentration moyenne des mois d'avril et de mai, juste avant la période critique estivale.

Tableau 7 Moyennes mensuelles sur l'année 2021 des concentrations de PID (phosphates) des scénarios testes par rapport à la situation de référence (gris). Les dépassements par rapport à la situation de référence sont indiqués en gris foncés et les réductions en blanc. Les valeurs moyennées en juin juillet août ont été colorées par rapport aux seuils DCE (Annexe 5).

			PID (µmol.L^{-1})											
			janv	fev	mars	avr	mai	juin	juil	aout	sept	oct	nov	dec
	situation repère		0.1	0.4	0.1	0.0	0.0	0.5	1.2	1.1	1.0	0.8	1.5	1.8
Noms des scénarios	Demande des usagers	demande des pêcheurs	0.2	0.4	0.1	0.0	0.0	0.5	1.2	1.1	1.0	0.8	1.6	1.9
		ressuyage des parcelles	0.1	0.3	0.1	0.0	0.0	0.5	1.1	1.1	1.0	0.8	1.5	1.8
	Convention de pêche	hivernale	0.1	0.2	0.1	0.0	0.0	0.5	1.2	1.1	1.0	0.8	1.6	1.8
		printanière	0.1	0.2	0.1	0.0	0.0	0.5	1.2	1.1	1.0	0.8	1.5	1.8
	Météo	Petites crues	0.1	0.4	0.1	0.0	0.0	0.5	1.2	1.1	1.0	0.8	1.5	1.7
		sécheresse estivale	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.1
	Saisonnalité	modérée	0.2	0.5	0.1	0.0	0.0	0.5	1.1	1.1	1.0	0.7	1.5	1.7
		extrême	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.1
		contraint	0.1	0.3	0.1	0.0	0.0	0.5	1.1	1.1	1.0	0.7	1.6	1.7
	Saisonnalité avec abbattement annuel	abattement à 25%	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.1
		abattement à 50%	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.1
	Epuration par marais	Eau du canal	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.1
		Eau du canal et rizière	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.1

Tableau 8 Moyennes mensuelles sur l'année 2021 des concentrations de PT (phosphore total) des scénarios testes par rapport à la situation de référence (gris). Les dépassements par rapport à la situation de référence sont indiqués en gris foncé et les réductions en blanc. Les valeurs moyennées en juin juillet août ont été colorées par rapport aux seuils DCE (Annexe 5).

			PT (µmol.L^{-1})											
			janv	fev	mars	avr	mai	juin	juil	aout	sept	oct	nov	dec
	situation repère		3.2	3.4	3.2	2.5	2.4	3.9	4.4	3.9	3.2	2.4	3.7	3.4
Noms des scénarios	Demande des usagers	demande des pêcheurs	3.3	3.4	3.4	2.6	2.4	3.9	4.5	3.9	3.2	2.5	3.9	3.5
		ressuyage des parcelles	2.9	3.0	3.1	2.6	2.5	3.8	4.3	3.9	3.2	2.4	3.7	3.4
	Convention de pêche	hivernale	2.4	2.3	3.0	2.5	2.4	3.8	4.4	3.9	3.2	2.4	3.8	3.5
		printanière	2.4	2.4	3.0	2.8	2.6	3.9	4.5	3.9	3.2	2.4	3.7	3.4
	Météo	Petites crues	3.2	3.4	3.2	2.5	2.4	3.9	4.5	3.9	3.2	2.5	3.7	3.3
		sécheresse estivale	2.3	2.4	2.4	1.8	2.0	2.4	2.4	2.0	1.7	1.1	1.2	1.4
	Saisonnalité	modérée	3.8	4.0	3.6	2.6	2.4	3.8	4.2	3.8	3.2	2.4	3.7	3.3
		extrême	2.3	2.4	2.8	1.9	2.0	2.3	2.3	2.0	1.6	1.0	1.2	1.5
		contraint	3.2	3.4	3.5	2.6	2.4	3.7	4.2	3.8	3.1	2.4	3.8	3.4
	Saisonnalité avec abbattement annuel	abattement à 25%	2.0	2.1	2.3	1.6	1.9	2.3	2.4	2.0	1.7	1.1	1.1	1.4
		abattement à 50%	1.7	1.8	1.8	1.4	1.7	2.3	2.4	2.0	1.7	1.1	1.0	1.2
	Epuration par marais	Eau du canal	1.8	1.9	1.9	1.5	1.9	2.4	2.4	2.0	1.6	1.0	1.0	1.2
		Eau du canal et rizière	1.8	1.9	1.9	1.5	1.9	2.3	2.2	1.9	1.6	1.0	1.0	1.3

En analysant uniquement les concentrations de nutriments dans la colonne d'eau, nous avons constaté qu'il existe deux tendances principales : certains scénarios (« demande d'usagers », « convention de pêche », « petites crues », « saisonnalité modérée et contrainte ») maintiennent

les concentrations de NID et de PID au même niveau que la situation repère et d'autres scénarios (« sécheresse estivales », « saisonnalité extrême », saisonnalité avec abattement annuel », « épuration par marais ») augmentent la concentration de NID mais diminuent la concentration de PID. Ce premier résultat reflète les scénarios qui favorisent un changement dans la dynamique de l'écosystème et donne une indication sur la sensibilité de l'écosystème au phosphore. Ainsi, dans les scénarios où les NID augmentent, cela signifie que la lagune se trouve dans une situation de limitation de la croissance des compartiments biologiques par les PID, ce qui l'empêche de consommer les NID. **La lagune se retrouve donc dans une phase de limitation de la production primaire par le phosphore**. Dans les milieux lagunaires méditerranéens ce basculement d'une limitation de la production primaire par l'azote à une limitation par le phosphore ou une co-limitation par l'azote et le phosphore est le signe d'une restauration de l'état écologique des milieux (Souchu et al. 2010).

5.3.3. Compartiments biologiques

Pour la plupart des scénarios, les concentrations de chlorophylle a, proxy du phytoplancton, augmentent au printemps et diminuent ensuite en été, à l'exception des scénarios correspondant à la Convention de pêche et au ressuyage des parcelles (Tableau 11). Dans certains scénarios, il y a un deuxième pic de chlorophylle a en septembre et octobre suite aux apports estivaux des nutriments. Les scénarios des petites crues et de saisonnalité modérée présentent un faible pic de chlorophylle a au cours des mois d'hiver et des niveaux de concentrations similaires à la situation repère.

Tableau 9 Moyennes mensuelles sur l'année 2021 des concentrations de Chlorophylle a des scénarios testes par rapport à la situation de référence (gris). Les dépassements par rapport à la situation de référence sont indiqués en gris foncé et les réductions en blanc. Les valeurs moyennées en juin juillet août ont été colorées par rapport aux seuils DCE (Annexe 5).

			Chlorophylle a (µg.L^{-1})											
			janv	fev	mars	avr	mai	juin	juil	aout	sept	oct	nov	dec
	situation repère		10.0	4.3	3.8	3.5	1.5	4.1	4.7	4.2	3.4	5.8	7.4	4.4
Noms des scénarios	Demande des usagers	demande des pêcheurs	11.1	4.4	3.9	3.4	1.5	4.1	4.7	4.2	3.4	5.8	7.2	2.9
		ressuyage des parcelles	9.7	4.3	3.9	3.5	1.5	4.1	4.7	4.1	3.4	6.0	7.0	4.4
	Convention de pêche	hivernale	9.8	4.4	3.9	3.4	1.4	4.1	4.7	4.2	3.4	5.9	7.3	3.4
		printanière	9.1	4.4	4.0	3.6	1.4	4.1	4.8	4.2	3.4	5.9	7.2	4.4
	Météo	Petites crues	9.8	4.3	3.7	3.5	1.4	4.1	4.7	4.2	3.4	5.9	7.4	4.5
		sécheresse estivale	5.8	7.9	7.7	4.8	5.1	4.3	4.1	3.9	3.5	3.2	1.8	2.2
	Saisonnalité	modérée	10.5	4.3	3.8	3.4	1.6	4.1	4.7	4.0	3.3	6.3	6.7	4.5
		extrême	5.6	8.4	8.4	4.2	4.5	3.7	3.7	3.6	3.1	2.7	1.4	1.8
		contraint	10.6	4.3	3.9	3.4	1.6	4.1	4.6	4.0	3.3	6.2	6.9	4.2
	Saisonnalité avec abbattement annuel	abattement à 25%	5.2	7.2	8.0	4.3	4.5	4.1	4.0	3.9	3.5	3.1	1.9	2.1
		abattement à 50%	4.2	5.7	6.4	4.2	4.6	4.3	3.8	3.8	3.5	3.1	1.9	1.9
	Epuration par marais	Eau du canal	5.5	7.4	7.8	4.2	4.6	3.8	3.7	3.6	3.1	2.7	1.6	1.9
		Eau du canal et rizière	5.8	7.5	8.0	5.1	5.2	4.5	4.1	3.9	3.4	3.0	1.8	2.1

Au niveau des algues opportunistes, les scénarios présentent deux ordres de grandeurs différents : (1) une production globale plus forte ou similaire à la situation de référence dans les scénarios où les apports estivaux sont conservés et (2) des niveau deux ordres de grandeurs plus faibles dans les scénarios où la saisonnalité et la qualité des apports a été modifiée pour réduire les apports estivaux (Tableau 12). Les deux scénarios de saisonnalité modérée et gérée qui

présentent des niveaux égaux à la situation repère, montrent que les algues opportunistes ne sont pas aussi sensibles à la saisonnalité et que des réductions de nutriments sont nécessaires. La forte réduction des apports estivaux entraîne une limitation marquée de la croissance des algues opportunistes. Leur pic de développement, moins prononcé, se situe principalement en mai et juin. Ce constat corrobore la tendance observée pour les NID, dont les concentrations restent élevées dans les scénarios caractérisés par une faible biomasse d'algues opportunistes. La croissance algale étant contrainte par la disponibilité en PT et PID, le NID tend à s'accumuler dans la colonne d'eau, ce qui peut conduire à des dépassements des seuils DCE sans pour autant refléter un mauvais état écologique de la lagune. Il apparaît donc essentiel de s'appuyer sur une combinaison d'indicateurs biogéochimiques pour appréhender le fonctionnement global de la lagune.

Tableau 10 Moyennes mensuelles sur l'année 2021 des poids secs des algues opportunistes des scénarios testes par rapport à la situation de référence (gris). Les dépassements par rapport à la situation de référence sont indiqués en gris foncé, les réductions modérées en gris clairs et des réductions de deux ordres de grandeurs en blanc.

			Algues Opportunistes (gPS.m^{-3})											
			janv	fev	mars	avr	mai	juin	juil	aout	sept	oct	nov	dec
	situation repère		**148.8**	**141.8**	**139.0**	**160.5**	**212.8**	**218.5**	**169.1**	**149.6**	**157.5**	**185.4**	**187.0**	**175.6**
Noms des scénarios	Demande des usagers	demande des pêcheurs	147.8	140.4	137.9	160.3	213.7	217.3	167.4	147.6	155.7	183.6	185.3	174.1
		ressuyage des parcelles	143.5	136.6	133.9	154.7	206.8	214.5	165.9	147.0	155.4	183.3	184.8	173.6
	Convention de pêche	hivernale	148.9	141.5	138.6	160.0	212.3	218.3	169.2	149.9	157.9	185.8	187.4	176.1
		printanière	148.7	141.5	138.7	160.4	215.5	223.1	170.1	149.9	157.7	185.6	187.2	175.8
	Météo	Petites crues	150.4	143.3	140.4	162.1	214.6	219.9	168.9	149.5	157.5	185.5	186.9	175.6
		sécheresse estivale	3.6	3.7	4.2	6.7	10.6	8.9	4.9	3.0	2.2	2.5	2.9	2.8
	Saisonnalité	modérée	132.0	125.9	123.7	144.2	194.1	202.6	157.2	140.7	150.2	178.1	179.4	168.6
		extrême	1.0	1.0	1.0	1.5	2.5	2.4	1.3	0.6	0.3	0.2	0.2	0.2
		contraint	134.8	128.2	125.9	146.5	196.6	203.6	158.3	141.8	151.4	179.5	180.9	170.0
	Saisonnalité avec abbattement annuel	abattement à 25%	3.3	3.3	3.8	6.1	9.4	7.8	4.3	2.7	2.1	2.4	2.7	2.6
		abattement à 50%	5.3	5.3	6.1	9.5	14.5	12.0	6.9	4.6	3.7	4.2	4.7	4.6
	Epuration par marais	Eau du canal	5.4	5.2	5.9	9.0	12.9	10.9	6.8	4.2	2.8	2.4	2.4	2.3
		Eau du canal et rizière	4.7	4.6	5.1	7.7	11.3	9.6	5.8	3.5	3.5	2.3	2.0	1.9

Les résultats en nutriments dans la colonne d'eau et les paramètres des compartiments biologiques permettent d'avoir une image complète de la dynamique de production primaire annuelle de la lagune au cours des saisons. Ainsi il est essentiel que les flux de nutriments et les apports d'eau soient minimaux au cours des saisons printanière et estivale, où la lagune est fortement productive pour limiter l'accessibilité aux nutriments dans la colonne d'eau et de ce fait les efflorescences successives d'algues opportunistes.

Les scénarios qui limitent la croissance des algues opportunistes et régulent également la croissance du phytoplancton sont les scénarios de « saisonnalité avec abattement annuel » et dans la même logique se trouvent les résultats des scénarios « épuration par marais périphériques ». Ce dernier scénario propose une solution avec des changements dans la gestion locale mais ne prévoit pas l'augmentation future potentielle des flux de nutriments provenant du canal et des marais périphériques de l'étang de Campignol. Cette augmentation pourrait à long terme dépasser la capacité épurative des marais et par conséquence dégrader l'habitat roselière périphérique qui ne pourrait plus jouer son rôle épuratif.

Ces scénarios ont été présentés et discutés au comité de pilotage avec l'ensemble des acteurs locaux où ont été filtrés et identifiés collégialement les scénarios qui améliorent la fonctionnalité de la lagune par rapport au phénomène d'eutrophisation. Ainsi, il a été déterminé que le scénario qui répond à l'urgence actuelle d'améliorer la fonctionnalité de l'écosystème lagunaire et de lutter contre l'eutrophisation est le scénario « d'épuration par les marais périphériques ». Plus spécifiquement, ce scénario répond aux principaux objectifs suivants :

(i) Récupérer la dynamique saisonnière des apports de surface ;
(ii) Réduire la charge estivale en nutriments ;

Cette première conclusion permettra de guider les gestionnaires locaux pour promouvoir les changements et rassembler tous les acteurs du territoire. Les scénarios de réduction annuelle des nutriments visent à prévenir la croissance démographique attendue dans le bassin de l'Aude et à montrer la nécessité de prendre des mesures à l'échelle du bassin versant pour retenir les flux de nutriments plus près de la source afin d'éviter l'augmentation des quantités d'azote et de phosphore acheminées vers la lagune**. Actuellement en surcharge de nutriments, l'écosystème de l'étang de Campignol ne peut pas faire face à une augmentation supplémentaire des flux de nutriments entrants.**

À retenir :

- En considérant uniquement les nutriments de la colonne d'eau, les scénarios qui permettent une diminution des concentrations en PID et PT dans la colonne d'eau en période estivale sont : « Saisonnalité avec abattement annuel », ainsi que « Epuration par les marais ». Ces scénarios ont en commun un changement de la saisonnalité des apports des volumes d'eau pour des volumes plus importants en hiver.

- En considérant les paramètres biologiques, les scénarios les plus performants sont « saisonnalité avec abattement annuel de 50% » et « épuration par marais périphériques » où les croissances du plancton et des algues opportunistes sont diminuées par la disponibilité du PID dans la colonne d'eau.

- Cette modélisation permet de conclure que la limitation des algues opportunistes dépend du retour de la saisonnalité des apports et de la mise en place d'une épuration des flux entrant. De ce fait le scénario « d'épuration par les marais périphériques » a été choisi en concertation pour initier la restauration de l'écosystème.

6. Scenario de gestion envisagé à court terme : « Epuration par marais périphériques »

6.1. Dynamique saisonnière

6.1.1. Dynamique hivernale

Par rapport à la situation de référence, les apports de nutriments en provenance de l'interface Bassin versant sont plus faibles dans ce scénario. Les entrées de matière organique en provenance des interfaces Bassin versant et Ayrolle sont compensées par les quantités sortantes vers l'interface Ayrolle (Figure 21). Au niveau du compartiment sédimentaire, le stockage de nutriments sous formes organiques et le relargage de nutriments sous formes dissoutes sont aussi de même grandeur et plus faibles que dans la situation repère. Ainsi, les phosphates dans la colonne d'eau sont rapidement consommés et la présence de zooplancton est minime. Ces conditions entraînent la faible accumulation de nutriments dans la colonne d'eau et favorisent la présence d'herbiers, qui sont plus sensibles aux changements de turbidité que peuvent entraîner des blooms phytoplanctoniques.

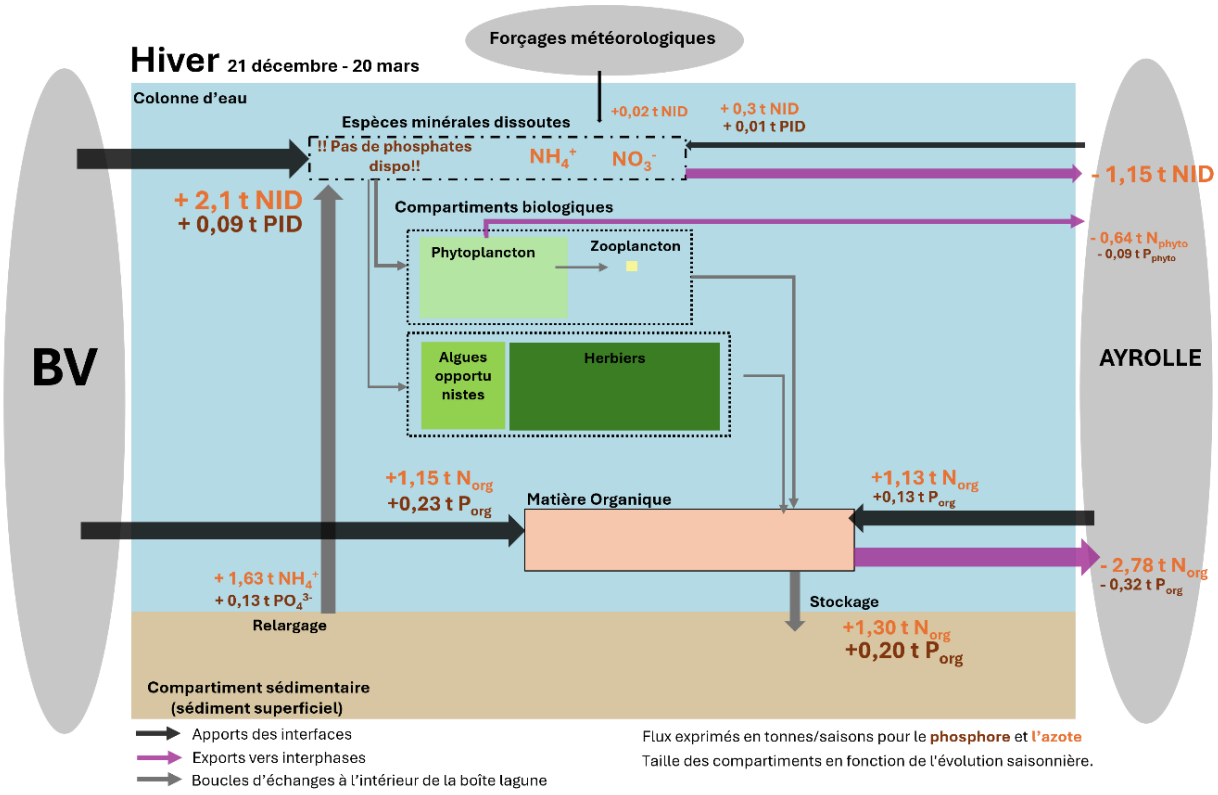


Figure 21 Schéma conceptuel des interfaces et compartiments de l'étang de Campignol en période hivernale, les flèches représentant les flux de nutriments entrants (noires), sortants (violet) et entre compartiments (grises). La taille des composantes donne une indication sur les échanges de nutriments les plus importants et les compartiments stockant davantage de nutriments.

6.1.2. Dynamique printanière

Comme dans la situation de référence, l'augmentation de la température et l'allongement de la durée du jour activent la production primaire de la lagune et les processus de minéralisation de la matière organique dans les sédiments. Le compartiment des herbiers montre une compétitivité accrue par rapport aux algues opportunistes, en stockant et utilisant davantage de nutriments dissous de la colonne d'eau (Figure 22). Les macrophytes jouent un rôle clé en absorbant activement les nutriments dissous, réduisant ainsi leur concentration dans l'eau. En parallèle, leur développement stabilise les sédiments et alimente le stock de matière organique à dégrader en surface des sédiments. Bien que les conditions deviennent propices à l'augmentation de la minéralisation de la matière organique, il apparaît que le relargage de nutriments dissous est plus faible que le stockage de matière organique dans les sédiments superficiels. A cette période la lagune exporte davantage de matière organique vers Ayrolle qu'elle n'en reçoit.

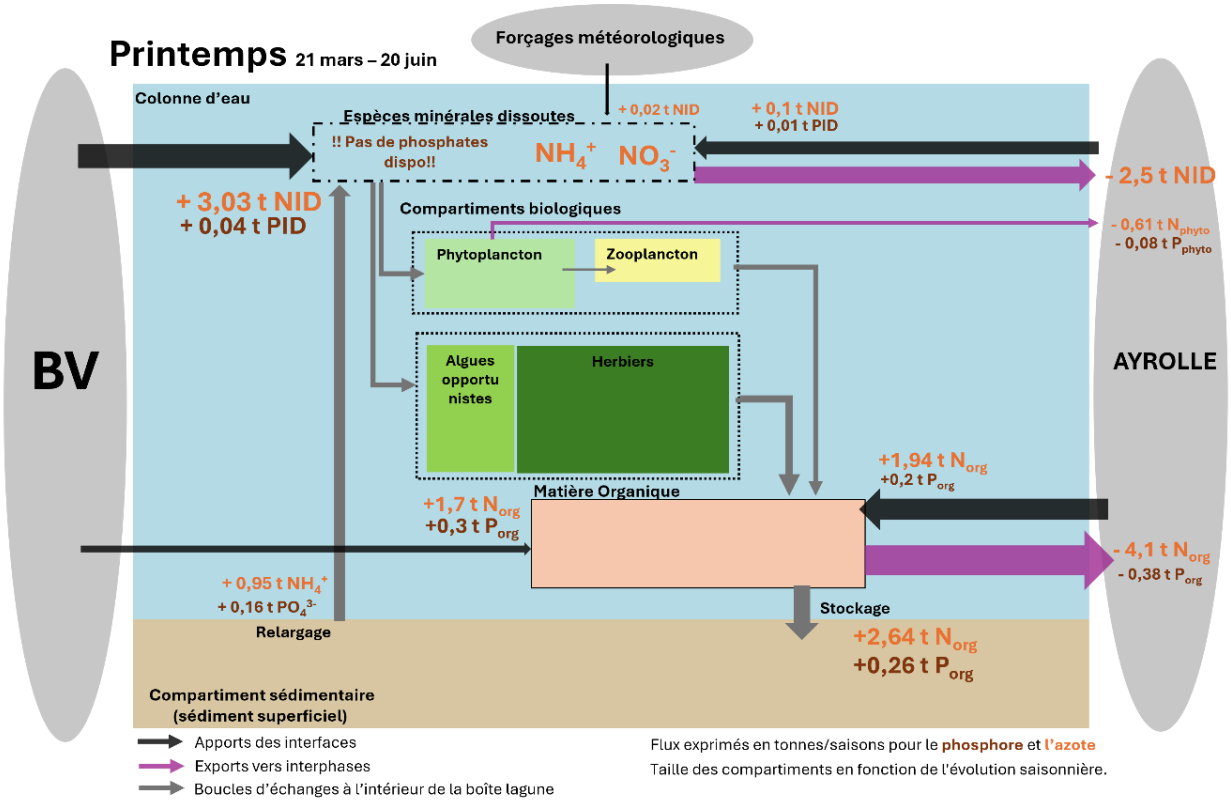


Figure 22 Schéma conceptuel des interfaces et compartiments de l'étang de Campignol en période hivernale, les flèches représentant les flux de nutriments entrants (noires), sortants (violet) et entre compartiments (grises). La taille des composantes donne une indication sur les échanges de nutriments les plus importants et les compartiments stockant davantage de nutriments.

6.1.3. Dynamique estivale

L'apport de matière organique le plus important à cette période provient de l'étang de l'Ayrolle (Figure 23) car les apports hydriques issues de l'interface Bassin versant sont à l'étiage ou volontairement réduits dans ce scénario. Néanmoins ces apports ne dépassent pas la quantité exportée vers la lagune d'Ayrolle. Le dépôt de matière organique augmente dans le sédiment et couplé aux conditions favorisant la minéralisation, le relargage de nutriment vers la colonne d'eau double pour les phosphates et quadruple pour l'ammonium par rapport au printemps. Le

phosphore reste limité et constitue le principal régulateur de la croissance du phytoplancton et des macrophytes opportunistes. Les herbiers se maintiennent en bon nombre par rapport aux algues opportunistes et le zooplancton est présent mais ne joue pas un rôle critique dans la dynamique du phytoplancton.

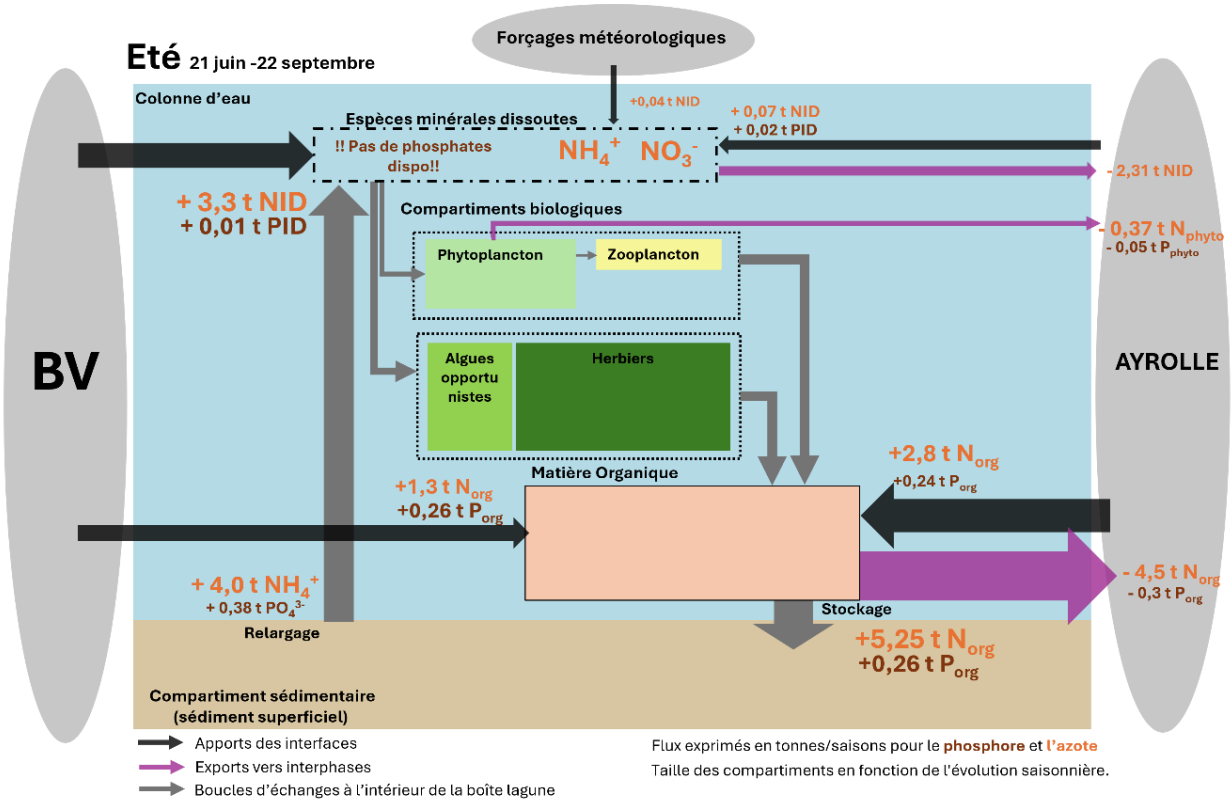


Figure 23 Schéma conceptuel des interfaces et compartiments de l'étang de Campignol en période hivernale, les flèches représentant les flux de nutriments entrants (noires), sortants (violet) et entre compartiments (grises). La taille des composantes donne une indication sur les échanges de nutriments les plus importants et les compartiments stockant davantage de nutriments.

6.1.4. Dynamique automnale

Cette saison est marquée par le retour des pluies qui engendrent le lessivage des nutriments du Bassin versant et donc des apports en nutriments dissous plus importants au sein de la lagune. Cependant ces apports surviennent principalement lors d'épisodes de crue et leurs temps de résidence sont courts, le flux sortant vers la lagune d'Ayrolle est plus important que la charge entrante (Figure 24). Le cascail est un prédateur du phytoplancton, tout comme le zooplancton, dans la présente version, il n'est pas considéré comme une variable d'état distincte. Cependant, nous pouvons en déduire que si la disponibilité du phytoplancton diminue, cela limitera la croissance du cascail. De même, le fait d'éviter les changements de salinité récurrents au profit d'une saisonnalité marquée défavorise sa croissance. Parallèlement, l'absence de zooplancton, qui joue habituellement un rôle de régulateur dans la chaîne trophique, contribue à modifier l'équilibre de l'écosystème. Dans ce contexte, les plantes aquatiques restent présentes et tendent même à dominer en biomasse, surpassant largement les algues opportunistes.

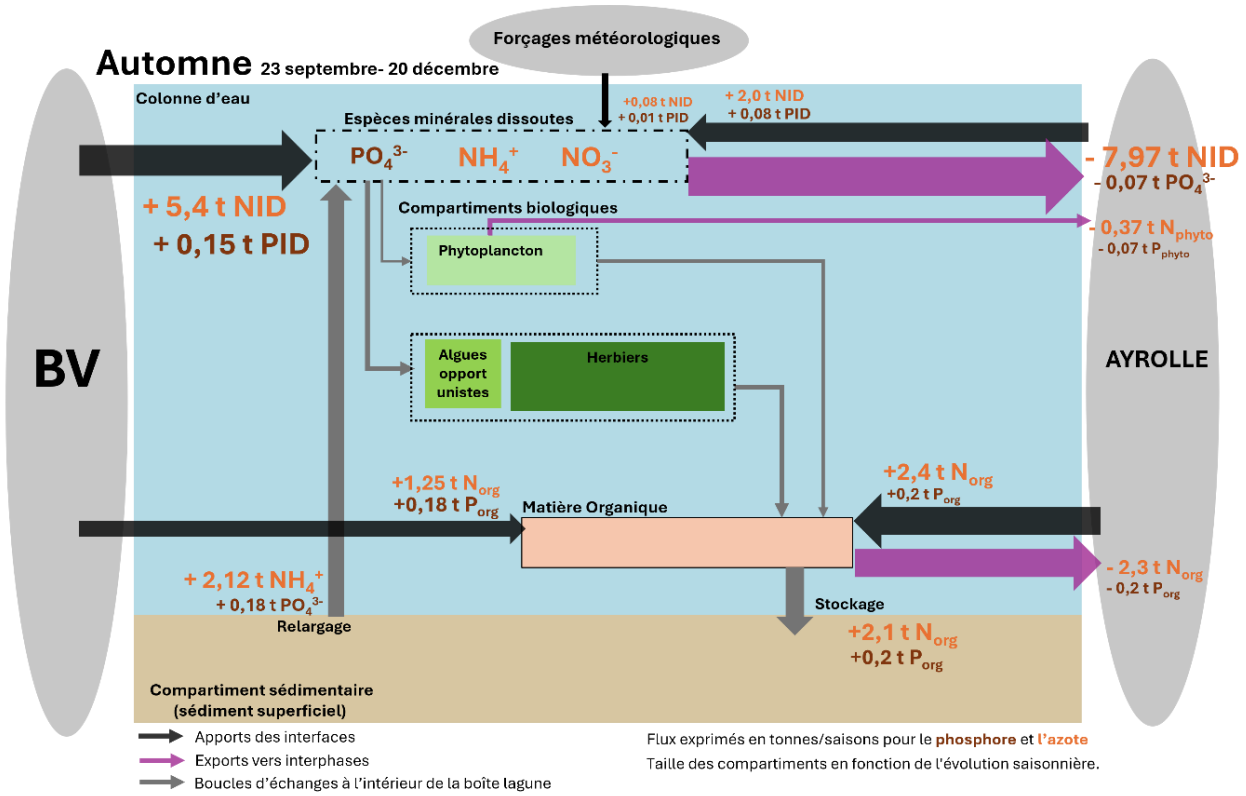


Figure 24 Schéma conceptuel des interfaces et compartiments de l'étang de Campignol en période hivernale, les flèches représentant les flux de nutriments entrants (noires), sortants (violet) et entre compartiments (grises). La taille des composantes donne une indication sur les échanges de nutriments les plus importants et les compartiments stockant davantage de nutriments.

6.2. Réflexion autour des indicateurs DCE

Afin de mieux appréhender les différences entre le scénario retenu et la situation de référence en ce qui concerne l'évaluation selon la DCE, l'évolution des indicateurs de qualité écologique doivent être discutés. Ainsi, les indicateurs de qualité écologique dans la situation repère étaient notés entre les seuils de qualité « moyenne », « médiocre » et « mauvaise », et l'azote inorganique dissous (NID) à l'inverse était fortement consommé par le compartiment biologique : les algues opportunistes, qui dominent l'écosystème lagunaire dans cette situation (Figure 15). Dans le scénario retenu par le comité de pilotage, « épuration du marais périphérique », les indicateurs établis par la DCE sont notés en « bon » et « très bon » état, sauf pour le NID qui reflète une concentration correspondant à la limite de l'état « mauvais » (Figure 25A). Cela s'explique par la limitation en phosphore disponible (Figures 25D et E), qui limite la croissance du compartiment d'algues opportunistes (Figure 25F), engendrant une accumulation de NID dans la colonne d'eau. Cependant, la plage d'incertitude est très étalée sur l'ensemble des seuils (de « mauvais » à « bon », Figure 25A), et cela correspond à la variabilité des paramétrages utilisés dans la situation repère qui révèle une hétérogénéité du système lagunaire.

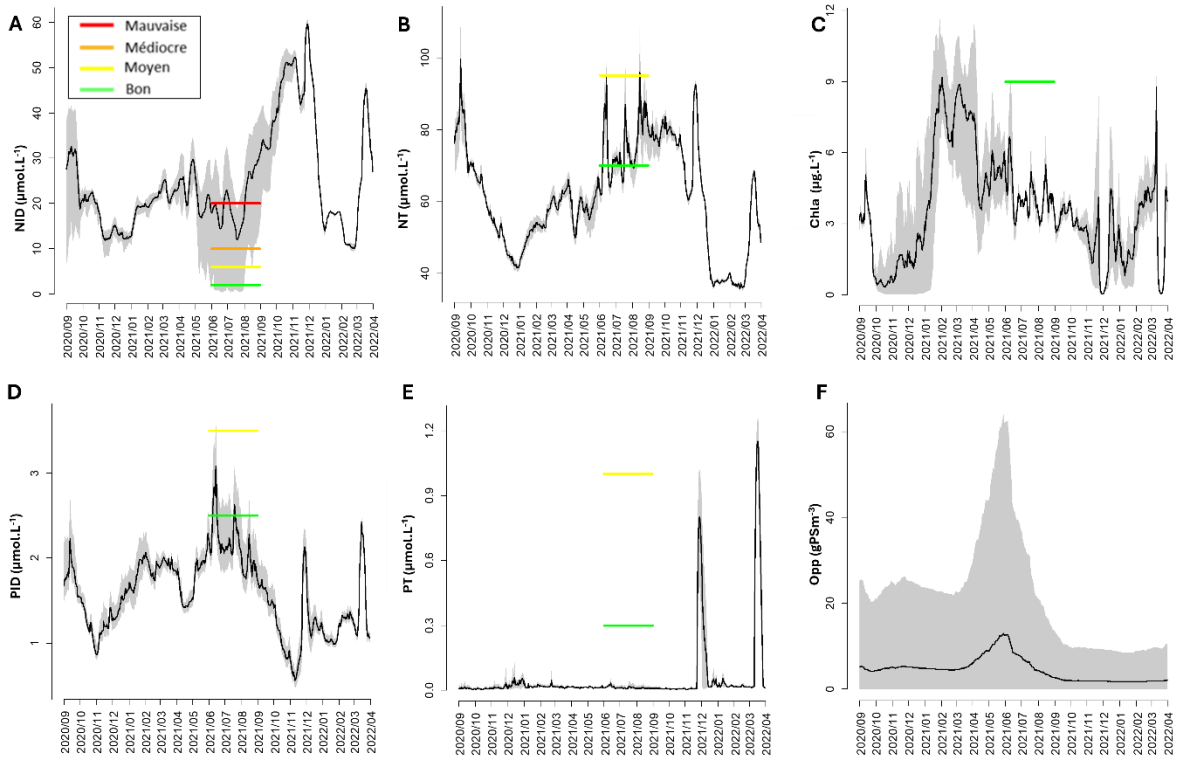


Figure 25. Evolution des indicateurs de la qualité de l'eau modélisés (courbe noire) pour la simulation « épuration par marais » (A) les concentrations en azote inorganique dissous, (B) les concentrations en azote total, (C) les concentrations en Chlorophylle a, (D) les concentrations en phosphore inorganique dissous, (E) les concentrations en phosphore total et (F) l'indicateur de biomasse d'algues vertes opportunistes. Le calque gris représentant la plage des valeurs obtenues avec les différents ensembles de paramètres utilisés pour la situation repère, définissant ainsi l'incertitude du modèle. Les seuils DCE déterminant les états écologiques ont été projetées sur la période estivale.

L'évolution du fonctionnement de l'écosystème devrait être visible dès la première année de mise en œuvre des mesures de gestion, car les sédiments ne représentent pas un stock important de nutriments remobilisables. Cependant, une des limites d'utilisation du modèle pour l'analyse de scénarios est qu'il ne prend pas en compte les conditions climatiques différentes de celles observées dans la situation de référence.

En revanche, le calcul des indicateurs DCE prend en compte les scores obtenus les années précédentes (cycle de 6 ans), de ce fait les résultats du « bon » état écologique peuvent ne pas être obtenus immédiatement, mais uniquement lorsque la lagune est stabilisée et qu'une bonne qualité est maintenue pendant plusieurs années. Il est donc nécessaire de rechercher la pérennisation des actions de restauration ainsi que la limitation de la charge en nutriments provenant du bassin versant.

À retenir dans les résultats pour le scénario sélectionné, « épuration par les marais » :

- La saisonnalité des flux d'eau est rétablie, avec une saison sèche en été et une saison des pluies en automne et en hiver. Les apports de nutriment dissous depuis l'interface Bassin versant au printemps restent inchangés.

- Le phosphore total est limitant pendant trois saisons de l'année (hiver-printemps-été) permettant la limitation des efflorescences d'algues opportunistes et de blooms phytoplanctoniques.

- Tous les indicateurs DCE sont inférieurs à la limite du bon état écologique, à l'exception du NID, qui est excédentaire en raison de la limitation du compartiment biologique par le phosphore.

7. Perspectives et conclusions

La mission Flux Admissibles a constitué une étape clé pour la gestion durable de l'étang de Campignol. Elle a permis de fournir des données scientifiques récentes et fiables, essentielles à la planification d'une gestion à long terme. L'intégration du modèle GAMELag comme outil d'aide à la décision permet désormais de simuler différents scénarios de gestion, d'anticiper les conséquences des mesures locales, d'évaluer les impacts potentiels d'un changement de régime de pluie et d'envisager des actions intégrées à l'échelle du bassin versant.

Ce modèle, basé sur une approche systémique, offre la possibilité d'estimer les flux admissibles en azote et phosphore que la lagune peut tolérer tout en respectant les objectifs du bon état écologique définis par la DCE.

La réussite des mesures de gestion recommandées, en particulier la réduction des apports de nutriments à la source, dépend d'un suivi rigoureux et durable. Ce suivi est indispensable pour évaluer l'efficacité des actions menées, ajuster les stratégies de restauration et suivre l'évolution des indicateurs écologiques. Une attention particulière doit être portée à la dynamique des stocks sédimentaires, qui jouent un rôle clé dans le recyclage des nutriments et la résilience du système lagunaire.

Les résultats de cette étude, confirmés par des mesures antérieures sur les sédiments, indiquent que dans le cas de l'étang de Campignol, les sédiments ne constituent pas une source majeure de nutriments. Par conséquent, la diminution des apports de nutriments via les flux entrants pourrait produire des effets bénéfiques sur la qualité de l'eau et le fonctionnement lagunaire, potentiellement dès la première année de mise en œuvre des actions. Cette réactivité du système souligne l'importance d'agir sans délai pour réduire les pressions à la source.

La gestion élargie à l'ensemble du bassin versant apparaît donc comme une priorité à court terme. Elle doit s'appuyer sur une concertation étroite entre les acteurs du territoire afin de promouvoir l'abattement des nutriments à la source, condition *sine qua non* pour garantir l'efficacité des actions locales et la restauration durable de la lagune.

Enfin, l'approche intégrée : combinant modélisation, suivi écologique et gouvernance partagée, représente la voie la plus prometteuse pour inverser les trajectoires d'eutrophisation et préserver les fonctions écologiques et les usages de l'étang de Campignol à long terme.



Pour garantir l'efficacité de cette démarche, il est essentiel de coordonner les efforts à différentes échelles, en anticipant la croissance démographique du bassin et en veillant à ce que les politiques mises en place protègent durablement les initiatives locales.

Références

Barral, Marc, Valérie-Claude Sourribes, Emeline Bourgeois, Eglantine Gavoty, Nathalie Barré, et Charlyne Tillier. 2007. *Vers une gestion intégrée des lagunes méditerranéennes, Tome 1 : synthèse générale*.

Boutron, Olivier, Patrick Grillas, Samuel Hilaire, Hugo Fontès, Emilie Luna-Laurent, et Béatrice Bec. 2022. *Campagne de surveillance 2021 de l'état DCE des lagunes méditerranéennes oligo- et mésohalines françaises pour la physico- chimie, le phytoplancton et les macrophytes*. Tour du Valat / Agence de l'Eau Rhône Méditerranée Corse.

Cabinet HYDRIAD Eau et Environnement, Cabinet Autrement Dit, Anaïs Giraud, Stéphane Stroffek, H Giot, et O Fontaine. 2022. *Estimer les flux de nutrimets apportés aux lagunes méditerranéennes: une étape clé pour definir une stratégie de maîtrise de leur eutrophisation. Préconisations méthodologiques*. eau & connaissance. Agence de l'eau Rhône Méditerranée Corse.

Cocquempot, Lucie, Christophe Delacourt, Jérôme Paillet, et al. 2019. « Coastal Ocean and Nearshore Observation: A French Case Study ». *Frontiers in Marine Science* 6 (juin). https://doi.org/10.3389/fmars.2019.00324.

Derolez, Valérie. 2013. *Réseau de Suivi Lagunaire du Languedoc-Roussillon : Bilan des résultats 2012*. Rapport RSL-13/2013. Avec Annie Fiandrino, Ines Le fur, Dominique Munaron, et Jocelyne Oheix. Ifremer.

Derolez, Valérie, Béatrice Bec, Dominique Munaron, et al. 2019. « Recovery Trajectories Following the Reduction of Urban Nutrient Inputs along the Eutrophication Gradient in French Mediterranean Lagoons ». *Ocean & Coastal Management* 171 (avril): 1-10. https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2019.01.012.

Deslous-Paoli, Jean-Marc. 1996. « Atelier: Lagunes Méditerranéennes ». Programme National d'oceanographie cotiere, octobre. https://archimer.ifremer.fr/doc/00341/45245/44681.pdf.

Drobinski, P., V. Ducrocq, P. Alpert, et al. 2014. « HyMeX: A 10-Year Multidisciplinary Program on the Mediterranean Water Cycle ». *Bulletin of the American Meteorological Society* 95 (7): 1063-82. https://doi.org/10.1175/BAMS-D-12-00242.1.

Fiandrino, Annie, Romain Pete, Anaïs Giraud, et al. 2022. *Le modèle GAMELag pour l'étude du fonctionnement des écosystèmes lagunaires méditerranéens : synthèse des caractéristiques techniques et utilisation*. septembre 13. https://archimer.ifremer.fr/doc/00803/91518/.

Giordano, Laure, Cédric Provost, Muriel Gevrey, Valérie Derolez, et Christine Argillier. 2010. *Bioindication basée sur les invertébrés en lagunes oligohalines*.

Guillemot, Stella, Anaïs Giraud, Kristell Astier-Cohu, Chantal Graille, Stéphane Stroffek, et Pierre Boissery. 2021. *Etat des eaux lagunaires de Rhône-Méditerranée et de Corse*.

HYDRIAD. 2022. *Bilans annuels des volumes d'eau et de nutriments dans l'étang de Campignol*.

Ifremer. 2014. *Réseau de Suivi Lagunaire du Languedoc-Roussillon: Bilan des résultats 2013*. Rapport RSL-14/2014.

Lauret, Michel, Jocelyne Oheix, Valérie Dérolez, et Thierry Laugier. 2011. *Guide de reconnaissance et de suivi des macrophytes et lagunes du Languedoc-roussillon*. Réseau de Suivi Lagunaire. Ifremer.

Le Fur, Ines. 2018. « Rôle des macrophytes dans la restauration des milieux lagunaires: successions écologiques ». Université de Montpellier. https://veille-eau.com/files/pdf/role-des-macrophytes-dans-la-restauration-lagunaire.pdf.

Ligorini, Viviana, Nathalie Malet, Marie Garrido, et al. 2022. « Long-Term Ecological Trajectories of a Disturbed Mediterranean Coastal Lagoon (Biguglia Lagoon): Ecosystem-Based

Approach and Considering Its Resilience for Conservation? » *Frontiers in Marine Science* 9 (août): 937795. https://doi.org/10.3389/fmars.2022.937795.
Martinez-Espinosa, Columba, Olivier Boutron, et Annie Fiandrino. 2023. *Note technique : besoins d'adaptation de l'outil GAMELag aux lagunes oligo-mesohalines*. Tour du Valat.
Menu, Marion, Sandrine Vaz, Touria Bajjouk, et al. 2019. *Rapport final du projet CHAMILA (Cartographie des habitats en milieu lagunaire méditerranéen)*. Contrat n°2018-0157. Ifremer. https://sextant.ifremer.fr/record/aa238b1d-f9f0-4b82-b894-4713621c2714/.
Munaron, Dominique, Camille Gianaroli, Nicolas Cimiterra, Valérie Dérolez, Vincent Ouisse, et Anaïs Giraud. 2022. *OBSLAG - Pesticides Bilan 2020-2021 du suivi des lagunes méditerranéennes*. ODE/UL/LER-LR/22.12. Ifremer.
Munaron, Dominique, H. Hubert, J.-L. Gonzalez, et al. 2013. *PEPS LAG : Projet Echantillonneurs Passifs Pour la Surveillance de la contamination chimique des LAGunes méditerranéennes*. 10/321149 0. Ifremer.
Orfanidis, S., P. Panayotidis, et K. Ugland. 2011. « Ecological Evaluation Index Continuous Formula (EEI-c) Application: A Step Forward for Functional Groups, the Formula and Reference Condition Values ». *Mediterranean Marine Science* 12 (1): 199. https://doi.org/10.12681/mms.60.
Penman, Howard Latimer. 1948. « Natural Evaporation from Open Water, Bare Soil and Grass ». *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences* 193 (1032): 120-45. https://doi.org/10.1098/rspa.1948.0037.
Sfriso, Adriano, Chiara Facca, et Pier Francesco Ghetti. 2007. « Rapid Quality Index (R-MaQI), Based Mainly on Macrophyte Associations, to Assess the Ecological Status of Mediterranean Transitional Environments ». *Chemistry and Ecology* 23 (6): 493-503. https://doi.org/10.1080/02757540701702918.
Sfriso, Adriano, Chiara Facca, et Pier Francesco Ghetti. 2009. « Validation of the Macrophyte Quality Index (MaQI) Set up to Assess the Ecological Status of Italian Marine Transitional Environments ». *Hydrobiologia* 617 (1): 117-41. https://doi.org/10.1007/s10750-008-9540-8.
Souchu, Philippe, Béatrice Bec, Val H. Smith, et al. 2010. « Patterns in nutrient limitation and chlorophyll a along an anthropogenic eutrophication gradient in French Mediterranean coastal lagoons ». *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 67 (4): 743-53. https://doi.org/10.1139/F10-018.
Trinquier, Christel. 2009. « Le risque d'eutrophisation des lagunes Méditerranéennes : Le cas de la lagune de Thau (Hérault) ». Mémoire de master 1- Science de l'Homme, des Territoites et de la Société. juin. http://download.pole-lagunes.org/LettreLagunes/2009/LL_oct2009/Memoire_trinquier_eutrophisation.pdf.
Veraart, J. A., R. S. De Groot, G. Perelló, N. J. Riddiford, et R. Roijackers. 2004. « Selection of (Bio) Indicators to Assess Effects of Freshwater Use in Wetlands: A Case Study of s'Albufera de Mallorca, Spain ». *Regional Environmental Change* 4 (2-3): 107-17. https://doi.org/10.1007/s10113-004-0070-2.

Annexes

ANNEXE 1

Tableau A1. Variables d'état du modèle, Fiandrino et al. 2022

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

Tableau A2. Valeurs mensuelles des paramètres utilisés pour la confrontation avec les résultats de simulation sur la période repère.

Date	DIN (µmol/l)	PO4 (µmol/l)	DON (µmol/l)	DOP (µmol/l)	NT (µmol/l)	PT (µmol/l)	CHLORO A (µmol/l)
19/01/2021	33.85	0.24	50.53	2.79	88.8	3.33	1.33
24/03/2021	30.39	0.1	21.58	1.16	54.7	1.38	0.71
16/06/2021	8.4	1.36	48.35	1.59	59.7	3.46	11.1
21/08/2021	0.62	0.34	36.59	1.27	38.6	1.78	5.85
27/09/2021	3.66	0.64	43.47	1.23	47.5	1.99	6.39
20/10/2021	2.23	0.25	24.12	0.92	27.5	1.24	3.6
27/11/2021	93.06	1.3	44.74	1.63	139	3.26	1.86
24/12/2021	12.53	0.19	29.05	1.39	42.8	1.61	1.63

CONVENTION

Relative à l'apport d'eau douce vers l'étang de Campignol et ses zones humides périphériques depuis la prise d'eau de Raonel

Préambule :

L'étang de Campignol et ses zones humides périphériques constituent un milieu écologique reconnu de grande importance. Le site est inclus dans le site Natura 2000 des étangs du Narbonnais et fait l'objet de préconisations du Schéma d'Aménagement et de Gestion des Eaux (SAGE) de la basse vallée de l'Aude. Il est classé au même titre que les étangs du Littoral RAMSAR depuis 2006, c'est-à-dire qu'il est reconnu d'importance internationale.

Cet étang connaît depuis près de 40 ans des dysfonctionnements dont les conséquences principales sont les suivantes :

- Mauvaise qualité des eaux de la lagune, pouvant impliquer des crises d'eutrophisations,
- Développement des massifs de « cascail », espèce envahissante révélatrice d'une eau riche en éléments nutritifs,
- Bouleversement des habitats écologiques par le basculement des habitats doux (roselières) vers des milieux plus salés (sansouires),

Un important travail de concertation a été mené et a abouti à la validation d'un Plan de gestion pour la restauration de l'étang de Campignol et de ses marais périphériques.

Une première convention a été conclue en 2004 entre le Conseil Général de l'Aude et l'ASA de Raonel.

Une seconde convention a été conclue en 2012 entre la ville de Gruissan, l'association syndicale autorisée (ASA) de Raonel et Syndicat mixte du delta de l'Aude (SMDA) pour garantir un apport d'eau douce au complexe lagunaire de Campignol.

Le SMDA n'a pas souhaité reprendre cette dernière convention. La communauté d'agglomération du Grand Narbonne, titulaire de la compétence gestion de l'eau et des milieux aquatiques et prévention des inondations (GEMAPI), a été sollicitée et pourrait intégrer ultérieurement la présente convention.

Toutefois, au regard de la situation environnementale et de l'évolution réglementaire, la commune a sollicité l'ASA de Raonel pour préserver sans délai l'apport d'eau douce aux étangs.

Il est rappelé que les missions de l'ASA de Raonel sont les suivantes :

- La distribution des eaux et la gestion des canaux d'irrigation, le portage et la réalisation d'études et travaux permettant de développer toute activité agricole et d'intérêt collectif à l'intérieur du périmètre syndical,

- L'entretien régulier (curage et débroussaillage) des canaux agricoles permettant l'irrigation de son périmètre d'action,
- La manœuvre, la surveillance et le nettoyage des prises d'eau ou de tout ouvrage hydraulique intéressant l'objet de la présente convention.

Ainsi,

Entre la commune de GRUISSAN représentée par : Monsieur Didier CODORNIOU, maire de la commune rue Jules Ferry 11430 GRUISSAN, dûment autorisé par délibération du 15 novembre 2018, d'une part, désigné Ville de Gruissan par la suite,

Et l'Association Syndicale Autorisée de Raonel, représentée par : Monsieur Christian FUERTES, Président de l'ASA, 18 rue Ernest Cognacq 11100 NARBONNE, dûment autorisé par délibération du octobre 2018, désigné ASA de Raonel par la suite, d'autre part

Vu la loi n° 2017-1838 du 30 décembre 2017 relative à l'exercice des compétences des collectivités territoriales dans le domaine de la gestion des milieux aquatiques et de la prévention des inondations (GEMAPI),

Vu le Schéma d'Aménagement et de Gestion des Eaux de la Basse Vallée de l'Aude approuvé par arrêté inter préfectoral n° 2007-11-3580 du 15 Novembre 2007,

Vu le Plan de Gestion de la Ressource en Eau (PGRE), validé le 27 janvier 2017, visant à organiser le partage de la ressource disponible entre les usages et à déterminer l'ensemble des mesures et actions nécessaires à la résorption des déséquilibres ainsi que leur faisabilité technique et économique et leur échéancier.

Vu le DOCOB des étangs du Narbonnais approuvé par l'arrêté préfectoral 2011-006-0006 du 6 janvier 2011,

Vu le plan de gestion de l'étang de Campignol et de ses marais périphériques d'octobre 2008,

Il a été convenu ce qui suit :

Article 1 – Objet :

La présente convention a pour objet de préciser les conditions d'un apport d'eau douce vers l'étang de Campignol, depuis la prise d'eau de l'écluse de Raonel.

L'objectif de cette convention s'inscrit dans le cadre du Plan de gestion pour la restauration de l'étang de Campignol et de ses marais périphériques.

Article 2 – Objectifs des axes de restauration

Les objectifs des axes de restauration du site visent, conformément aux orientations du SAGE, aux objectifs du contrat pour les étangs du narbonnais, à :

- Améliorer la qualité des eaux, notamment en favorisation le rôle épuratoire des zones humides (objectif prioritaire),
- Améliorer le fonctionnement hydraulique des zones humides,
- Favoriser la diversité écologique par la protection, la gestion des zones humides et des espaces remarquables en favorisant la restauration d'habitats naturels doux,
- Restaurer et gérer les marais périphériques,
- Maintenir la ressource halieutique dont la qualité est un indicateur de la bonne santé du milieu.

Compte tenu de l'historique des actions déjà mises en place, il s'agit de privilégier des aménagements simples et nécessitant peu de manipulation par le futur gestionnaire afin de limiter les conflits potentiels et d'envisager une gestion durable de l'ensemble du site.

Article 3 – Stratégie de gestion

Pour répondre aux objectifs de restauration définis précédemment, il est précisé que le parc naturel régional de la narbonnaise en méditerranée (PNRNM) met en place, pour la restauration de l'étang de Campignol, la stratégie suivante :

A. AMELIORER LA QUALITE DE L'EAU DE CAMPIGNOL

1. Ne pas envoyer plus de nutriments (Azote et Phosphore)
    - Limiter les arrivées d'eau directe dans l'étang,
    - Mieux gérer les apports d'eau hivernaux,
    - Supprimer l'apport en eau douce en été pour la lagune.

2. Mieux « épurer » l'eau qui arrive aujourd'hui
   Augmenter l'auto épuration des eaux provenant du bassin versant :
    - Ré ouvrir le marais des Jonquets,
    - Ré ouvrir le marais de Saint Louis,
    - Dévier les eaux de vidange des rizières vers les marais Ouest,

3. Mieux connaître pour pouvoir s'adapter
    - Réaliser un bilan des flux provenant du bassin versant,
    - Améliorer le partenariat avec les ASA (Raonel et Mandirac),
    - Poursuivre les suivis (salinité, O_2 ...).

B. GARANTIR LES USAGES LOCAUX

1. Pêche lagunaire
    - Améliorer la qualité de l'eau arrivant à Campignol,
    - Réaliser une extraction mécanisée du cascail,
    - Signaliser les chenaux et zones libres,
    - Suivre la dynamique du cascail.

2. Chasse au gibier d'eau
    - Garantir la réserve de chasse,
    - Améliorer le marais des Jonquets,

- Améliorer la gestion des hauteurs d'eau sur le Petit Tournebelle,

3. Faire les choix ensemble
   - Comité de suivi de Campignol, animé par le SMDA
   - Diffusion de l'information,
   - Questions, débats,
   - Proposition d'amélioration,
   - Définitions de priorités.

C. CONTRIBUER A LA BIODIVERSITE A L'ECHELLE DU SITE NATURA 2000

- Mosaïque d'habitats à l'échelle des marais et du site Natura 2000,
- Réaliser des suivis écologiques (habitats, oiseaux, poissons, ...),
- Participer aux réflexions sur les étangs du Narbonnais pour la mise en place d'observatoires.

Cette stratégie globale étant rappelée, l'ASA de Raonel et la Ville de Gruissan mettent en œuvre, pour concourir à ces objectifs, les mesures suivantes.

Article 4 – Rôle de l'ASA de Raonel

Par la signature de cette convention l'ASA de Raonel s'engage à :

- Manœuvrer ses ouvrages afin de respecter la stratégie du Plan de Gestion,
- Garantir une ouverture de l'ouvrage du cabanon d'Alger du 1er novembre au 31 mars permettant d'alimenter le canal de Lastours avec 200 Litres / seconde (soit un volume total pour la période d'ouverture de 2 609 000 m^3),
- Relever les données du dispositif de comptage en transit vers les étangs, placé en amont du Cabanon d'Alger, et les transmettre mensuellement, par voie dématérialisée, à la ville,
- Gérer, dans le cadre du PGRE, de manière économe l'eau en période estivale,
- Fournir à la ville un calendrier prévisionnel de submersion et de travaux, et un compte rendu annuel de ces actions, concernant le tronçon de la prise d'eau du Raonel jusqu'à la martelière du Cabanon d'Alger,
- Laisser l'accès de ses ouvrages, sur le tronçon mentionné ci-dessus, aux agents de la commune pour mener à bien les contrôles et mesures nécessaires,
- Informer de façon dématérialisée et sans délai la commune des difficultés rencontrées dans l'application de la présente convention,
- Fournir à la commune une copie de son budget accompagné du compte rendu de la séance plénière de son assemblée générale et de son compte administratif,
- Inviter la commune à ses assemblées générales.

L'adduction d'eau par l'ASA peut être soumise à des contraintes :

- En période de chômage du Canal de la Robine.
- Lorsque les autorités interdisent tout prélèvement sur les eaux de surface.
- En période de travaux ou d'indisponibilités du réseau indépendants de la volonté de l'ASA.

L'ASA s'engage à augmenter le débit lâché, pour compenser les périodes où elle ne serait pas en mesure de satisfaire à son obligation de volume global, étant toutefois précisé que la priorité des l'ASA

reste d'assurer la distribution des eaux et la gestion des canaux d'irrigation, comme le précisent ses statuts.

En cas de problème d'une ou de l'autre des parties, l'ASA et la commune s'engagent à mettre en œuvre une solution concertée ayant l'accord des deux structures.

Article 5 – Rôle de la Ville de Gruissan

La commune s'engage à faire face aux frais supplémentaires de l'ASA de Raonel pour la réalisation des termes de la présente convention (manœuvre, surveillance, entretien, transmission de rapport trimestriel, participation aux réunions ...).

Les signataires conviennent que cette prise en charge des frais supplémentaires s'effectuera sur la base d'un coût de 8 500 € net de TVA.

Des travaux d'investissement sont prévus pour la reprise de la convention en 2018. Il s'agit de renouveler la martelière du « cabanon d'alger ». Les travaux sont estimés à 9 000 € HT. Une fois les travaux réalisés, l'ASA du Raonel communiquera les factures à la ville. La ville financera l'ouvrage avec un amortissement sur 6 années.

Le solde de la convention sera versé après la période printanière de mise en eau.

Le solde de la convention sera versé après la période printanière de mise en eau.

Article 6 – Durée de la convention et renégociation

La présente convention est conclue pour une durée de 3 ans, renouvelable par tacite reconduction.

Toutefois la présente convention pourra prendre fin si l'une des parties notifie à l'autre, par lettre recommandé avec avis de réception, et moyennant un préavis de deux mois, son intention de ne pas laisser la convention se reconduire dans les mêmes conditions pour l'année suivante.

Le débit et le volume mentionnés à l'article 4 pourront être augmentés par avenant à la présente convention, sous réserve du respect des contraintes règlementaires, notamment, étude d'impact et autorisation de prélèvement.

Monsieur Christian FUERTES

Monsieur Didier CODORNIOU

Pour mieux comprendre la construction de ces scénarios et leur intérêt, il est nécessaire de les contextualiser.

Le scénario A.1 correspond à la demande des pêcheurs d'avoir 2 Mm^2 en hiver. Cette demande a été traduite en un volume réparti entre les mois de novembre, décembre et mars. Cela pour deux raisons : en hiver, l'apport d'eau est important lors des épisodes de crues, ce qui provoque le débordement de la lagune. Afin de ne pas contribuer à un excès de volume d'eau, il a été décidé d'ajouter le maximum d'eau que la lagune pourrait recevoir et d'envoyer l'excédent en mars, après la période de fermeture du canal de la Robine. Ce scénario ne prévoit aucune dépuration. À ce moment-là, le volume d'eau proposé n'avait pas encore été officiellement validé, en attendant des preuves montrant qu'il serait bénéfique pour le fonctionnement interne de la lagune.

Le scénario A.2 vise à évaluer l'impact du retrait d'une partie des eaux estivales provenant des cultures, chargées en nutriments.

Les scénarios B.1 et B.2 issus de la Convention de pêche se concentrent sur les effets que chaque calendrier (hivernal ou printanier) pourrait avoir sur le fonctionnement de la lagune, en tenant compte du nouveau calendrier de fermeture du canal de la Robine. Ce calendrier peut être modifié selon les parties prenantes.

Les scénarios météorologiques (C.1 et C.2) sont des scénarios théoriques qui reflètent, d'une part, les effets possibles d'un changement du régime pluviométrique en hiver (sans épisodes de crues) et, d'autre part, un étiage des apports superficiels en été. Ces scénarios ont pour objectif d'observer la réaction du fonctionnement lagunaire face à ces changements hydrologiques potentiels dans le futur, avec la gestion actuelle.

Les scénarios D.1, D.2 et D.3 ont pour objectif général de rétablir la saisonnalité des apports actuels en testant plusieurs modes de fonctionnement avec des mesures ayant différents degrés d'implication dans le changement de gestion actuel.

À la suite des scénarios D, l'aspect qualité a été intégré au scénario D.3, qui a été déterminé comme étant le plus bénéfique pour le fonctionnement global de la lagune. Les scénarios E.1 et E.2 proposent une dépuration constante sur tous les flux, réduisant la charge nutritive de 25 % et 50 % respectivement sur l'ensemble des flux d'eau.

Enfin, les scénarios du volet F mettent en œuvre des mesures de gestion qui combinent les éléments positifs identifiés dans les scénarios précédents, tels que la saisonnalité et la dépuration des flux hivernaux. Ces scénarios répondent à la demande des pêcheurs d'augmenter le volume d'eau en hiver tout en intégrant des actions de dépuration et de récupération des eaux riches en nutriments qui arrivent en été (peu bénéfiques pour l'écosystème). Cette récupération permet de fournir un volume d'eau plus important en automne et en hiver, grâce à des mesures que la gestion locale peut mettre en œuvre sur le terrain.

Tableau A3. Grille de diagnostic de l'état physico-chimique des masses d'eau oligo- et mésohalines.

Paramètre	Unité	Très bon		Bon		Moyen		Médiocre		Mauvais
NID	µmol/L		2		6		10		20	
NT	µmol/L		70		95		115		170	
PO_4^{3-}	µmol/L		0,3		1		1,5		4	
PT	µmol/L		2,5		3,5		4,5		7	

Tableau A4. Grille de diagnostic de l'état du phytoplancton pour des lagunes oligo- et mésohalines.

Paramètre		Très bon		Bon		Moyen		Médiocre		Mauvais	Référence
Abondance (nb cell./L ($x10^6$))	picophyto		20		50		100		500		15
	nanophyto		4		10		20		100		3
Biomasse ([Chla] en µg/L)			9		15		27		51		6
		Très bon		Bon		Moyen		Médiocre		Mauvais	
EQR_A abondance	picophyto		0,75		0,30		0,15		0,03		
	nanophyto		0,75		0,30		0,15		0,03		
EQR_B biomasse			0,67		0,40		0,22		0,12		
EQR_{PHY}			**0,71**		**0,35**		**0,19**		**0,07**		