



Parc naturel régional de la
Narbonnaise en Méditerranée



HYDRIAD[®]
Eau & Environnement

Bilans annuels des volumes d'eau et de nutriments dans l'étang de Campagnol

Etape 1

Campagnes de mesures de débits, de volumes échangés
et de qualité de l'eau ; Estimation des flux de nutriments.
Analyse et interprétation des résultats.



Novembre 2022



TABLE DES MATIERES

1.	Cadre de l'étude	2
1.1.	Contexte et objectifs de l'étude globale	2
1.2.	Nutriments et eutrophisation	3
1.3.	Périmètre de l'étude	6
1.4.	Cadre climatique	8
2.	Matériel et méthodes	11
2.1.	Points de mesure et de prélèvement.....	11
2.2.	Campagnes de mesure ponctuelle.....	12
2.3.	Analyses en laboratoire.....	15
2.4.	Campagnes de mesure à haute fréquence	16
2.5.	Conditions hydro-météorologiques de la période de suivi	17
3.	Suivis hauteur – température – salinité des étangs	20
3.1.	Suivi du niveau d'eau	20
3.2.	Suivi de la température	23
3.3.	Suivi de la salinité	24
4.	Suivi des débits	27
4.1.	Débit du canal de la Réunion	27
4.2.	Débit du principal exutoire des rizières.....	29
4.3.	Débit de la passe entre Campagnol et Ayrolle.....	30
4.4.	Reconstitution de chroniques de débit sur 18 mois	32
5.	Bilan hydrologique sur 18 mois.....	36
5.1.	Apports des pluies et pertes par évapotranspiration.....	37
5.2.	Surplus hydriques des ASA.....	37
5.3.	Pertes du canal de la Robine	38
5.4.	Bilan hydrique par trimestre et sur 18 mois	39
6.	Qualité des eaux	43
6.1.	Mesures physico-chimiques in situ.....	43
6.2.	Analyses des formes de l'azote.....	46
6.3.	Analyses des formes du phosphore	54
7.	Bilan des flux hydriques de nutriments	59
7.1.	Flux d'azote	60
7.2.	Flux de phosphore	63
8.	Conclusions et perspectives.....	67

1. Cadre de l'étude

1.1. Contexte et objectifs de l'étude globale

L'étang de Campagnol connaît depuis plus d'une trentaine d'années des dysfonctionnements avec comme principales conséquences :

- Une dessalure de la lagune en été, ce qui est à l'opposé du fonctionnement usuel d'une lagune méditerranéenne ;
- Une mauvaise qualité des eaux de la lagune du point de vue des nutriments, pouvant impliquer des crises d'eutrophisation et le développement de massifs de cascaill (ver tubicole envahissant entraînant des difficultés pour la circulation des bateaux et la pêche professionnelle).

Les quelques mesures de concentrations en azote et phosphore dans le canal de la Réunion, principal tributaire de l'étang de Campagnol, sont acceptables mais c'est surtout la quantité de matière (flux de nutriments) qui semblent poser problème sur le long terme, en particulier en termes de stockage dans les sédiments.

Face à l'enjeu de reconquête de la qualité écologique de la lagune et aux attentes des acteurs locaux, le Syndicat mixte de gestion du Parc naturel régional de la Narbonnaise en Méditerranée a lancé courant 2020 une étude globale afin de répondre à ces problématiques et d'apporter des éléments de connaissance permettant de définir le flux maximum admissible (FMA ¹) de nutriments pour la lagune de Campagnol.

Pour répondre à ces objectifs, plusieurs étapes chronologiques sont nécessaires.

1. Acquisition des données hydrologiques et chimiques sur les canaux, les étangs et la zone d'échange Campagnol / Ayrolle, bilan des apports d'eau et de matière trophique ;
2. Mise en place d'un outil de modélisation et traitement des données acquises ;
3. Réalisation et analyse de scénarios de gestion sur la base de la compréhension du système et la situation de référence.

Ce rapport concerne l'étape 1 d'acquisition des données hydrologiques et chimiques sur le fonctionnement des canaux, des étangs et de la zone d'échange Campagnol / Ayrolle, et d'établissement d'un bilan des apports d'eau et de matière trophique.

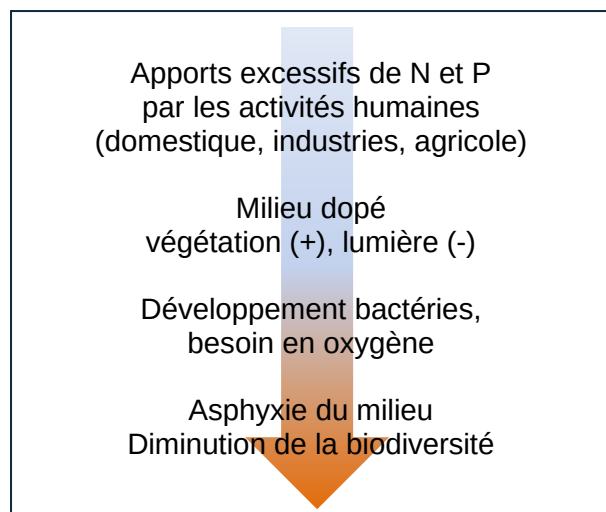
Les connaissances acquises en termes d'hydrologie (débits dans les canaux, hauteur d'eau dans les étangs, etc.), de paramètres chimiques (azote et phosphore), et de flux trophiques sont en effet nécessaires à la compréhension du fonctionnement du système « canaux / étang de Campagnol / étang de l'Ayrolle ».

Cette acquisition de données s'est appuyée sur une campagne de mesures de flux (débits et qualité de l'eau), décrivant des conditions hydrologiques variées (à l'échelle d'une année hydrologique). Initialement prévue sur 12 mois, cette acquisition s'est étirée sur 18 mois afin de pouvoir caractériser des événements hydrologiques de types méditerranéens (crues). Ce rapport présente la synthèse du suivi ainsi réalisé sur 18 mois, de septembre 2020 à mars 2022 sur le périmètre d'étude.

¹ Le FMA d'une lagune est la charge polluante maximale provenant de son bassin versant ne remettant pas en cause le respect de ses objectifs de qualité et son fonctionnement écologique naturel.

1.2. Nutriments et eutrophisation

Le terme 'nutriments' désigne l'ensemble des composés nécessaires à la nutrition des producteurs primaires (phytoplancton, algues, ...) dont les principaux sont le nitrate, le nitrite, l'ammonium et le phosphate. Ils sont naturellement présents dans le milieu (lessivage des sols, dégradation de la matière organique), mais des concentrations excessives peuvent avoir pour origine les rejets urbains (station d'épuration, assainissement non collectif), industriels (industrie agro-alimentaire, laveries, ...), ou agricoles (engrais). Ces apports excessifs de nutriments peuvent induire un phénomène d'eutrophisation.



L'eutrophisation est une réponse de l'écosystème aquatique suite à un apport excessif en nutriments. En réponse à cet apport de nutriments, la végétation présente dans le milieu est "dopée" et croît très fortement, en obstruant progressivement le passage de la lumière. Ces conditions vont favoriser le développement des bactéries nécessaires à la dégradation de cet excédent de végétation. Mais ces espèces, susceptibles d'émettre des gaz toxiques (CO_2 , H_2S , et CH_4), ont-elles-aussi besoin d'oxygène pour fonctionner. Elles vont donc prélever l'oxygène de l'eau, avec comme résultat un déficit d'oxygène. C'est l'asphyxie du milieu, engendrant la mort massive de certains organismes aquatiques et une diminution de la biodiversité.

Les nutriments se retrouvent dans les eaux naturelles sous différentes formes (Figure 1).

L'azote peut se trouver dans les eaux sous deux formes :

- **Azote organique**, pouvant avoir comme origine la décomposition des organismes du monde végétal ou du monde animal présents dans le milieu aquatique, les déjections animales, l'entraînement vers le cours d'eau de la matière organique des sols du bassin versant, les rejets industriels ...
- **Azote inorganique dissous (minéral)** comprenant les formes **ammonium (NH_4) + nitrate (NO_3) + nitrite (NO_2)**, des formes provenant essentiellement d'apports anthropiques. L'ammonium peut cependant provenir également dans les lagunes et zones humides de la décomposition des végétaux et en particulier des algues.

Pour le phosphore, on distingue deux formes (constituant ensemble le phosphore total) :

- **Phosphore dissous (PO_4)** ou minéral pouvant avoir comme origine des sources domestiques (eaux usées urbaines), des sources industrielles (essentiellement de la chimie des engrais), l'agro-alimentaire et l'utilisation de détergents (lessives). Mentionnons cependant que les fientes des oiseaux présents sur les étangs et les zones humides attenantes sont également une source importante de phosphore.
- **Phosphore particulaire** (tout le reste du phosphore) provenant des déjections animales et des sources naturelles dues à l'érosion des sols et à la décomposition de la matière organique.

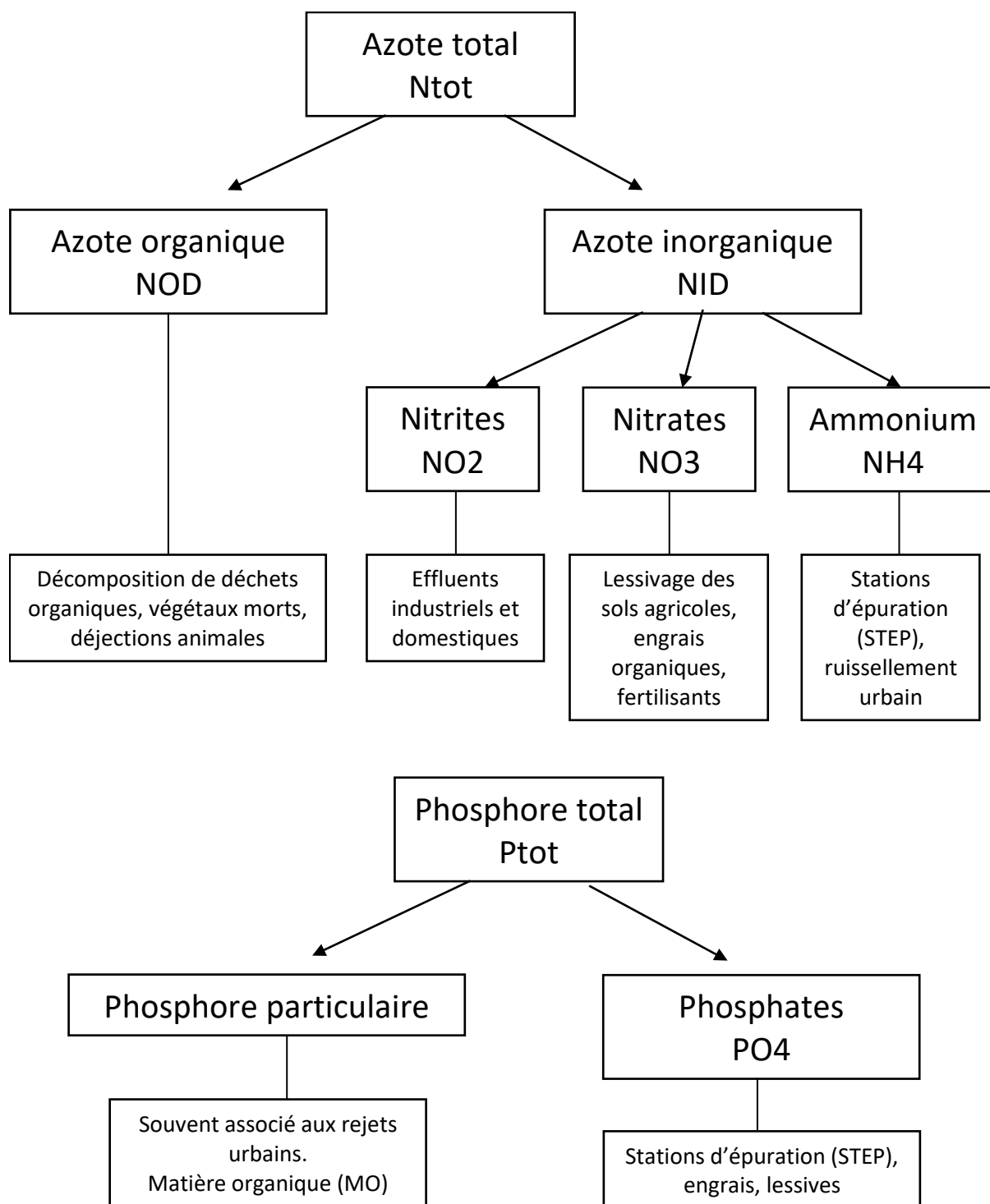


Figure 1 : Formes et origine des nutriments

Les apports peuvent donc être :

- **Domestiques** : Par exemple, dans le cas d'un rejet d'assainissement, collectif ou individuel, d'autant plus s'il est défectueux, des substances indésirables contenues dans les eaux vannes et les eaux ménagères peuvent être transférées (matières organiques, détergents, solvants, antibiotiques, micro-organismes...), ou dans le cas des stations d'épuration urbaines surchargées ... Les ordures ménagères accumulées dans des décharges sauvages ou pas aux normes libèrent également des lixiviats riches en polluants.

- **Industriels** : Les polluants d'origine industrielle sont très variés selon le type d'activité : substances organiques banales, produits organiques de synthèse, hydrocarbures, sels minéraux, métaux lourds... Les pollutions peuvent être exceptionnelles (incident dans un process) mais également encore trop souvent chroniques (fuite de réservoirs, de canalisations...)
- **Agricoles** : La pollution est notamment diffuse, étendue dans l'espace et dans le temps ; elle est chronique et concerne de grandes surfaces. Les pratiques actuelles de culture et d'élevage influencent ainsi fortement le régime et la qualité des eaux. Le transfert hydrique des engrais et pesticides se fait soit par ruissellement ou infiltration, soit par rejet d'effluents dans des cours d'eau, fossés, puits perdus, gouffres et bétouilles. La pratique de l'irrigation peut également accélérer le transfert des nutriments. L'épandage des boues de stations d'épuration, bien que très contrôlée, peut aussi poser problème.
- **Urbains** : En ville, on trouve, en plus de polluants de voirie et de ruissellement prenant place sur les surfaces imperméabilisées (toitures, voiries, parking, ...), ainsi qu'une contamination possible des eaux de surface par des eaux usées (raccordement incomplet ou défectueux, mauvais état des réseaux, surcharge ou mauvais fonctionnement des stations d'épuration).

Le transport de l'azote et du phosphore issus des activités humaines vers les cours d'eau peut être de type :

- **Diffus** : en provenance du bassin versant, les apports proviennent de l'épandage de produits solides ou liquides à la surface du sol sur des superficies importantes. Les sources diffuses sont beaucoup plus difficiles à déterminer et à quantifier spatialement mais aussi temporellement. Elles représentent cependant la majeure partie des apports d'azote et une part significative des apports de phosphore dans les cours d'eau.
- **Ponctuel** : affectant directement le cours d'eau, les apports ponctuels proviennent de points particuliers du bassin versant. Ils peuvent être accidentels ou pérennes. Ils peuvent avoir pour origine des fuites sur des conduites ou des cuves, ou l'infiltration de lixiviats d'un dépôt solide etc. Ils peuvent passer inaperçus. Les sources ponctuelles (par exemple rejets industriels ou stations d'épuration) sont relativement faciles à identifier et à quantifier, pourvu que des mesures soient faites et rendues disponibles, puisque les rejets sont bien repérés spatialement.

Milieux naturels modifiés par les pratiques anthropiques

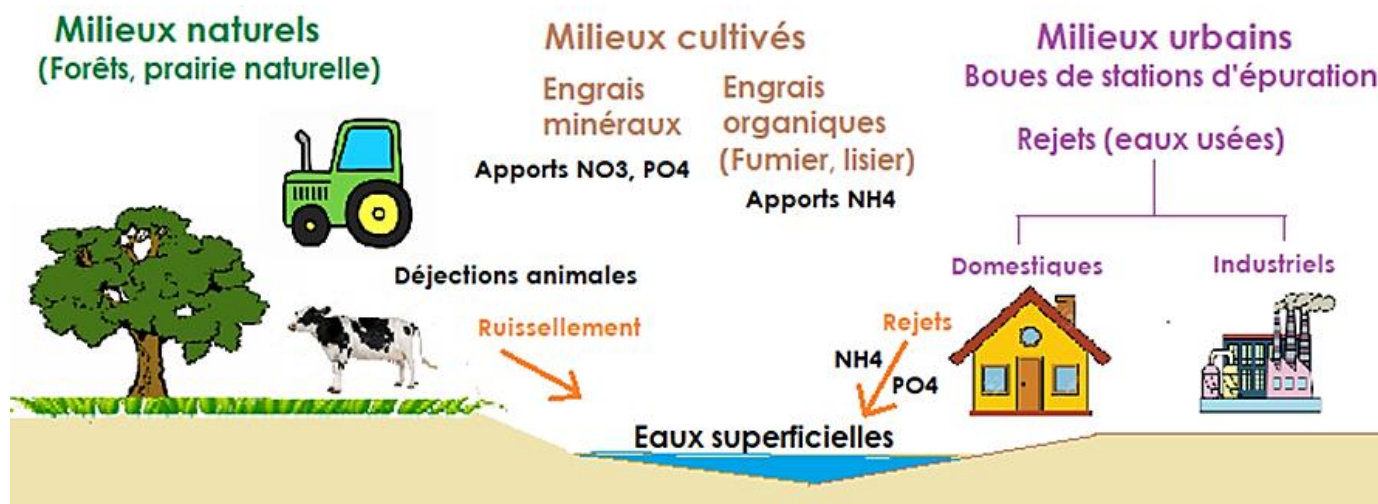


Figure 2 : Sources d'azote et de phosphore d'origine anthropique

Les conséquences des apports ponctuels et diffus sur l'eutrophisation sont similaires. Cependant, leur temps de transit depuis les sources de pollution jusqu'aux écosystèmes aquatiques est différent. Les apports ponctuels sont directement déversés dans les écosystèmes aquatiques alors que les apports diffus transfèrent sur ou à travers les sols, par ruissellement ou écoulement de subsurface ou dans les nappes. Il en résulte que la rétention des apports ponctuels directs ne pourra être effective que dans les écosystèmes aquatiques et leurs annexes (zones inondables, bras morts, sédiments, etc.), alors que les apports diffus pourront être régulés dans les bassins-versants, dans les espaces semi-naturels et agricoles, dans les différentes structures paysagères qu'ils présentent.



Figure 3 : Phénomène d'eutrophisation sur l'étang de Campagnol



Figure 4 : Etang de l'Ayrolle

1.3. Périmètre de l'étude

L'étang de Campagnol est localisé sur la commune de Gruissan entre le massif de la Clape et l'île St-Martin. L'ensemble de la zone humide couvre environ 400 ha, dont 120 ha d'eau libre. L'étang de Campagnol est connecté du côté Sud à l'étang de l'Ayrolle, lui-même relié à la mer.

L'étang de Campagnol est de faible superficie et irrégulièrement alimenté par les eaux de pluie, les eaux apportées depuis l'Aude par le canal de la Réunion (et moindrement par le canal de l'Empereur), et par les eaux drainées des surfaces agricoles, dont des retours d'irrigation de rizières. L'étang communique au Sud avec l'étang de l'Ayrolle par un étroit chenal (passe). Les échanges peuvent être au profit de l'un ou de l'autre des deux étangs selon les conditions de marées, de pluie et de vent. Des entrées d'eau marine peuvent aussi prendre place par l'intermédiaire du canal du Grazel (du côté Gruissan), mais sont limitées lorsque le barrage du Pont jaune est fermé.

L'Ayrolle est quant à lui une vaste lagune en communication directe avec la mer dans sa partie Sud-Est. Son pourtour n'étant presque pas urbanisé, il ne reçoit pas ou très peu d'effluents. Si des résurgences sont évoquées comme source d'eau douce, les dessalures sont essentiellement associées aux apports issus du bassin versant de l'étang de Campagnol qui sert de zone tampon en cas d'inondation dans la basse plaine de l'Aude.

L'étang de Campagnol fait partie du Parc Naturel Régional de la Narbonnaise en Méditerranée et constitue un milieu écologique reconnu de grande importance. L'étang de Campagnol et ses marais périphériques font partie des sites Natura 2000 « Etangs du Narbonnais » (ZPS ; FR9112007 ; désigné en 2006) et « Complexe lagunaire de Bages-Sigean » (ZSC ; FR9101440 ; désigné en 2008). L'étang de Campagnol est également inclus dans une zone ZNIEFF, ZICO et un site RAMSAR. L'étang fait l'objet de préconisations dans le Schéma d'Aménagement et de Gestion des Eaux de la Basse Vallée de l'Aude (SAGE BVA).

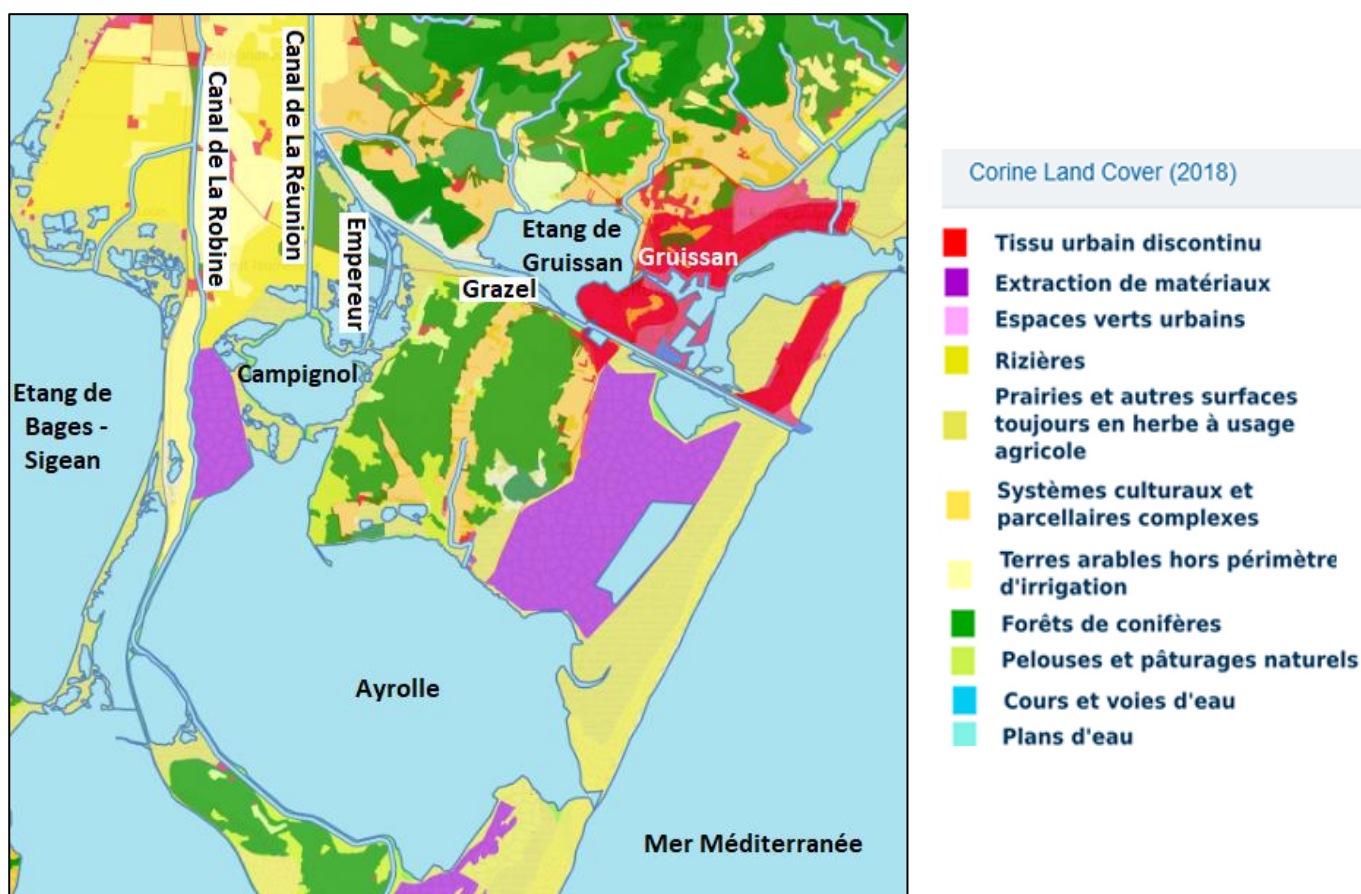


Figure 5 : Occupation des sols (Corine Land Cover 2018 - Geoportail)

La zone humide de Campagnol se situe en domaine public maritime. En plus de son fort intérêt écologique, l'étang de Campagnol est le support de plusieurs activités humaines dont la pêche lagunaire

professionnelle (notamment basée sur l'anguille) et la chasse au gibier d'eau. Elle est classée comme Réserve de Chasse dont la gestion incombe à la Fédération départementale des Chasseurs de l'Aude.

1.4. Cadre climatique

Le bassin versant de Campagnol bénéficie d'un climat tempéré chaud. En hiver, les pluies peuvent être importantes mais sont très variables d'une année sur l'autre. Les précipitations annuelles moyennes sont de 635.3 mm (période 1989-2022) et la température annuelle moyenne de 15.3 °C.

Les données de précipitations des 23 dernières années de la station Météo-France de Narbonne ont été acquises afin de caractériser la variabilité interannuelle des pluies. La précipitation annuelle (année hydrologique d'août à juillet) varie de 345.5 à 961.5 mm sur la période 1999-2022, avec une moyenne de 580 mm. L'année 2020-2021 (année d'étude) a été la seconde année la plus sèche de la période (Figure 6), alors que l'année 2021-2022 a été parmi les plus arrosées.

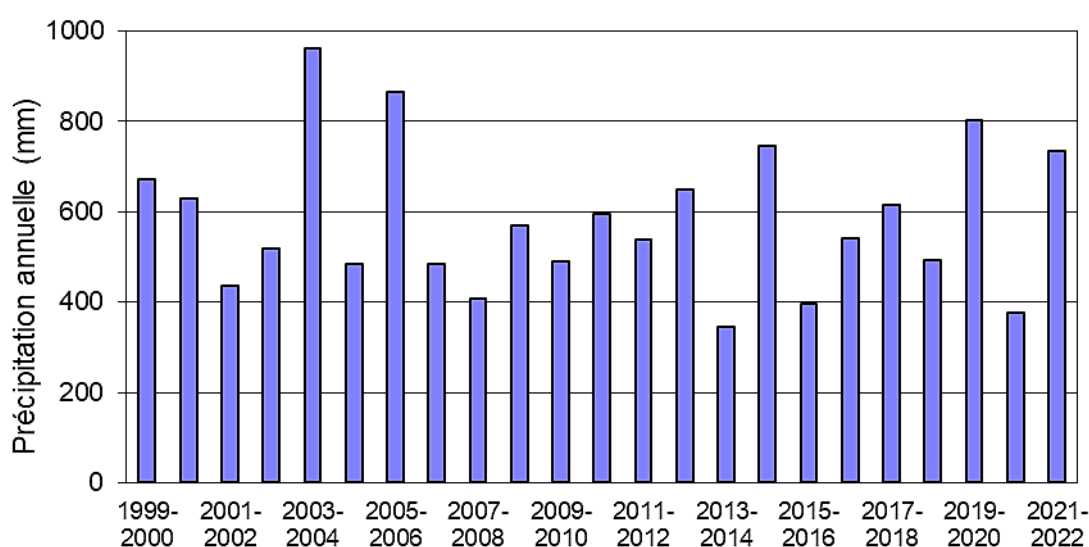


Figure 6 : Précipitations annuelles des 23 dernières années à la station Météo-France de Narbonne (années hydrologiques d'août à juillet)

De façon statistique, les pluies sont très importantes en octobre et novembre (Figure 7), période des événements orageux méditerranéens. Un second pic prend place en janvier et un troisième en avril.

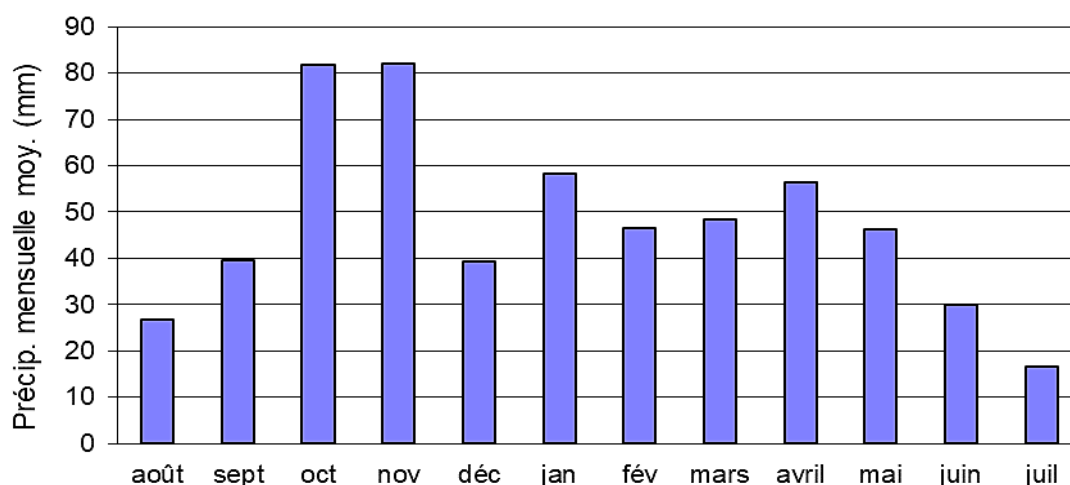


Figure 7 : Précipitations mensuelles moyennes des 23 dernières années à la station Météo-France de Narbonne

Les données d'évapotranspiration potentielle (ETP) ont également été acquises afin de calculer les précipitations efficaces sur cette même période (Figure 8). On constate que 8 années sur 23 ont des précipitations efficaces nulles, soit 1 sur 3 statistiquement. Leur survenance est plus ou moins régulière. La précipitation efficace moyenne interannuelle est de 92.8 mm. Cette valeur est intermédiaire entre les valeurs estimées par le projet S.A.Li.N. (Salinisation des Aquifères Littoraux de la Narbonnaise, porté par un consortium associant le Parc naturel régional, Le Grand Narbonne, le BRGM et l'institut Agro de Montpellier) de 114.8 mm pour la période 1981-2010 et de 89.3 mm pour la période 2021-2040.

Les précipitations efficaces mensuelles prennent place statistiquement entre novembre et janvier (Figure 9). Le mois de novembre présente la plus forte pluie efficace et génère plus du tiers de la pluie efficace annuelle. La période allant d'avril à septembre ne présente (statistiquement) quasiment pas de précipitations efficaces.

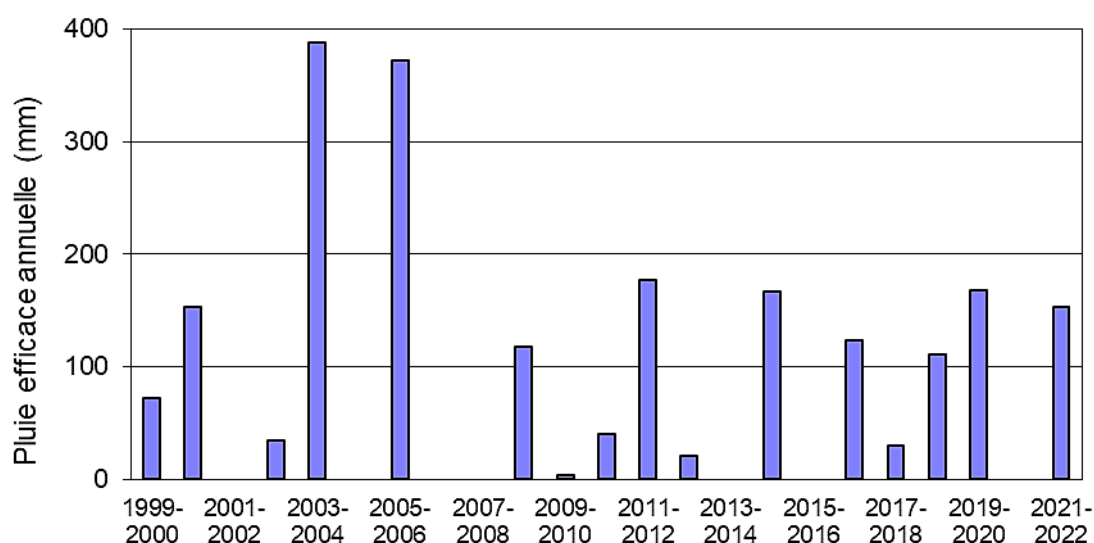


Figure 8 : Précipitations efficaces annuelles des 23 dernières années à la station Météo-France de Narbonne (années hydrologiques d'août à juillet)

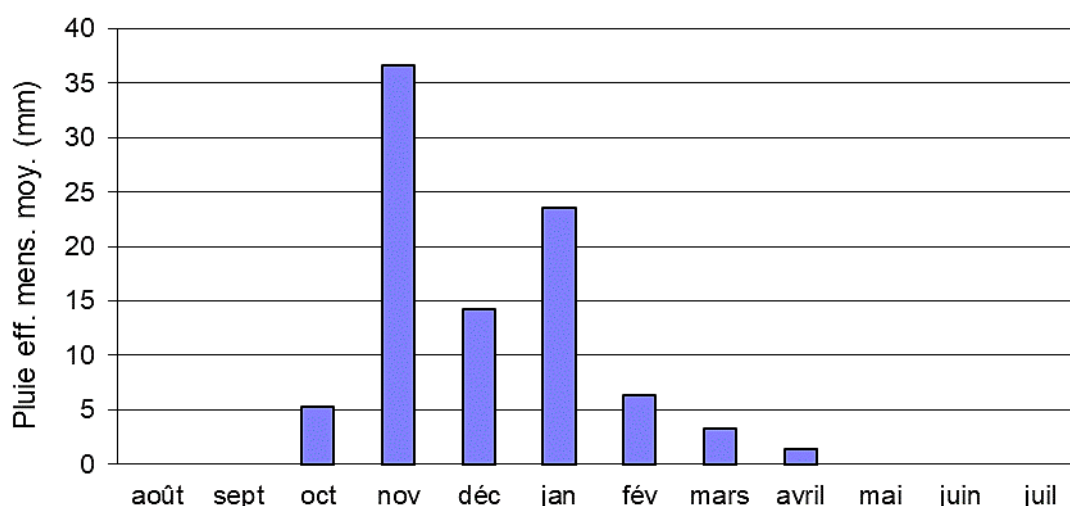


Figure 9 : Précipitations efficaces mensuelles moyennes des 23 dernières années à la station Météo-France de Narbonne



Figure 10 : Amont du Pont des Pâtres en crue



Figure 11 : Canal de l'Empereur à sec

Les vents soufflent principalement de l'ONO (Figure 12), direction de la tramontane (également dénommée cers). Du fait de l'orientation de l'étang de l'Ayrolle et de la position de son exutoire (Figure 5), la tramontane favorise la sortie vers la mer de l'eau de l'Ayrolle et conséquemment celle de Campagnol. Durant ces périodes (qui représentent la majeure partie des périodes de vent), les niveaux d'eau de l'Ayrolle et de Campagnol sont très bas, et difficilement navigables. Une seconde direction s'observe sur la rose des vents dans le secteur ESE, correspondant au vent de mer ou marin. Le marin est responsable de l'entrée d'eau de mer dans l'Ayrolle et dans le canal du Grazel, tous deux contribuant à un apport d'eau de mer à Campagnol. Durant ces périodes, les niveaux de l'Ayrolle et de Campagnol peuvent être très hauts et engendrer une submersion des marais environnants.

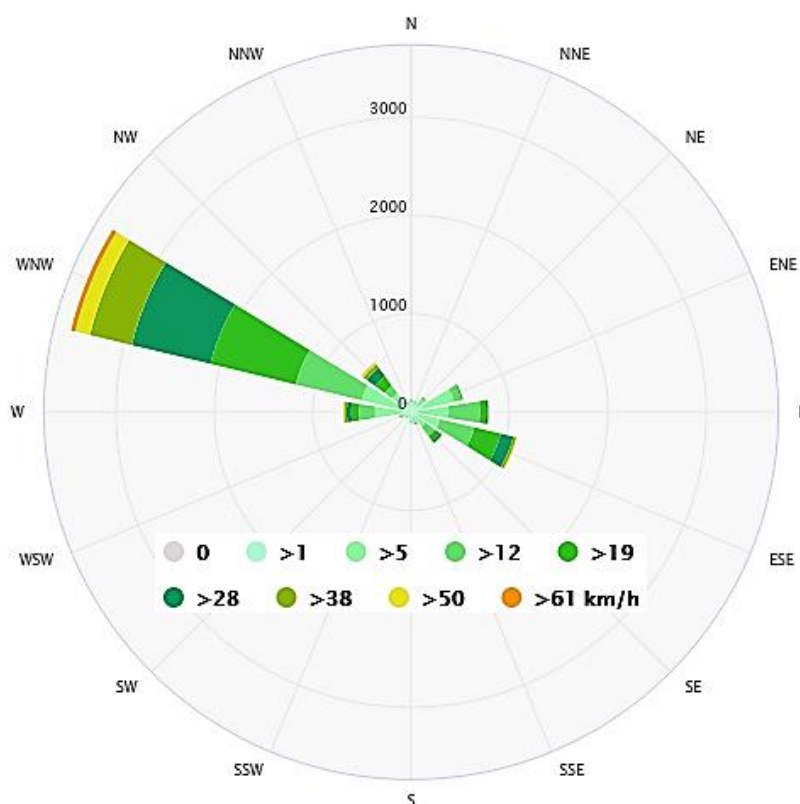


Figure 12 : Rose des vents du secteur de Gruissan-Narbonne (source Meteoblue.com)

2. Matériel et méthodes

2.1. Points de mesure et de prélèvement

La Figure 13 présente la localisation des points de mesure et de prélèvement utilisés dans cette étude. Les mesures effectuées sur ces points sont détaillées au Tableau 1.



Figure 13 : Localisation des points de mesure et de prélèvement (carte topographique IGN)
(les encadrés rouges sont les stations suivies dans le cadre de cette étude ; l'encadré orange indique une station du réseau de suivi de l'agence de l'Eau RMC)

Nom du point	Paramètre suivi	Fréquence
Pont des Pauvres	Station SMMAR de mesure du niveau d'eau du canal de la Réunion.	15 min.
Pont des Pâtres	Nutriments et salinité. Débit.	Echantillonnage ponctuel. Jaugeage ponctuel.
Station ADCP	Débit du canal de la Réunion amont (avant la diffuence du canal du Grazel).	Mesure à haute fréquence par ADCP.
Grazel amont	Débit.	Mesure ponctuelle.
Réunion aval Grazel	Débit du Canal de la Réunion en aval de la diffuence du canal du Grazel.	Mesure ponctuelle.
Canal de la Robine	Qualité de l'eau du canal de la Robine.	Fréquence inconnue (suivi Agence de l'Eau, hors étude).
Exutoire rizière	Nutriments et salinité Mesure du débit	Echantillonnage ponctuel. Mesure ponctuelle du débit. Suivi ADCP haute fréquence du débit.
Exutoire Réunion	Nutriments et salinité. Débit.	Echantillonnage ponctuel. Mesure ponctuelle du débit.
Empereur	Nutriments et salinité. Débit.	Echantillonnage ponctuel. Mesure ponctuelle du débit.
Campagnol	Nutriments et salinité. Niveau, température et salinité.	Echantillonnage ponctuel. Suivi haute fréquence du niveau, de la température et de la salinité par sonde CTD.
Passe	Débit.	Mesure ponctuelle. Suivi ADCP haute fréquence.
Ayrolle	Nutriments et salinité. Niveau, température et salinité.	Echantillonnage ponctuel. Suivi haute fréquence du niveau, de la température et de la salinité par sonde CTD.

Tableau 1 : Objectifs de suivi des différents points de mesure



Figure 14 : Station SMMAR au Pont des Pauvres



Figure 15 : Station ADCP sur le canal de la Réunion



Figure 16 : Principal exutoire des rizières

2.2. Campagnes de mesure ponctuelle

Un total de 11 campagnes ponctuelles (dites 'mensuelles') a été réalisé entre septembre 2020 et mars 2022. Outre ces campagnes régulières, des campagnes ciblées plus spécifiquement sur le suivi

des vidanges des rizières ont été réalisées. Deux campagnes évènementielles en situation de crue ont également été réalisées sur cette période. La première campagne a été réalisée le 27 novembre 2021, après plusieurs mois sans pluie sur le bassin versant. La deuxième campagne a été réalisée le 14 mars 2022.

Le Tableau 2 résume le calendrier des différentes campagnes de mesure.

Campagne mensuelle ●							Campagne évènementielle ●					
2020			2021								2022	
Sept.	Oct.	Déc.	Jan.	Mars	Juin	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	Mars	Mars
M-1	M-2	M-3	M-4	M-5	M-6	M-7	M-8	M-9	M-10	M-11	M-12	M-13
●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
30/09	28/10	21/12	19/01	24/03	16/06	21/08	27/09	20/10	27/11	24/12	14/03	18/03

Tableau 2 : Calendrier des campagnes de mesure

L'année de suivi ayant été perturbée par l'épidémie du Coronavirus, les suivis des mois d'avril et mai 2021 n'ont pu être réalisés pendant le confinement.

Les campagnes de mesure ponctuelle ont comporté :

- des mesures de débit (jaugeages) ;
- des mesures physico-chimiques (température, pH, conductivité, salinité, turbidité) ;
- des prélèvements d'eau pour analyses chimiques subséquentes en laboratoire.

Des **mesures ponctuelles de débit** (jaugeages) ont été réalisés à plusieurs reprises et en plusieurs points, dont certains de façon synchrone à des échantillonnages qualité. Dans ce dernier cas, les jaugages ont toujours eu lieu après le prélèvement pour éviter une perturbation de la colonne d'eau avant l'échantillonnage.

Les jaugages ont été réalisés à l'aide d'un courantomètre électromagnétique (Valeport BFM-801 ; Figure 17). Ce type d'appareil et de technique de mesure est régulièrement utilisé en France et décrit dans la Charte qualité de l'hydrométrie - Guide de bonnes pratiques (éditée par le Ministère de l'Environnement, de l'Énergie et de la Mer - 2017). Ce courantomètre est particulièrement pertinent pour la mesure des faibles vitesses (5 mm/s à 5 m/s, précision $\pm 0.5\%$ de la lecture + 5 mm/s).

Les mesures de vitesse ont été effectuées depuis une embarcation maintenue en place par une corde placée en travers du chenal ou depuis un pont. Les mesures ont été prises sur plusieurs verticales (nombre variant selon la largeur de la section à caractériser) et avec plusieurs mesures sur chaque verticale (nombre variant selon la profondeur de la section mesurée). Le débit a été calculé par intégration des vitesses à l'aide du logiciel DEPJAU du BRGM (Figure 17).

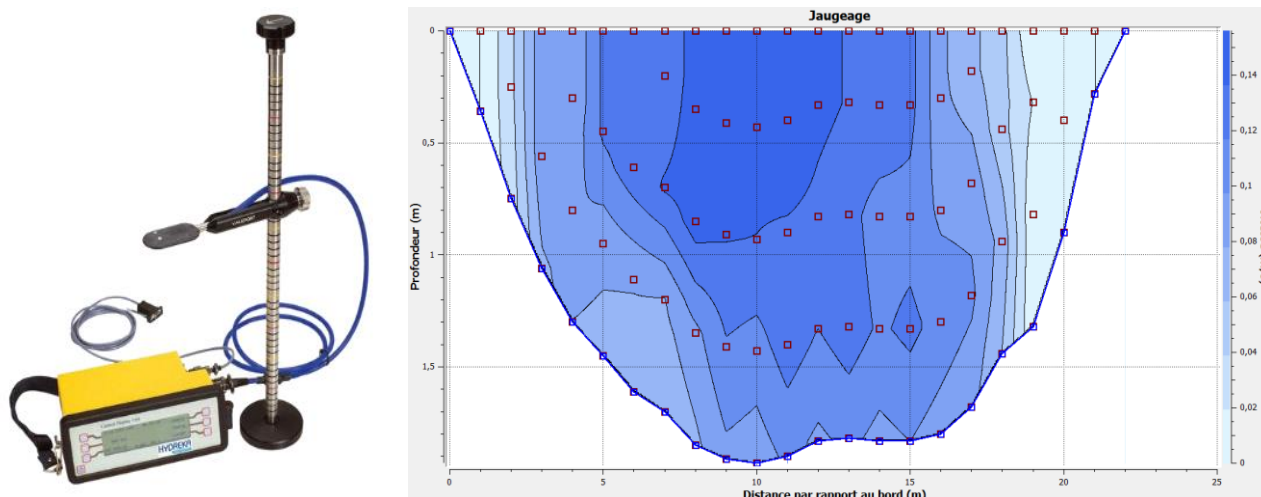


Figure 17 : Courantomètre utilisé et calcul du débit à l'aide du logiciel DEPJAU du BRGM

Des **mesures physico-chimiques** et des **prélèvements d'eau** pour analyses ultérieures en laboratoire ont également été réalisés à plusieurs reprises et en plusieurs points. Les mesures et prélèvements ont impliqué l'utilisation d'une embarcation pour la plupart des points afin de réaliser des mesures et prélèvements fiables et représentatifs des conditions attendues (mesures et prélèvements milieu du chenal, à mi-hauteur de la colonne d'eau). Durant les mesures et prélèvements, l'embarcation était stabilisée à l'aide d'une corde attachée ou retenue depuis les rives ou à un poteau dans le cas des étangs. Les prélèvements ont été réalisés en plaçant l'embarcation face au courant ou au vent afin de faciliter les manipulations de prélèvements et de mesures in situ. Le déplacement jusqu'au point de prélèvement a été fait de façon précautionneuse et à contre-courant afin ne pas remettre en suspension dans la colonne d'eau à échantillonner des particules de sédiments déposées au fond du chenal ou de l'étang. Ces particules entacheraient la représentativité des mesures physico-chimiques et des concentrations de contaminants.



Figure 18 : Sonde multimètre et méthode de prélèvement

Les **prélèvements d'eau** pour analyse ont été effectués en subsurface (- 1 m) ou à défaut à mi-hauteur de la colonne d'eau à l'aide d'une bouteille Niskin de 2,5 l avec ressorts en inox recouvert en Teflon pour tous les points de suivi. Lors du prélèvement, la bouteille est placée de manière horizontale pour éviter qu'elle ne touche le fond et remue les sédiments. La bouteille est fermée à la profondeur désirée. Dès sa remontée à la surface, la bouteille est fixée sur un porte-bouteille afin de prélever les sous-échantillons servant aux différentes analyses. Le flaconnage utilisé est spécifique et a subi un prétraitement.

Les échantillons ont été prélevés dans un seul prélèvement pour les analyses des formes azotées et phosphorées. Un second prélèvement a été effectué pour la mesure des matières en suspension (MES) et de la Chlorophylle a.

Les flacons utilisés pour les mesures de nutriments sont de type HDPE col étroit avec capuchon fileté en polypropylène. Plusieurs flacons ont été prévus par prélèvement selon les analyses à effectuer : un flacon pour les analyses des nitrites (NO₂), nitrates (NO₃), de l'ammonium (NH₄), des phosphates (PO₄), un flacon pour l'azote et le phosphore total (NT et PT), un flacon pour les formes totales dissoutes (NTD et PTD), un flacon pour les MES ainsi qu'un flacon en HPDE opaque brun pour la Chlorophylle a. Un flacon de sécurité a été ajouté pour la conservation d'un doublon en cas de problème analytique ou de casse constaté par le laboratoire.

Les filtrations pour les sous-échantillons des formes inorganiques ont été réalisées lors du prélèvement sur un filtre de 100 µm sur support Swinnex fixé à la bouteille Niskin.

Les mesures physico-chimiques in situ (Température, pH, Salinité, Oxygène dissous et Saturation en oxygène) ont été réalisées dans la masse d'eau immédiatement après le prélèvement à l'aide d'une sonde multi-paramètre Hanna HI9829. La mesure de salinité a été doublée à partir d'un salinomètre portable étalonné avant chaque campagne mensuelle. Quelques mesures de transparence de l'eau (turbidité) ont été réalisées à l'aide d'un disque Secchi (diamètre 20 cm).

Les mesures in situ ont été consignées sur une fiche de terrain avec la date et l'heure de prélèvement, les conditions météorologiques, la direction et la force du vent.

Dès leur prélèvement et leur conditionnement, les échantillons ont été conservés dans des enceintes réfrigérées pour maintenir l'échantillon à une température inférieure à celle du prélèvement. Au retour de chaque campagne, les échantillons ont été congelés afin de prévenir la dégradation de certains composés

Afin d'être le plus représentatif possible des concentrations du milieu, il faut stopper dès que possible toute réaction dans l'échantillon. C'est pourquoi, dès le retour dans nos locaux, 50 à 200 ml d'échantillon ont été filtrés sur un filtre GFF de diamètre 25 mm et le filtre immédiatement congelé pour la détermination ultérieure de la chlorophylle a.

Par ailleurs, entre 250 et 1000 ml d'échantillon ont été filtrés avec un filtre GFF de diamètre 47 mm (préalablement séché à l'étuve pendant au moins 12h à 60°C) et congelé pour la détermination ultérieure de la matière en suspension (MES). Le filtrat a été récupéré pour le dosage des formes totales dissoutes de l'azote et du phosphore (NTD, PTD).

A la fin de la campagne de prélèvements, et après fixation, filtration et congélation, les sous-échantillons et filtres ont été acheminés au laboratoire de l'Institut Méditerranéen d'Océanologie (MIO) de Marseille sans casser la chaîne de froid pour la détermination des concentrations en nutriments dans l'eau (nitrites, nitrates, ammonium, phosphates, azote total et phosphore total), de la chlorophylle a et des matières en suspension (MES).

2.3. Analyses en laboratoire

Les analyses des différentes formes inorganiques de l'azote et du phosphore (ammonium, nitrates, nitrites, phosphates), et de l'azote et du phosphore total et dissous ont été réalisées selon les méthodes Aminot et Kérouel 2007. Les paramètres MES et Chlorophylle a ont également été réalisés par ces méthodes.

Le laboratoire MIO de Marseille (Mediterranean Institute of Oceanographic), organisme de recherche spécialisé dans le dosage des nutriments en milieu lagunaire, a réalisé les analyses selon les exigences demandées pour cette étude.

Paramètre	Symbole	Méthode	Référence
Nitrite	NO ₂	Colorimétrie	Aminot et Kerouel 2007 ²
Nitrate	NO ₃	Colorimétrie	Aminot et Kerouel 2007
Ammonium	NH ₄	Fluorimétrie	Holmes et al. 1999 ³
Phosphates	PO ₄ ³⁻	Colorimétrie	Aminot et Kerouel 2007
Azote total et dissous	NT - NTD	Colorimétrie après oxydation humide	Raimbault et al. 1999 ⁴
Phosphore total et dissous	PT-PTD	Colorimétrie après oxydation humide	Raimbault et al. 1999
Chlorophylle a	Chl a	Fluorimétrie	Raimbault et al. 2004 ⁵

Tableau 3. Méthodes analytiques de référence utilisées par le laboratoire MIO

Les formes organiques dissoutes de l'azote (NOD) et du phosphore (POD) sont nécessaires pour caractériser les sources et l'origine des apports en azote et phosphore et viennent abonder les données pour l'outil GAMELag ⁶ qui a été développé pour étudier la problématique de la restauration des milieux lagunaires eutrophisés.

Ces données sont obtenues selon la formule suivante : (NOD = NTD-NID et POD = PTD – PO₄³⁻). Le NID étant la somme des formes inorganiques dissoutes de l'azote = NO₂ + NO₃ + NH₄. Le POD est généralement associé au phosphore particulaire.

2.4. Campagnes de mesure à haute fréquence

Deux types de campagnes de mesure à haute fréquence ont été mis en œuvre :

- Des suivis de la hauteur d'eau, de la température, de la conductivité et de la salinité sur les étangs de Campagnol et Ayrolle ;
- Des mesures de débit sur le canal de la Réunion, sur l'exutoire des rizières et sur la passe entre Campagnol et Ayrolle.

Les suivis physico-chimiques menés sur les deux étangs, prévus initialement sur 12 mois, ont duré 18 mois. Les suivis physico-chimiques à haute fréquence ont été réalisés à l'aide de sondes CTD (conductivité, température, hauteur d'eau) au pas de temps de 10 minutes.

Les mesures de débits à haute fréquence ont été réalisées à l'aide d'appareils ADCP (fonctionnant sur le principe de l'effet Doppler) au pas de temps de 10 minutes également. Les mesures ont fourni :

² Aminot, A., Kerouel, R., 2007. Dosage automatique des nutriments dans les eaux marines : 414 méthodes en flux continu. Ed. Ifremer, Méthodes d'analyse en milieu marin 188 pp.

³ Holmes R.M., Aminot A., Kerouel R., Hoker B.A., Peterson B.J., 1999. A simple and precise method for measuring ammonium in marine and freshwater ecosystems. Can. J. Fish. Aquat. Sci., 56(10), 1801-1808 ;

⁴ Raimbault P., Pouvesle W., Sempéré R., Diaz F, Garcia N, 1999. A simple procedure for simultaneous analysis of total and dissolved organic forms of carbon, nitrogen and phosphorus in seawater using the wet-oxidation technic. Mar. chem., 66 : 161-169 ;

⁵ Raimbault P., Neveux J., Lantoin F., 2004. Dosage rapide de la chlorophylle a et des phaeopigments a par fluorimétrie après extraction au méthanol. Comparaison avec la méthode classique d'extraction à l'acétone. Oceanis, 30(2) : 189-205.

⁶ GAMELag est un modèle développé par IFREMER permettant d'analyser la situation actuelle d'un milieu et de tester différents scénarii écologiques. C'est un outil d'aide à la gestion des lagunes méditerranéennes basé sur l'a prise en compte des connaissances acquises sur le territoire. Cet outil sera utilisé à la suite de la présente étude.

- 8 mois de mesures sur une période de 10 mois pour le canal de la Réunion,
- 6 mois de mesures sur une période 7 mois sur l'exutoire de la rizière,
- 5.5 mois de mesures sur une période de 6.5 mois sur la passe entre les deux étangs.

Les mesures de débits par ADCP ne couvrent pas l'intégralité des périodes de suivi pour différentes raisons :

- envasement de l'appareil ADCP comme sur l'exutoire de la rizière et le canal de la Réunion,
- baisse de tension de la batterie durant une période non navigable comme dans le cas de la passe).

Dans les trois cas, la durée des mesures a cependant largement dépassé la durée initialement prévue.

2.5. Conditions hydro-météorologiques de la période de suivi

L'étude était initialement prévue sur 12 mois, de septembre 2020 à septembre 2021. Les six premiers mois du suivi (correspondant normalement à la période pluvieuse de remise en eau) s'étant avérés extrêmement secs (Figure 19), il a été proposé d'étirer le reste du suivi (six mois restants) sur 12 mois (soit 6 mois de plus) afin de pouvoir inclure l'automne 2021 et l'hiver 2022 (en espérant que ces périodes soient pluvieuses). Cette stratégie a réussi puisque deux événements méditerranéens importants ont pu être observés. Les pluies enregistrées durant ces deux événements ont été respectivement de 173 mm et 171 mm à la station Météo-France de Narbonne, de 261 mm et 142 mm sur une station pluviométrique située à Moussoulens (amont du bassin versant), et de 198 mm et 117 mm sur une station pluviométrique à Gruissan (aval du bassin versant). Ces données montrent également la forte variabilité spatiale des précipitations sur de courtes distances. La stratégie d'extension du suivi a ainsi permis de caractériser une période automno-hivernale déficitaire (2020-2021) et une excédentaire (2021-2022).

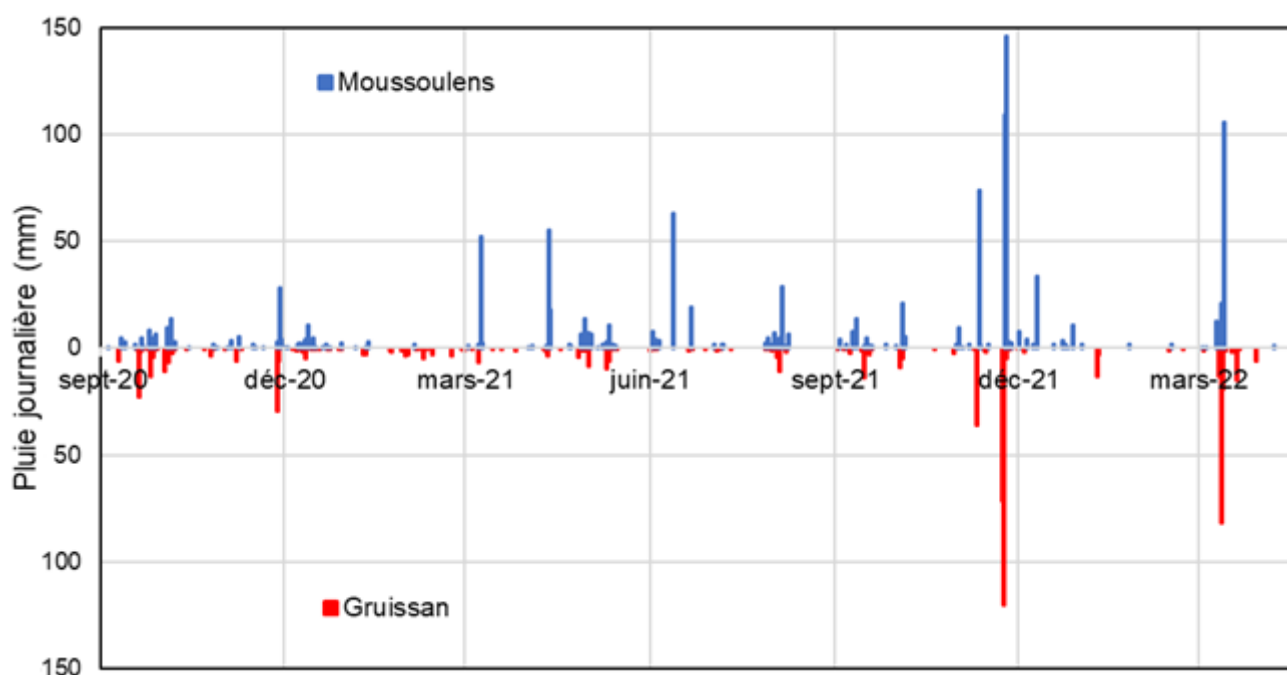


Figure 19 : Précipitations journalières enregistrées à Moussoulens (amont du bassin versant) et à Gruissan

Les courbes cumulées des précipitations (Figure 20) montrent un gradient important de la pluie depuis l'intérieur des terres (Moussoulens) vers le littoral (Gruissan). Le cumul est 57% plus élevé à Moussoulens qu'à Gruissan.

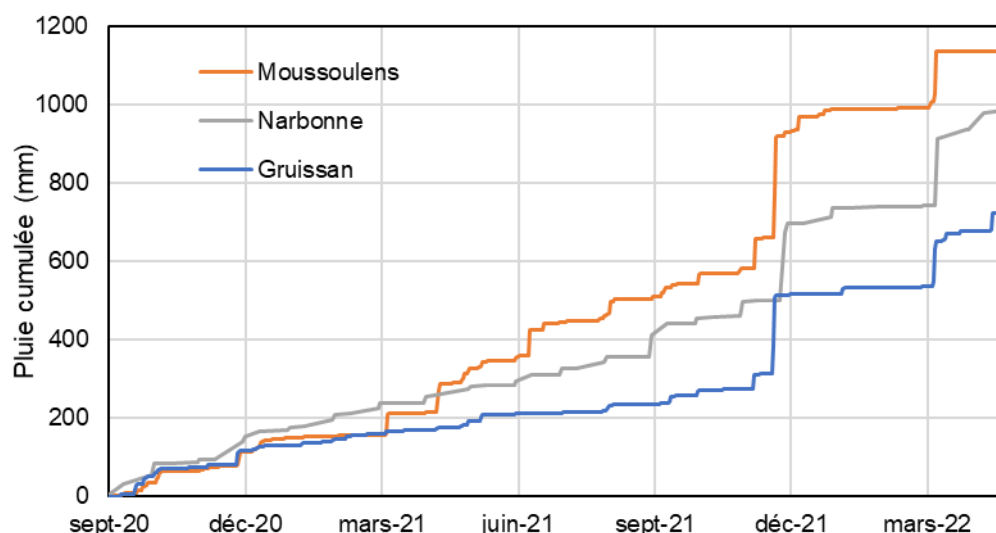


Figure 20 : Précipitations cumulées enregistrées à Moussoulens (amont du bassin versant), Narbonne et Gruissan

Le secteur d'étude est caractérisé par des vents importants (Figure 21) rendant difficile la navigation et les mesures in situ (jaugeage et physico-chimie), et empêchant le respect des conditions recommandées pour les prélèvements (vent inférieur à 25 km/h). Les jours sans vent ou de vent très faible ont donc été recherchés par une veille météorologique quotidienne.

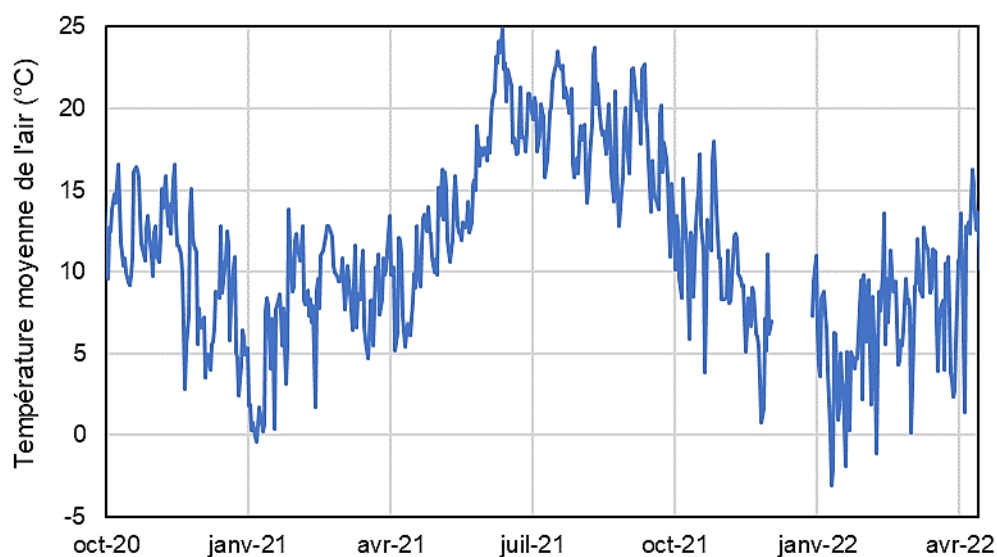


Figure 21 : Vitesse des rafales de vent durant la période de suivi (station de Gruissan)

La Figure 22 présente l'évolution des niveaux d'eau sur le canal de la Réunion au pont aux Pauvres (station du SMMAR – Syndicat mixte des milieux aquatiques et des rivières de l'Aude) et celle de la mer à Port-La-Nouvelle (station SHOM – Service hydrographique et océanographique de la Marine). Par ailleurs, tel qu'évoqué précédemment, le vent provenant de l'ONO (tramontane-cers) favorise la vidange des deux étangs et de façon corolaire des niveaux très bas et difficilement navigables. L'expérience a montré que l'étang de Campagnol n'était réellement navigable que pour un niveau d'eau du canal de la Réunion (observé à la station du SMMAR du Pont des Pauvres) supérieur à 40 cm.

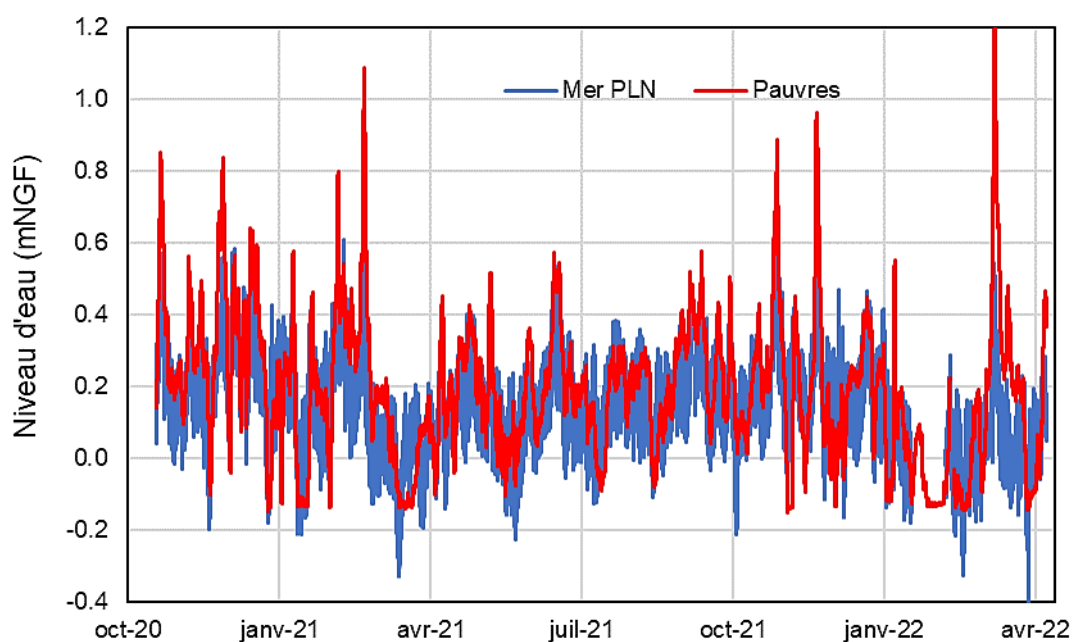


Figure 22 : Niveau d'eau du canal de la Réunion au Pont aux Pauvres (station SMMAR) et de la mer Méditerranée à Port La Nouvelle (station SHOM)

Les interventions sur les étangs devaient donc trouver un compromis entre des conditions de vent plutôt faibles et des niveaux d'eau suffisamment hauts, sans pour autant privilégier systématiquement des périodes de vent de mer favorisant les niveaux hauts.

3. Suivis hauteur – température – salinité des étangs

Des suivis à haute fréquence sur Campagnol et Ayrolle ont été réalisés au moyen de sondes CTD enregistrant la hauteur d'eau, la température et la conductivité électrique, cette dernière permettant de calculer la salinité.

3.1. Suivi du niveau d'eau

La Figure 23 compare l'évolution des niveaux d'eau du canal de la Réunion au pont aux Pauvres (station du SMMAR) et de l'étang de Campagnol (sonde du présent projet). Comme le montre cette figure, les évolutions sur les deux points de suivi sont très semblables. La courbe au pont aux Pauvres est très légèrement supérieure à celle de Campagnol, indiquant un léger gradient d'écoulement entre ces deux points. L'amplitude totale des courbes est importante, de 1.54 m, le niveau variant sur Campagnol de - 0.30 m à +1.24 m. Les niveaux les plus bas ne sont pas mesurés au pont aux Pauvres, la sonde étant hors d'eau durant ces périodes.

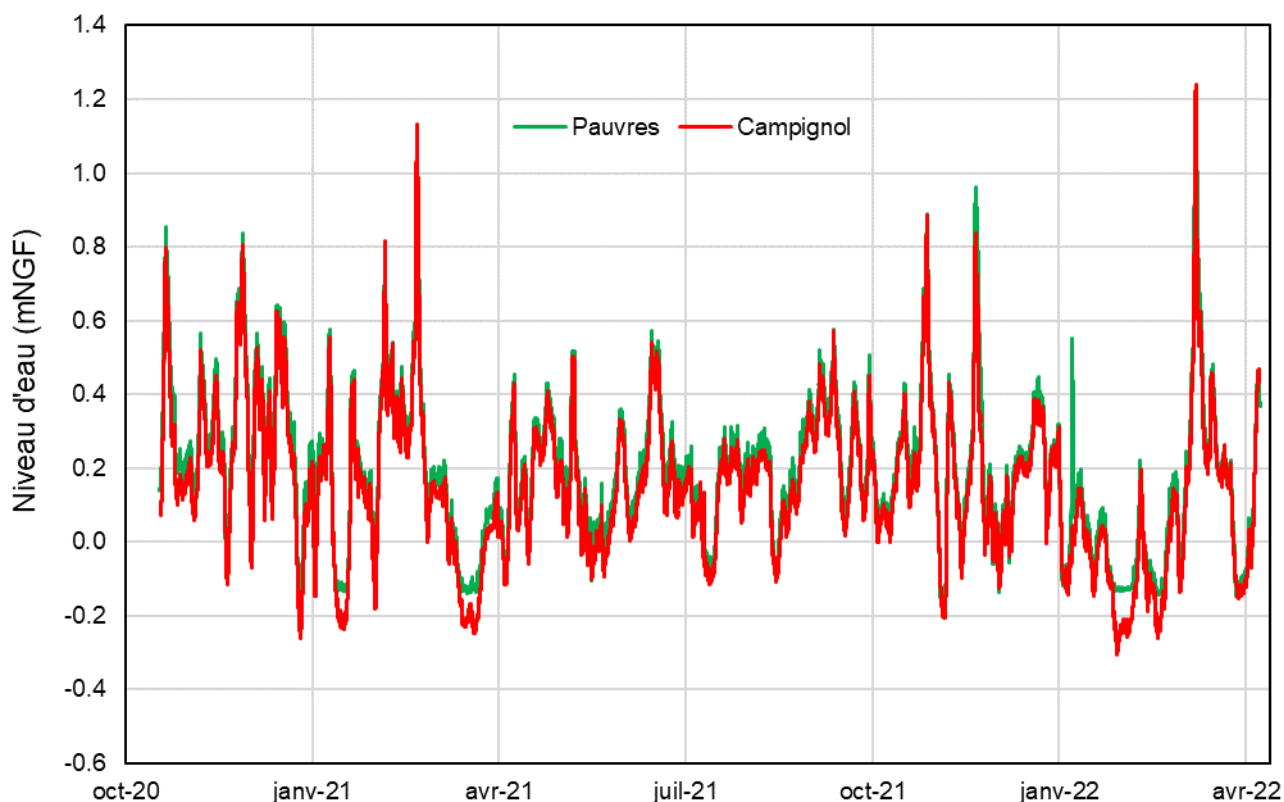


Figure 23 : Comparaison de l'évolution des niveaux d'eau du canal de la Réunion au pont aux Pauvres (station SMMAR) et de l'étang de Campagnol

La Figure 24 compare l'évolution des niveaux d'eau des étangs de Campagnol et de l'Ayrolle. Les courbes sont ici encore très semblables, celle de Campagnol étant très légèrement supérieure à celle de l'Ayrolle. Durant les très basses eaux, le niveau de l'étang de l'Ayrolle descend beaucoup plus bas que celui de Campagnol, d'une vingtaine de centimètres plus bas. Ceci survient durant les périodes de forts vents d'ONO, où la tramontane (cers) induit une vidange de l'étang de l'Ayrolle.

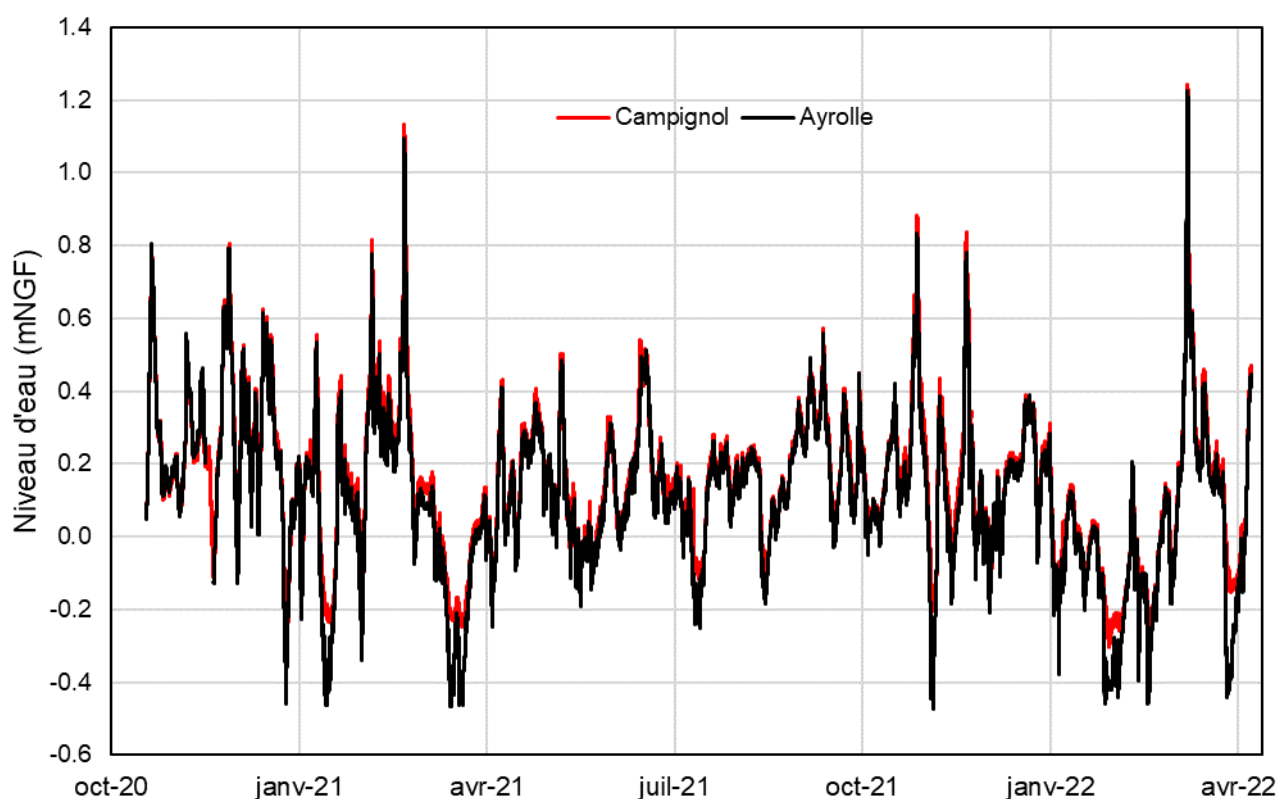


Figure 24 : Comparaison de l'évolution des niveaux d'eau des étangs de Campagnol et Ayrolle

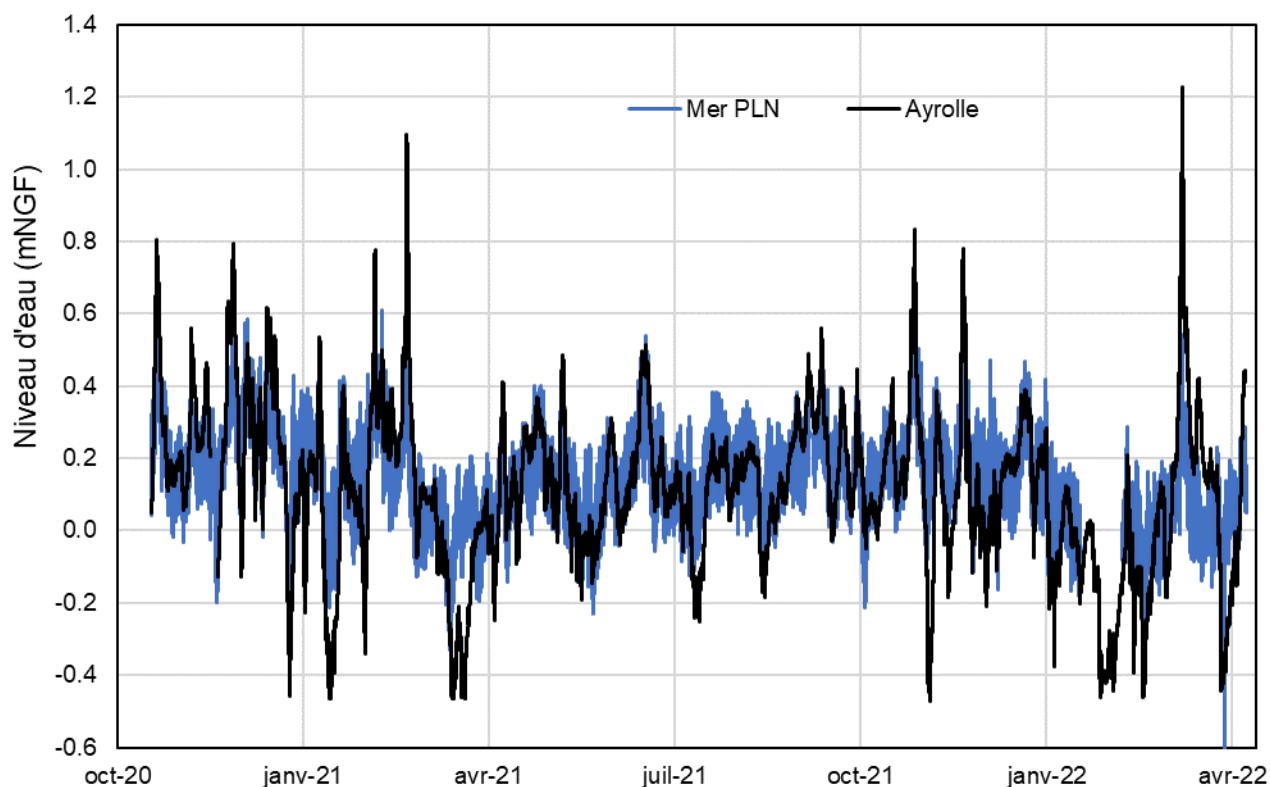


Figure 25 : Comparaison de l'évolution des niveaux d'eau de l'étang de l'Ayrolle et de la mer à Port-La-Nouvelle (station SHOM)

La Figure 25 compare l'évolution des niveaux d'eau de l'étang de l'Ayrolle et de la mer à Port-La-Nouvelle (données de la station du SHOM). Ici encore l'évolution globale des deux courbes est assez

semblable, mais la courbe du niveau de la mer est affectée par l'oscillation bi-quotidienne de la marée. Cet effet n'est pas visible (ou très amorti) dans la partie Nord de l'Ayrolle où est installée la sonde de suivi de cet étang. Notons que les très bas niveaux observés sur l'Ayrolle n'ont pas d'équivalents sur la mer à Port-La-Nouvelle.

La Figure 26 présente la différence des hauteurs d'eau mesurées sur le canal de la Réunion au Pont aux Pauvres et sur l'étang de Campagnol. La différence moyenne est de 4 cm. Quelques valeurs sont inférieures à 0, indiquant que durant ces périodes l'eau remonte dans le canal de la Réunion. Cette situation correspond aux périodes de vent de mer où l'eau rentre dans l'Ayrolle, puis dans Campagnol, et remonte dans le canal de la Réunion. Quelques valeurs sont très élevées et reflètent quant à elles les périodes de crues.

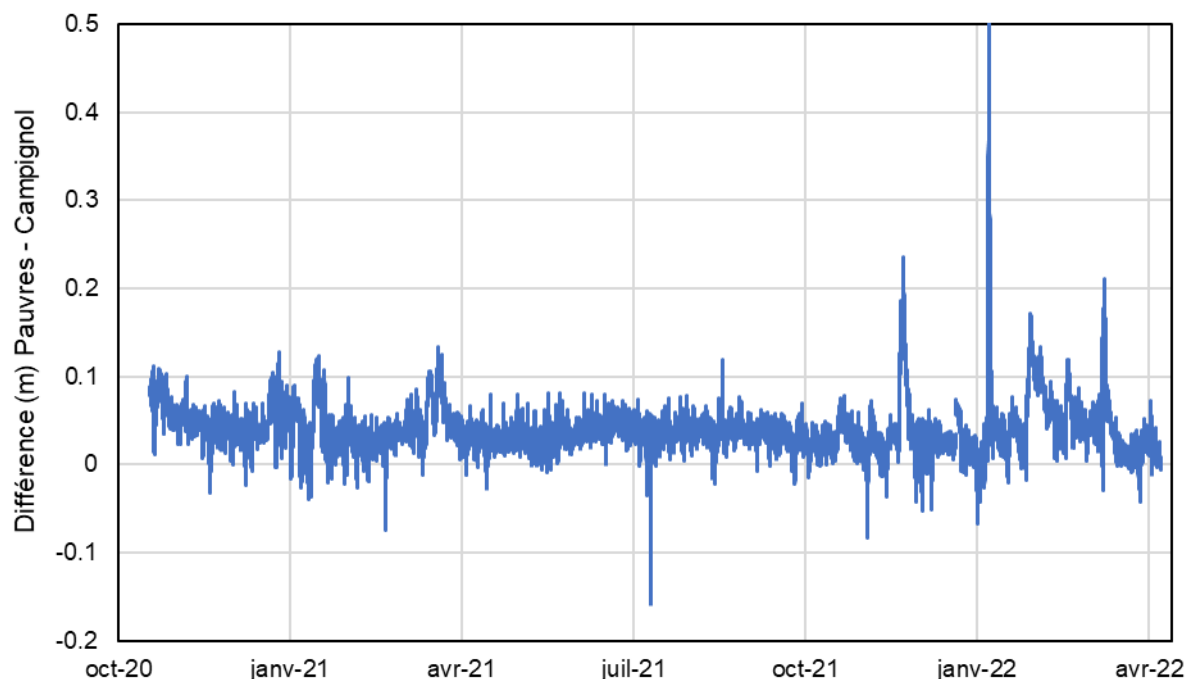


Figure 26 : Evolution de la différence des hauteurs d'eau du canal de la Réunion au Pont aux Pauvres et de l'étang de Campagnol

La Figure 27 présente la différence des hauteurs d'eau mesurées sur les étangs de Campagnol et Ayrolle. La différence moyenne est de 3.5 cm. Durant certaines périodes (d'avril à juillet 2021 par exemple), les différences sont autant négatives que positives (autant sous l'axe 0 qu'au-dessus). Ceci illustre l'effet de la marée contrôlant la direction des échanges entre Campagnol et Ayrolle. Pendant l'hiver (décembre à mars 2021 et janvier à avril 2022), la courbe est majoritairement au-dessus de l'axe 0, illustrant les apports d'eau arrivant depuis l'amont et induisant un écoulement vers la mer.

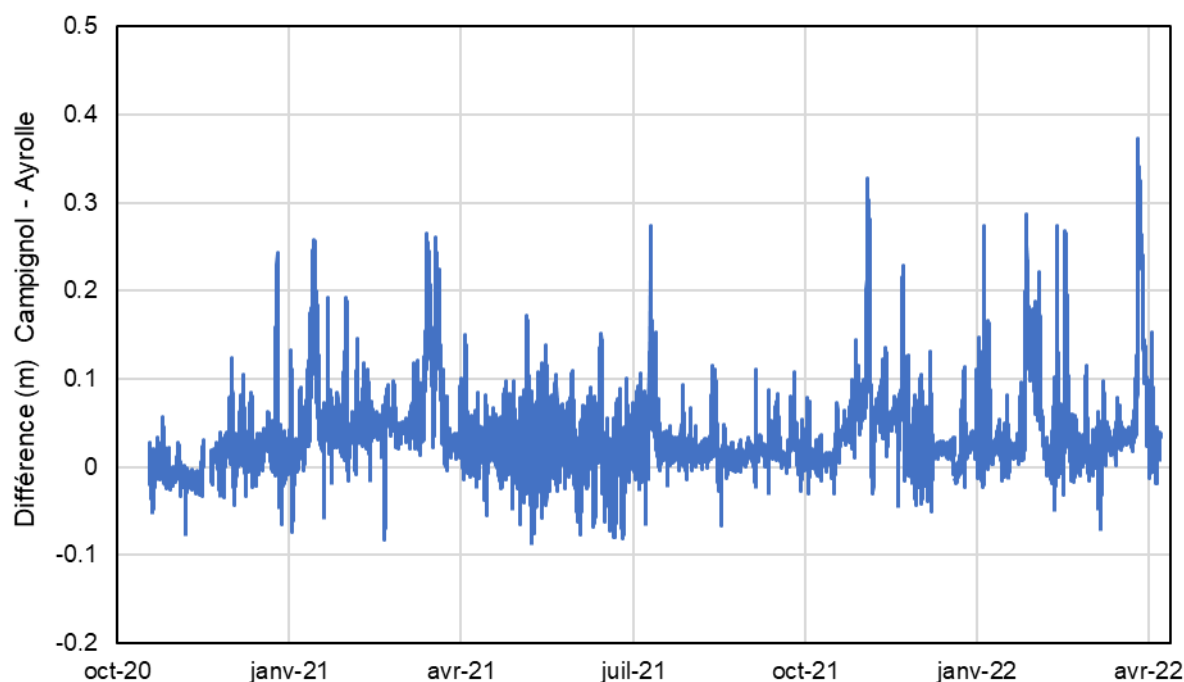


Figure 27 : Evolution de la différence des hauteurs d'eau des étangs de Campagnol et Ayrolle

3.2. Suivi de la température

La Figure 28 présente l'évolution de la température dans les étangs de Campagnol et Ayrolle (au droit des points de suivi). De façon globale, la température évolue de façon semblable dans les deux étangs. Durant quelques périodes (mars-avril 2021, octobre 2021, février-mars 2022), la variation de la température sur l'étang de Campagnol semble moins marquée que sur Ayrolle. La température mesurée lors des campagnes de prélèvement semble montrer que l'eau de Campagnol est généralement plus élevée que celle d'Ayrolle.

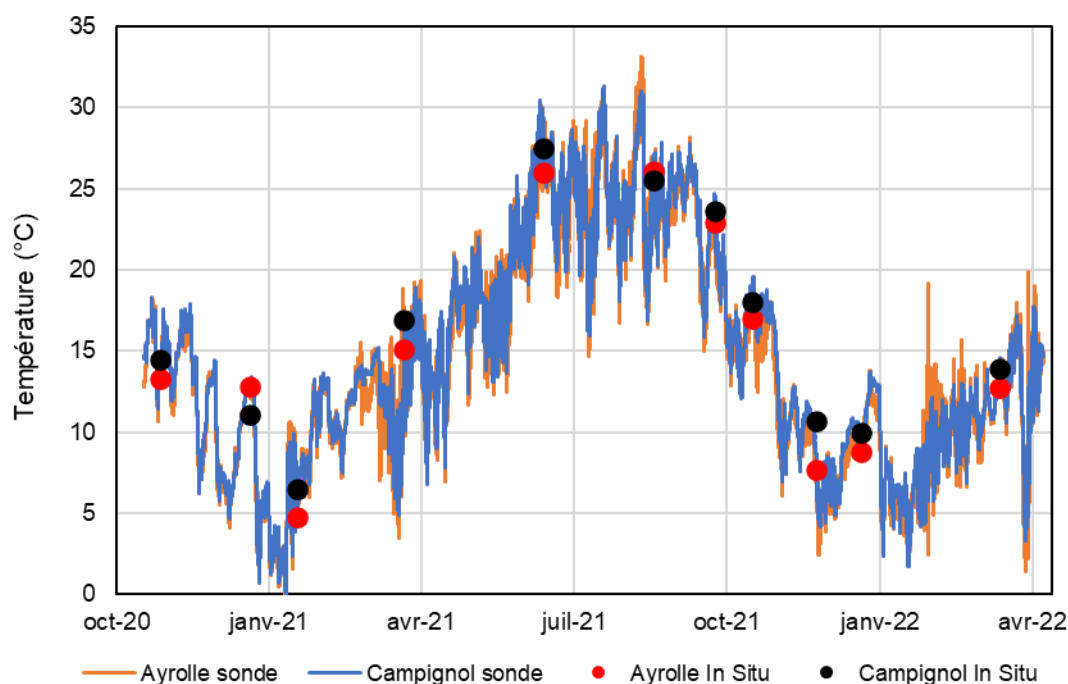


Figure 28 : Evolution de la température des étangs de Campagnol et Ayrolle (les points correspondent aux mesures ponctuelles effectuées durant les campagnes de prélèvement)

La comparaison des températures de l'étang de Campagnol avec celles de l'air à Gruissan (Figure 29) montrent que les températures de l'eau entre octobre et avril sont globalement corrélées avec celle de l'air, mais leur sont légèrement supérieures de quelques degrés durant l'été.

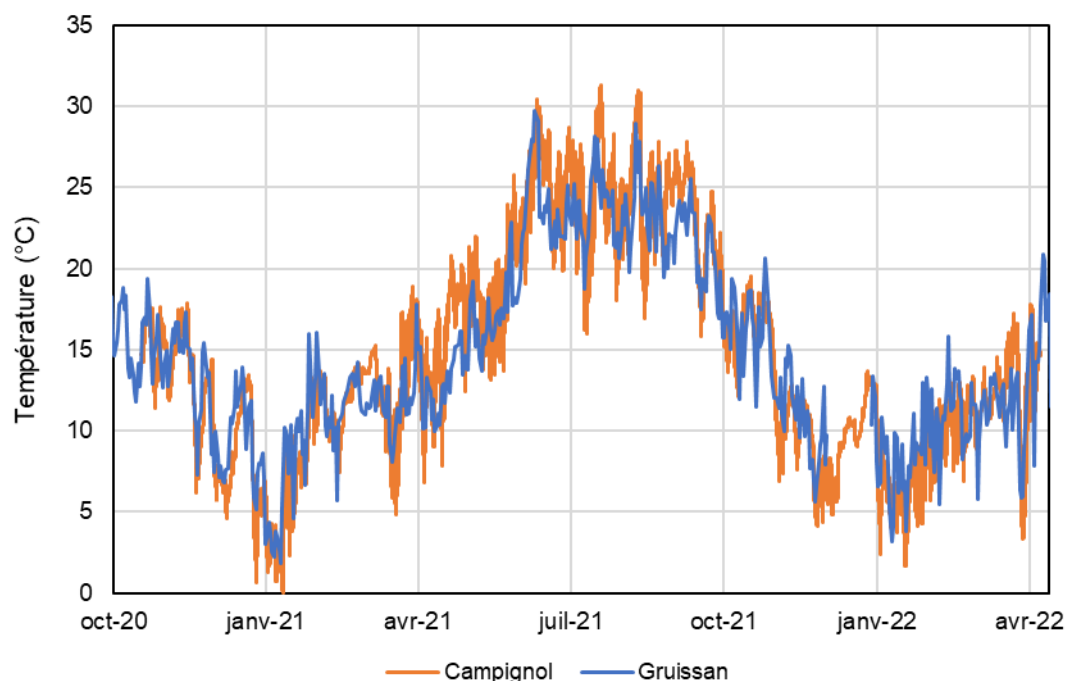


Figure 29 : Evolution de la température moyenne de l'air à Gruissan

3.3. Suivi de la salinité

La Figure 30 présente l'évolution de la salinité dans les étangs de Campagnol et Ayrolle.

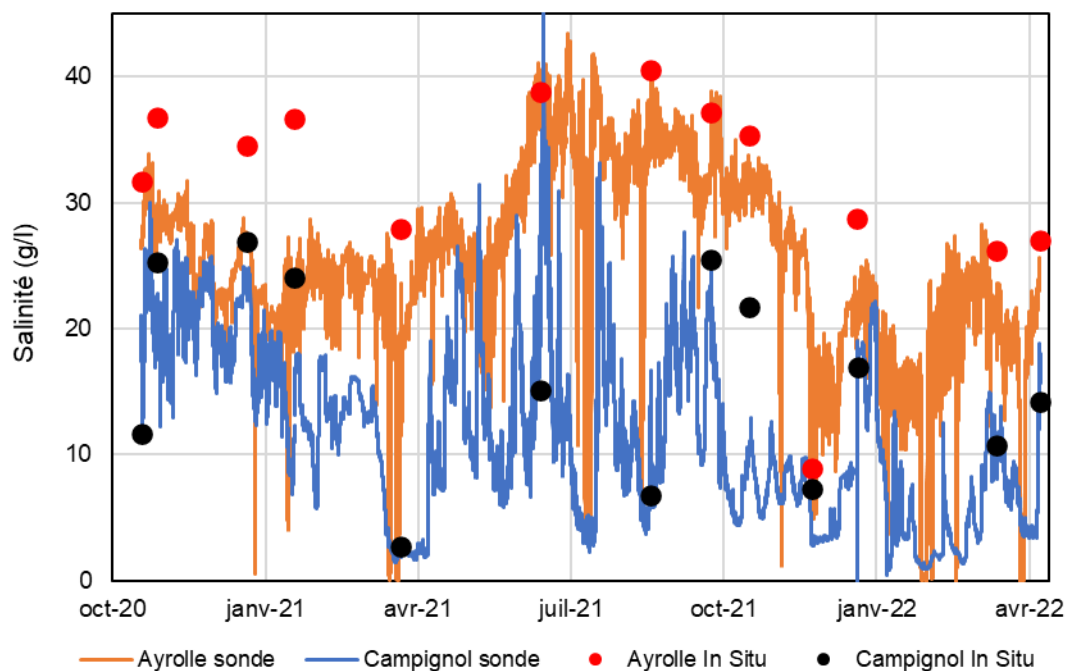


Figure 30 : Evolution de la salinité dans les étangs de Campagnol et Ayrolle (les points correspondent aux mesures ponctuelles effectuées durant les campagnes de prélèvement)

Les salinités mesurées durant les campagnes de prélèvements sont parfois supérieures à celles obtenues par les sondes, en particulier sur Ayrolle. Ceci provient du fait que les mesures in situ effectuées durant les prélèvements le sont à mi-hauteur de la colonne d'eau, alors que les sondes sont placées vers le bas de la colonne d'eau afin de ne pas se trouver hors d'eau durant les très basses eaux.

Les courbes de Campagnol et d'Ayrolle sont très différentes. La salinité dans l'Ayrolle est presque toujours supérieure à la salinité dans Campagnol. Elle est très forte sur Ayrolle durant l'été. Dans Campagnol, la salinité est généralement faible, autour ou inférieure à 20 g/l, sauf durant quelques événements qui semblent pouvoir être reliés aux périodes de vent de mer entraînant une élévation du niveau d'eau dans les étangs (Figure 31), et une entrée d'eau de mer dans Ayrolle puis Campagnol.

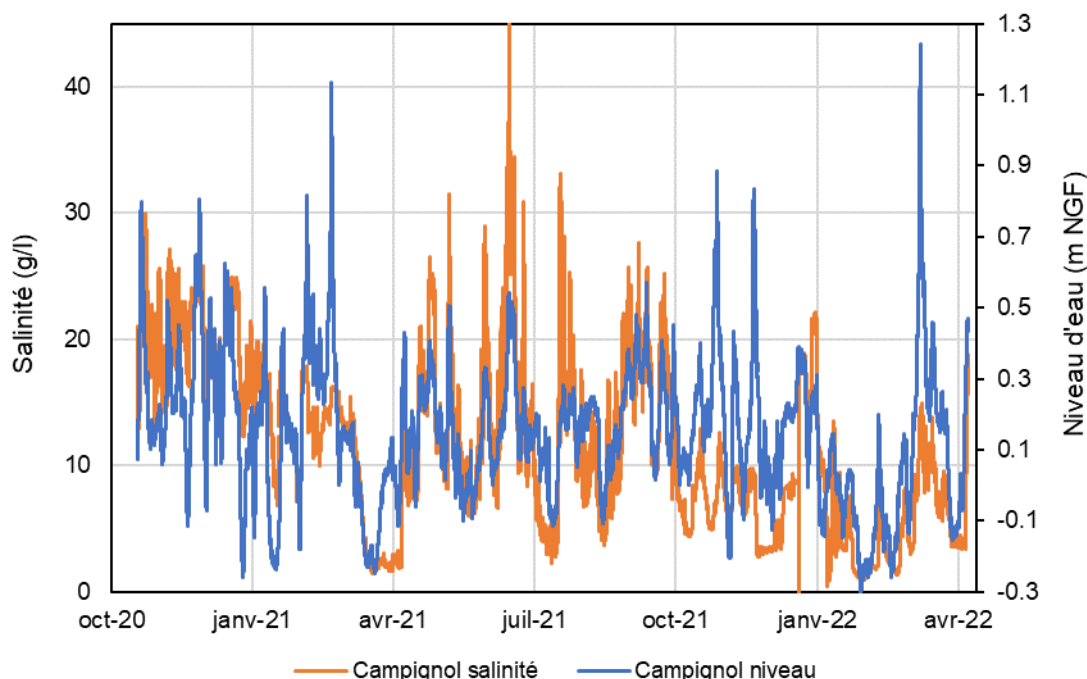


Figure 31 : Evolution conjointe de la salinité et du niveau d'eau dans Campagnol

La Figure 32 d'évolution conjointe de la salinité et du niveau d'eau dans Ayrolle ne montre pas la même dépendance entre les fortes salinités et les niveaux d'eau élevés. Au contraire, ce sont les niveaux bas de l'étang qui sont corrélés avec les faibles salinités. Quand le vent d'ONO (tramontane-cers) souffle de façon importante, les étangs se vidangent en grande partie. Ayrolle reçoit alors de l'eau de Campagnol et des zones humides voisines. L'eau de Campagnol étant plus douce, la salinité de l'eau d'Ayrolle montre alors une chute importante, avec des salinités équivalentes, voire plus faibles que celle de Campagnol. Un éventuel apport d'eau douce souterraine (ou une augmentation de cet apport) pourrait être aussi évoqué, favorisé par l'abaissement de la colonne d'eau dans les étangs (la diminution de la colonne d'eau abaisse la pression hydrostatique et favorise la remontée d'eau douce souterraine).

Les données de salinité en haute fréquence illustrent la forte dépendance du fonctionnement hydrologique des étangs aux conditions de vents. L'évolution de la salinité est ainsi directement dépendante de l'orientation et de l'intensité du vent.

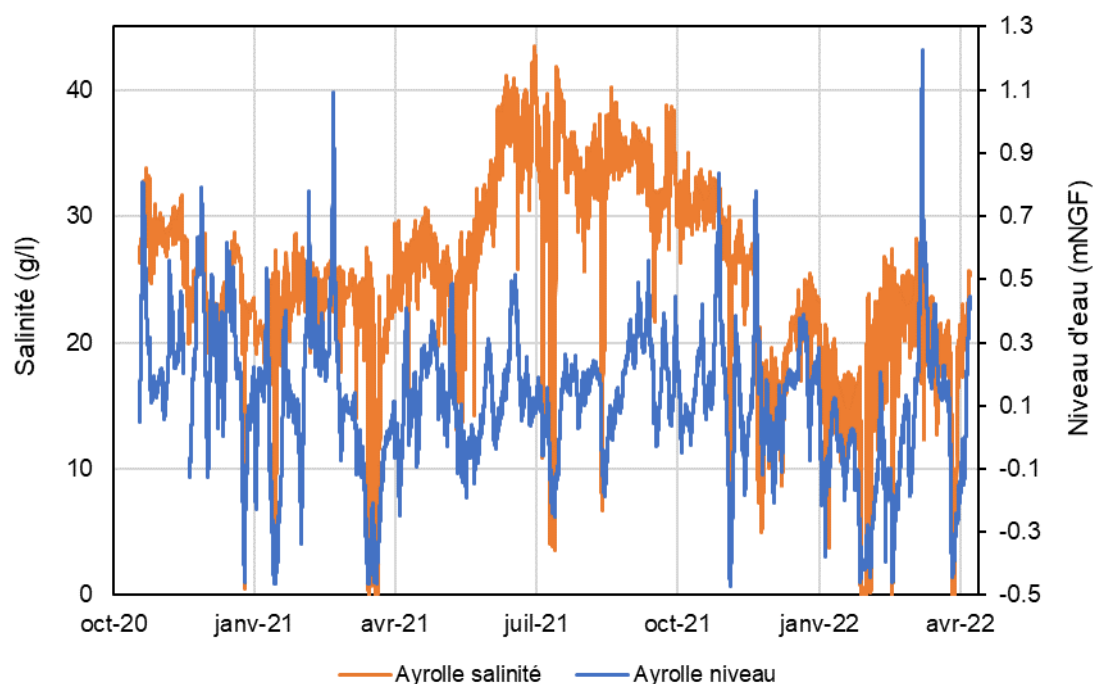


Figure 32 : Evolution conjointe de la salinité et du niveau d'eau dans Ayrolle

Le suivi haute fréquence des niveaux d'eau sur Campagnol et l'Ayrolle, et sa comparaison au suivi du niveau d'eau du canal de la Réunion (à la station du SMMAR) et à celui de la marée (station SHOM de Port la Nouvelle), montrent que les différents niveaux d'eau sont tous corrélés à la marée.

Les différences de niveau calculées entre le canal de la Réunion et Campagnol d'un côté et entre Campagnol et l'Ayrolle de l'autre montrent que les valeurs sont statistiquement positives, c'est-à-dire que les flux sont globalement descendants du bassin versant vers la mer. Ceci n'est cependant pas toujours le cas, d'une part à l'échelle de la journée sous l'effet de la marée, et d'autre part à l'échelle mensuelle sous l'effet des conditions de vent. Lorsque le vent dominant est de l'Ouest ou du Nord, les flux sont très majoritairement sortants vers la mer, et les étangs et les zones humides limitrophes se vident alors de façon importante (les niveaux baissent). Lorsque le vent dominant est du Sud ou de l'Est, les flux sont majoritairement entrants depuis la mer (les niveaux sont hauts dans les étangs et les zones humides).

La salinité montre des chutes extrêmement importantes et rapides, qui ne semblent pas reliées à des arrivées d'eau douce depuis l'amont du bassin, mais à des apports d'eau douce de nappe. Ces chutes surviennent principalement durant les périodes de vidange des étangs sous l'effet des vents d'Ouest et du Nord. Ainsi, la salinité est très faible quand le niveau d'eau des étangs est très faible.

4. Suivi des débits

Durant l'étude, les débits ont été suivis à haute fréquence sur :

- le canal de la Réunion (8 mois de mesures sur une période de suivi de 10 mois),
- l'exutoire principal des rizières (6 mois de mesures sur 7 mois de suivi),
- la passe entre Campagnol et Ayrolle (5.5 mois de mesures sur 6.5 mois de suivi).

Les appareils de mesure ADCP fournissent la vitesse moyenne du courant (positive ou négative) dans la section d'écoulement, ainsi que la hauteur d'eau au-dessus de l'appareil. Connaissant le profil en travers du chenal mesuré, la hauteur d'eau permet de calculer la surface de la section d'écoulement, dont le produit avec la vitesse moyenne fournit le débit d'écoulement à travers la section.

4.1. Débit du canal de la Réunion

La Figure 33 présente le débit du canal de la Réunion mesuré par ADCP à l'aval du Pont des Pâtres (sur la période avril 2021 à février 2022).

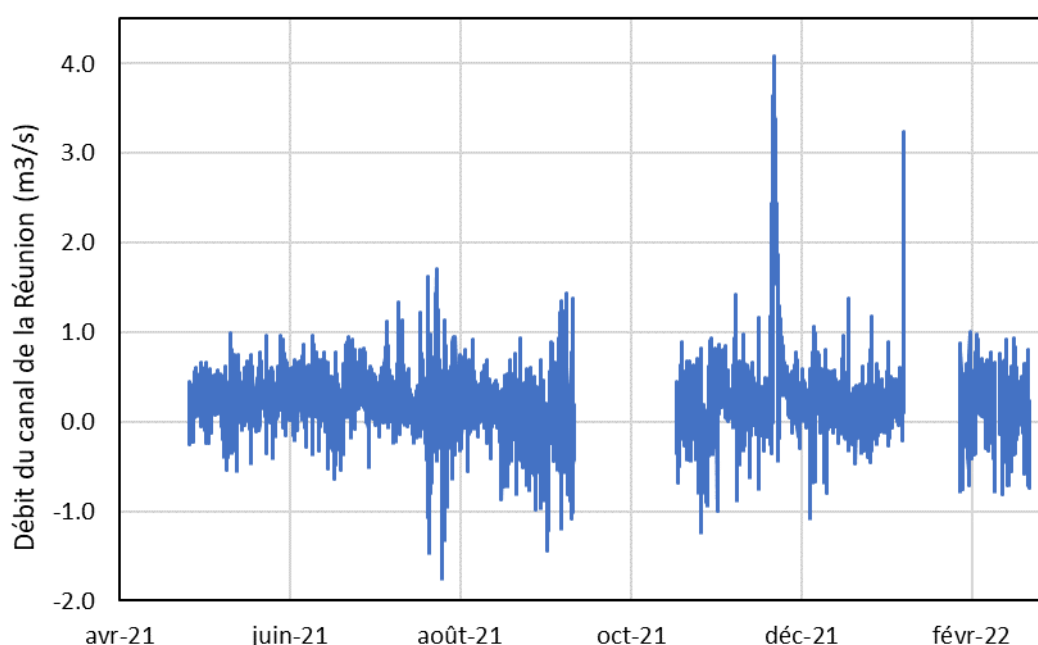


Figure 33 : Débit du canal de la Réunion mesuré par ADCP à l'aval du Pont des Pâtres (avril 2021 à février 2022)

Le débit est généralement positif (courbe plutôt au-dessus de l'axe 0), c'est-à-dire descendant, mais il présente aussi de nombreuses valeurs négatives (indiquant un courant remontant dans le canal). Un zoom sur le mois de juin 2021 (Figure 34) montre l'existence d'oscillations dans la courbe. Celles-ci sont en grande partie reliées à l'effet des marées. On observe cependant aussi des périodes de plusieurs jours d'affilée où le débit est négatif (remontant), ce qui peut être expliqué par des conditions de vent de mer.

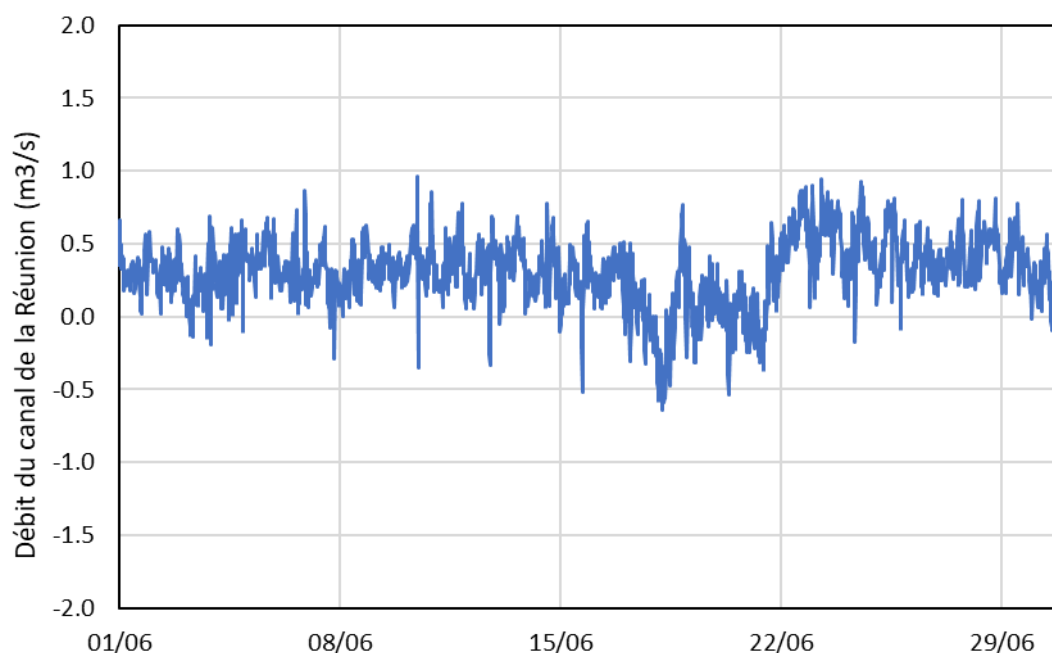


Figure 34 : Débit du canal de la Réunion mesuré par ADCP à l'aval du Pont des Pâtres (zoom sur le mois de juin 2021)

Le grand pic de débit observable en novembre 2021 (Figure 33 et zoom à la Figure 35) correspond à la crue liée au fort épisode orageux méditerranéen survenu ce mois-là (Figure 19). La courbe de débits durant cet évènement (histogramme de crue) présente une forme assez classique, hormis en ce qui a trait à la brusque chute et remontée du débit survenant durant la décrue. Cette chute n'est pas explicable en l'état avec les informations disponibles. Elle pourrait correspondre à une mise en charge de Campagnol ou du canal du Grazel bloquant l'écoulement d'eau dans le canal de la Réunion ou à un aveuglement temporaire de l'appareil (envasement, obstacle devant les cellules de mesure).

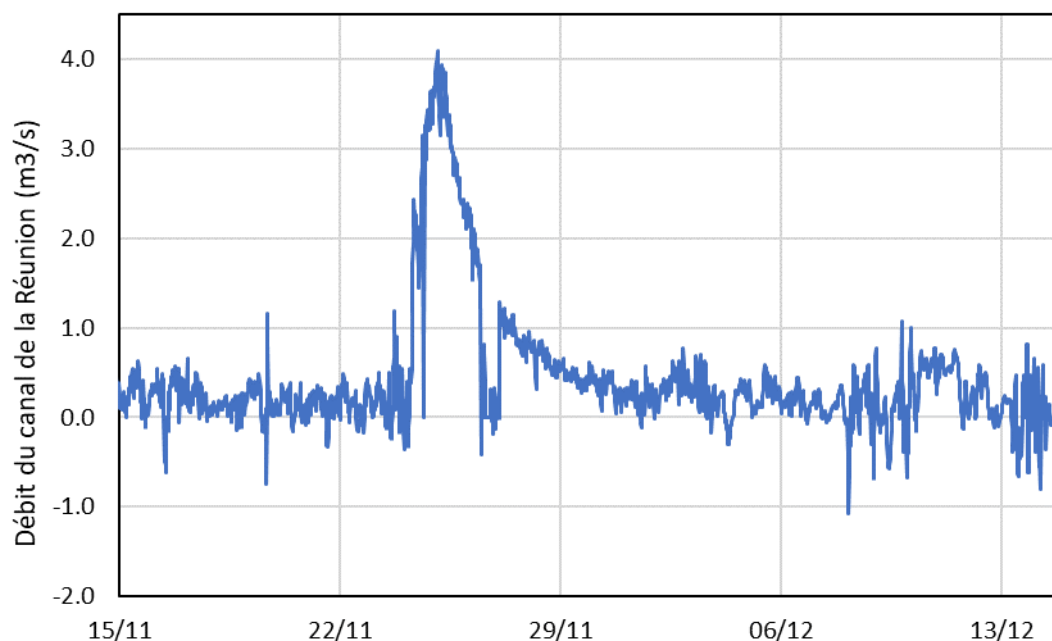


Figure 35 : Débit du canal de la Réunion mesuré par ADCP à l'aval du Pont des Pâtres (zoom sur le mois de novembre 2021)

La Figure 36 présente le volume cumulé (calculé à partir des débits mesurés par ADCP) descendant le canal de la Réunion à l'aval du Pont des Pâtres. Les trois parties disjointes de la courbe cumulée ont été réalignées de façon manuelle en suivant la tendance des courbes. Les parties les plus verticales de la courbe correspondent à des écoulements amont-aval importants, alors que les parties plus horizontales reflètent l'absence d'écoulement ou des flux montants-descendants se compensant. Selon cette figure, le volume cumulé sur cette période de 10 mois a été de 5.5 M.m³ (millions de m³).

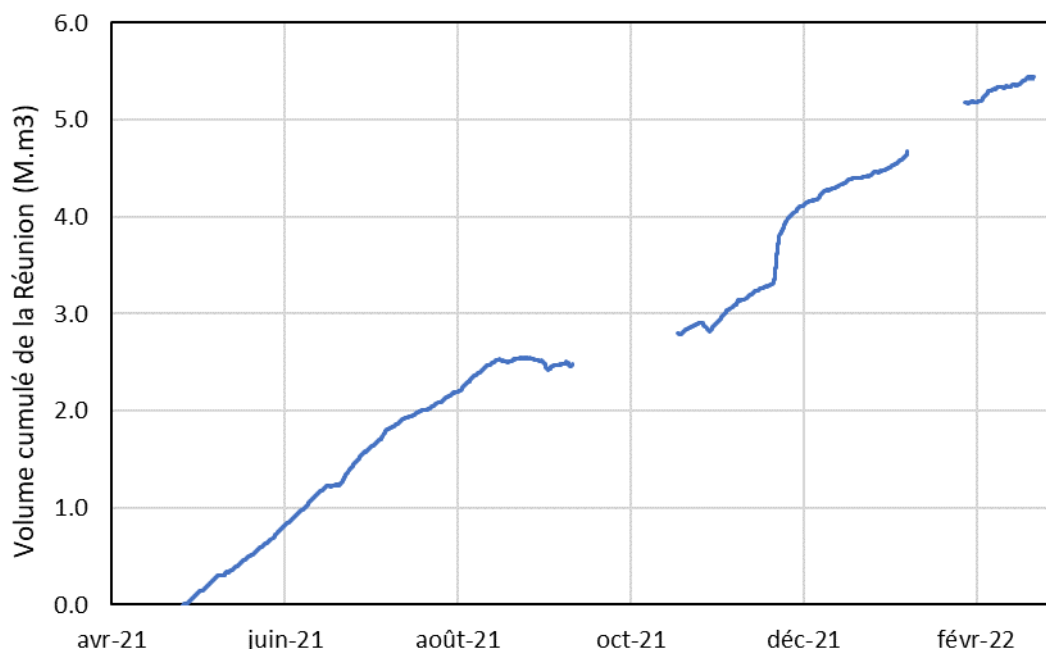


Figure 36 : Volume cumulé (mesuré par ADCP) descendant le canal de la Réunion à l'aval du Pont des Pâtres

Sur cette même période, les pluies efficaces (calculées avec les données de la station de Narbonne) ont totalisé 94 mm. Considérant un bassin versant du Canal de la Réunion au Pont aux Pâtres de l'ordre de 70.4 km², cette hauteur de pluie efficace correspond à un volume de 6.6 M.m³. Ce volume est du même ordre de grandeur que le volume cumulé mesuré par ADCP. Les volumes sont nécessairement différents car de nombreux autres flux (positifs ou négatifs) ne sont pas pris en compte : ré-humidification des sols, recharge des nappes, apport d'eau souterraine, évapotranspiration sur les surfaces en eau et les zones humides, apport amont du canal de la Réunion, retours des eaux d'irrigation des ASA, ...

La compilation par le PNR des apports d'eau aux ASA ferait ressortir des volumes de l'ordre de 9 à 10 Mm³ en 2021, concentrés sur la période avril à décembre. La comparaison de ces chiffres avec ceux discutés ci-avant semblent indiquer que ces pertes contribuent principalement à recharger les sols et les nappes, plutôt qu'à contribuer à des écoulements superficiels.

4.2. Débit du principal exutoire des rizières

La Figure 37 présente la chronique des débits du principal exutoire des rizières (débits mesurés par ADCP sur la période d'avril à novembre 2021). En avril et mai, les débits sont faibles et directement influencés par la marée. A partir de juin, les débits deviennent globalement positifs, même si l'effet yoyo lié à la marée demeure. Après octobre, les débits redeviennent généralement faibles. Un vent de mer induit fin octobre une importante remontée d'eau dans le canal (valeurs négatives de débit), compensée par une sortie marquée d'eau durant les jours suivants. La crue de novembre a remis en suspension tous les sédiments des canaux et a entraîné l'envasement de l'appareil (stoppant l'acquisition de données).

La Figure 38 présente le volume cumulé (obtenu par les mesures ADCP de débit) issu de l'exutoire principal des rizières. Cette courbe montre bien les flux importants survenant autour de juillet, et ceux très importants au début septembre. Ces flux pourraient correspondre aux pratiques de mise-en-eau – vidange des rizières. Entre avril et juin, le flux net est nul, les débits entrants et sortants se compensant. Un volume cumulé de 0.75 M.m³ serait donc contribué à Campagnol par l'irrigation des rizières.

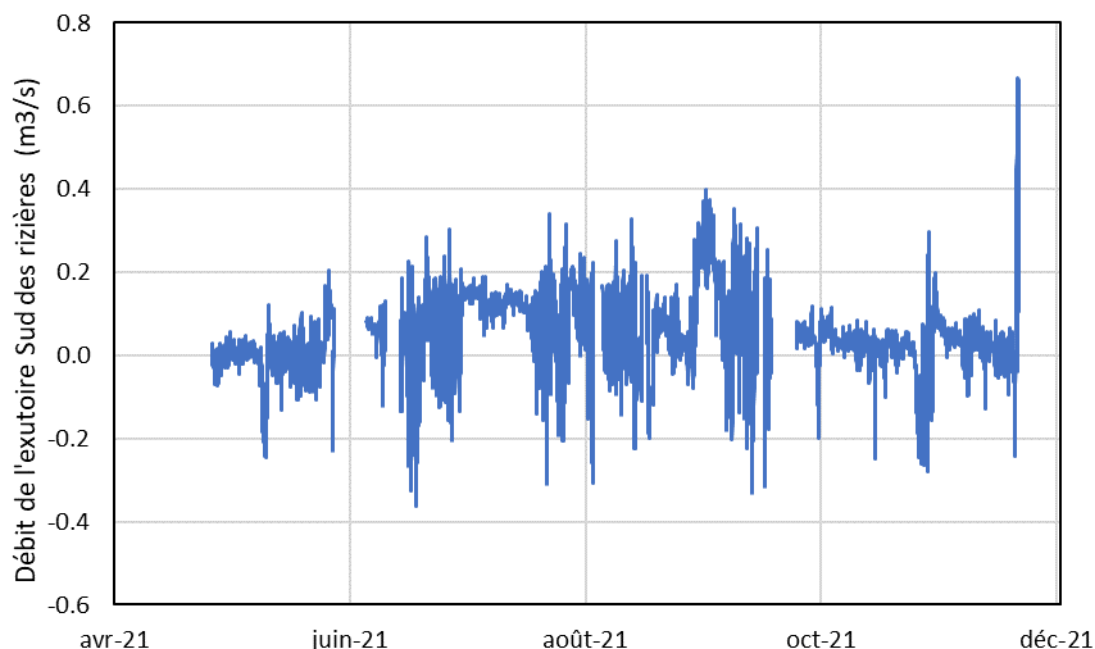


Figure 37 : Débit du principal exutoire des rizières mesuré par ADCP (avril à novembre 2021)

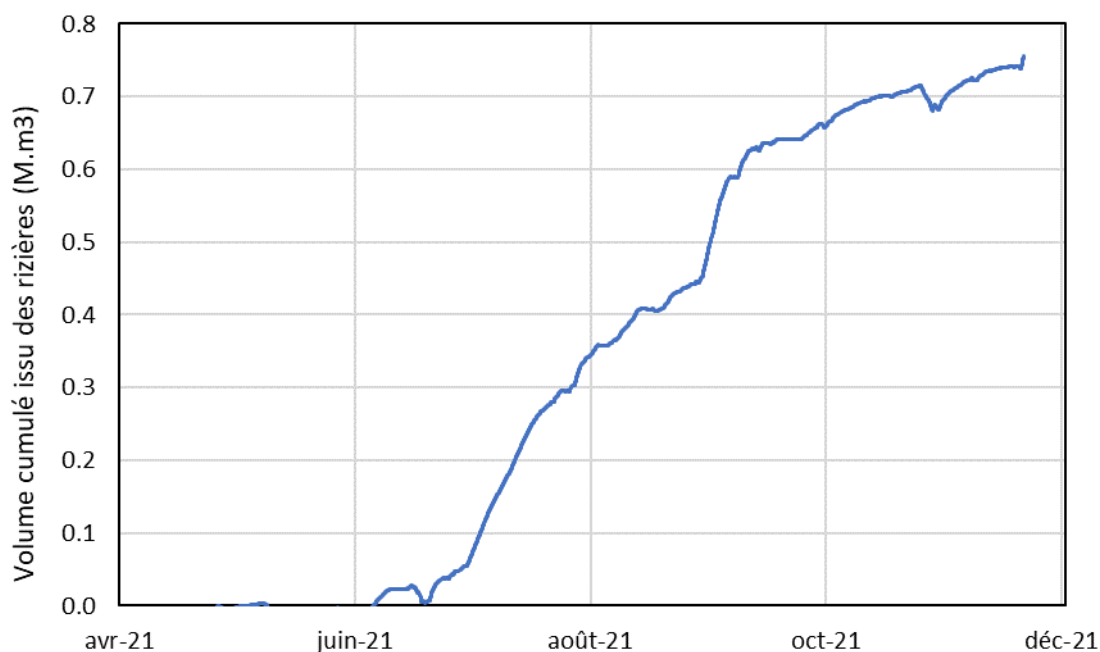


Figure 38 : Volume cumulé (mesuré par ADCP) issu de l'exutoire principal des rizières

4.3. Débit de la passe entre Campagnol et Ayrolle

La Figure 39 présente le débit sortant de l'étang de Campagnol (positif = sortant ; négatif = rentrant) mesuré par ADCP entre septembre 2021 à avril 2022. Les débits échangés peuvent être parfois très

importants, dépassant 50 m³/s, et peuvent être autant sortants que rentrants. L'évènement méditerranéen de novembre 2021 s'est d'abord manifesté par une entrée d'eau dans Campagnol (sûrement lié au vent de mer accompagnant l'évènement orageux), puis par un important débit sortant (lié à l'apport d'eau depuis le bassin versant de Campagnol).

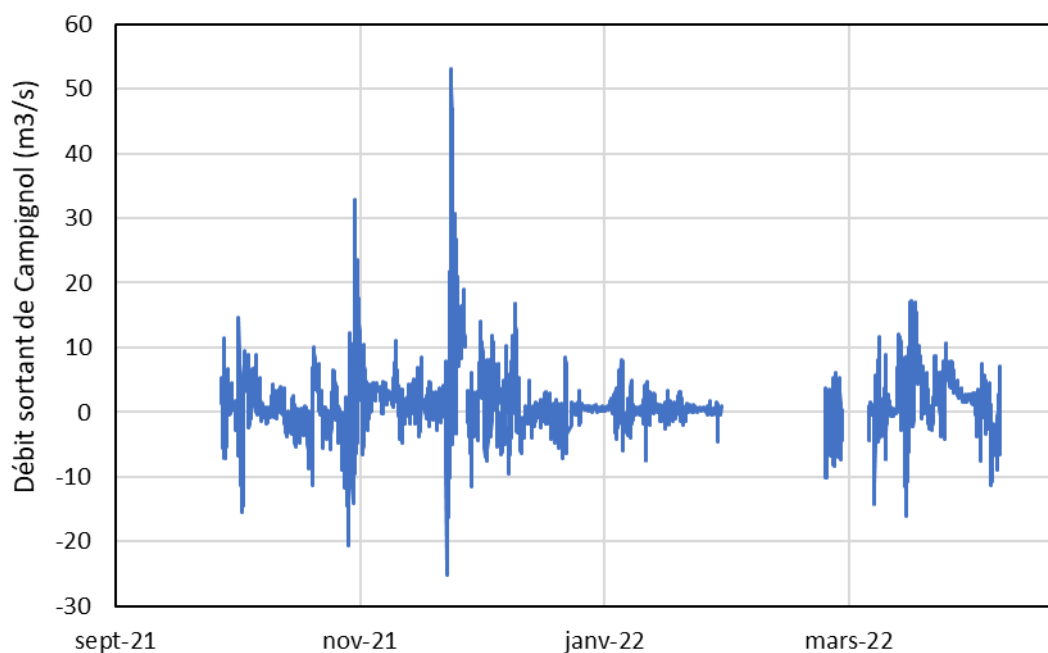


Figure 39 : Débit sortant de Campagnol mesuré par ADCP (septembre 2021 à avril 2022)

La Figure 40 présente le volume cumulé sortant de Campagnol (mesuré par ADCP). Le volume cumulé est de 18 M.m³ sur 6.5 mois, soit un volume cumulé bien plus important que celui observé sur le canal de la Réunion au Pont aux Pâtres.

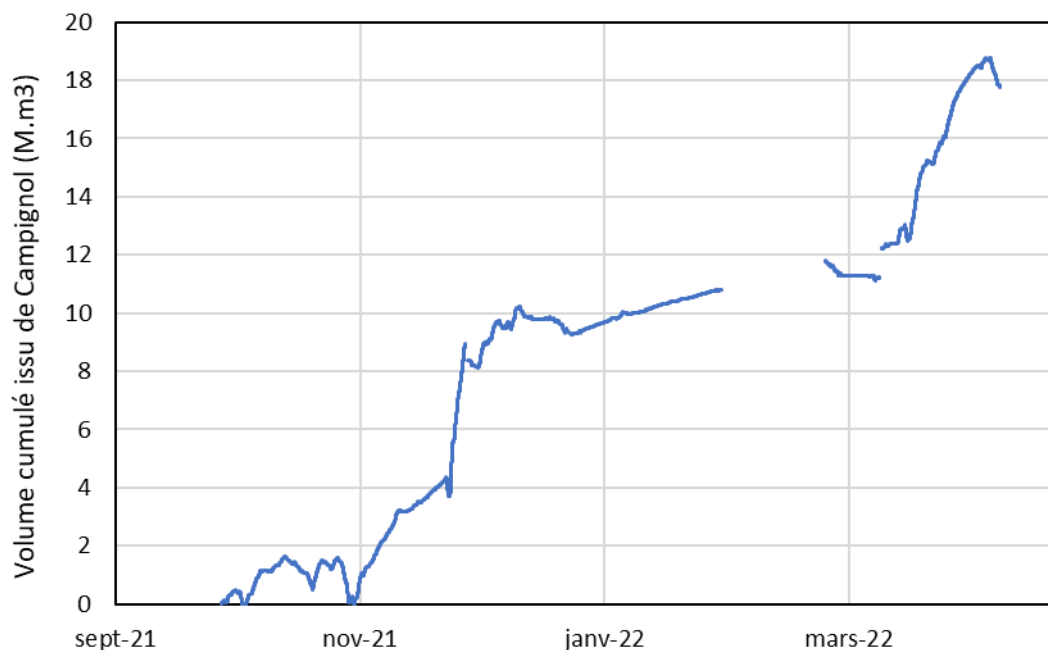


Figure 40 : Volume cumulé sortant de Campagnol (mesuré par ADCP)

Sur la période commune de suivi des deux ADCP (octobre 2021 – février 2022), le cumul au Pont aux Pâtres a été de l'ordre de 3 M.m³, alors qu'il a été de 11.7 M.m³ sur la passe, soit une différence de 8.7 M.m³. Considérant la surface du bassin versant du canal de la Réunion à la station ADCP du Pont aux Pâtres (70.3 km²) et celle de l'étang de Campagnol (80.52 km² incluant le précédent), les volumes cumulés spécifiques sont de 0.043 M.m³/km² pour la station du Pont aux Pâtres et de 0.145 M.m³/km² pour la passe. Le débit cumulé spécifique est donc 3.4 fois plus important à la sortie de Campagnol qu'au Pont aux Pâtres. Ceci implique des apports proportionnellement plus importants dans la partie aval du bassin versant.

4.4. Reconstitution de chroniques de débit sur 18 mois

La reconstitution d'une chronique de débits de 18 mois (octobre 2020 – avril 2022) au Pont aux Pâtres et sur la passe a été tentée en considérant :

- La différence des hauteurs d'eau [Diff(H)] mesurées à la station SMMAR du Pont des Pauvres et sur Campagnol (pour le calcul du débit au Pont aux Pâtres) et sur les étangs de Campagnol et de l'Ayrolle (pour le calcul du débit sur la passe) ;
- La surface [S] de la section d'écoulement au Pont aux Pâtres et dans la passe, calculée à partir de la hauteur d'eau ;
- La valeur journalière moyenne des pluies enregistrées à Moussoulens et à Gruissan, lissée sur 4 jours (afin de tenir compte de la rétention temporaire de l'eau).

L'équation utilisée est de la forme :

$$\text{Débit} = \text{Diff(H)} \times S \times \text{coeff_A} + \text{Pluie} \times \text{coeff_B}$$

Où les coefficients coeff_A et coeff_B sont des paramètres d'ajustement de la courbe cumulée reconstituée. Ces coefficients sont ajustés de façon à ce que la courbe reconstituée s'ajuste au mieux sur la courbe cumulée issue des débits mesurés par ADCP. Il s'agit donc de paramètres de calage. La valeur des coefficients peut être différente selon la saison (pour refléter la variation de la reprise évaporatoire et celle de la saturation en eau du sol).

La Figure 41 présente la courbe cumulée reconstituée des débits (courbe bleue) par ajustement de la courbe cumulée mesurée par ADCP (courbe rouge) sur le canal de la Réunion au Pont aux Pâtres. La figure montre l'ajustement réalisée de la courbe bleu sur les données de la courbe rouge. On observe une pente relativement constante de la courbe entre décembre 2020 et août 2021, semblant indiquer des apports constants durant toute cette période. Considérant que le canal était en chômage (pas d'apport d'eau depuis l'amont) en décembre, ceci semblerait montrer la contribution d'autres apports (pluies sur le bassin versant, apport d'eau de nappe).

La Figure 42 présente la courbe cumulée reconstituée des débits (courbe bleue) par ajustement de la courbe cumulée mesurée par ADCP (courbe rouge) sur la passe entre Campagnol et Ayrolle.

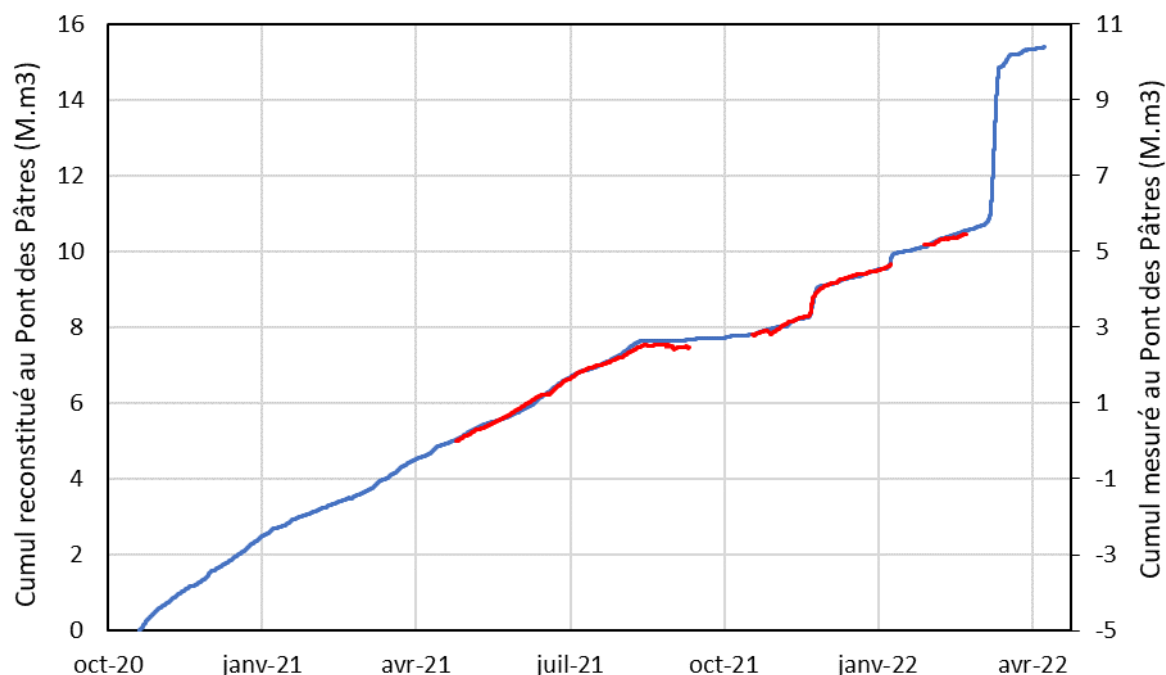


Figure 41 : Courbe cumulée reconstituée des débits (courbe bleue) par ajustement de la courbe cumulée mesurée par ADCP (courbe rouge) sur le canal de la Réunion au Pont aux Pâtres

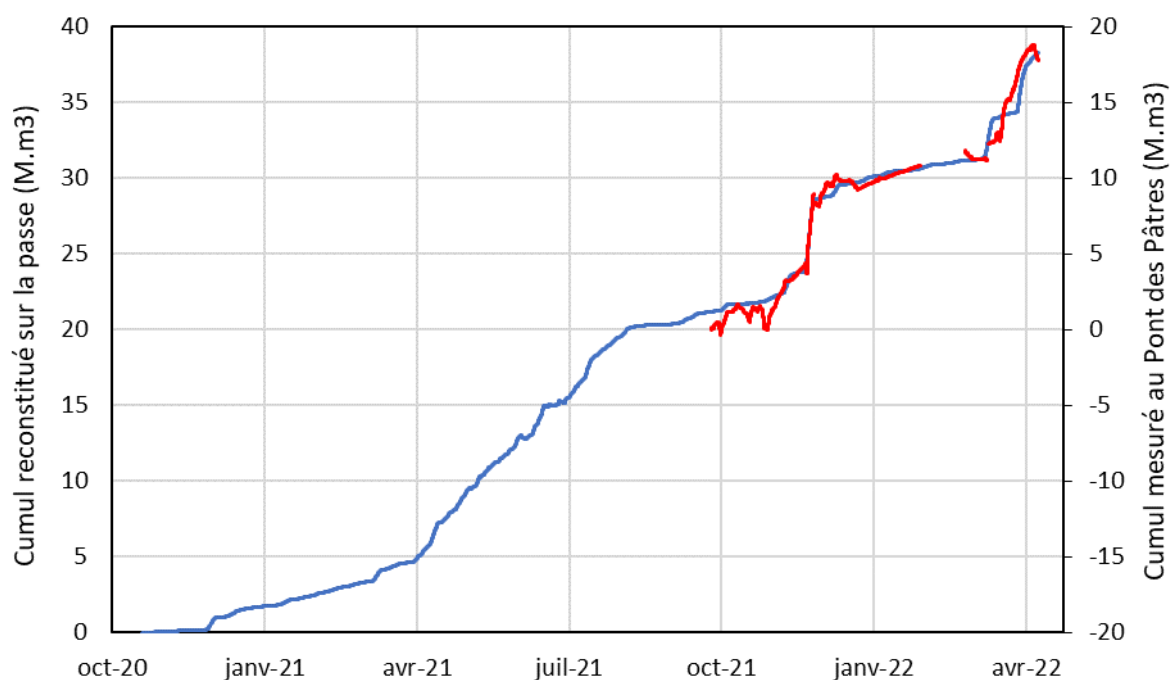


Figure 42 : Courbe cumulée reconstituée des débits (courbe bleue) par ajustement de la courbe cumulée mesurée par ADCP (courbe rouge) sur la passe entre Campagnol et Ayrolle

Rappelons qu'il s'agit de courbes cumulées reconstituées par ajustement des courbes cumulées mesurées. Elles peuvent donc ne pas refléter précisément la réalité, en particulier durant les périodes où l'on ne dispose pas de données mesurées. La courbe reconstituée montre une pente importante en été 2021, qui est difficile à expliquer par les apports des ASA. Ceci laisserait supposer d'autres sources d'apports (drainage des nappes en particulier).

La courbe reconstituée de la Figure 42 présente durant l'été 2021 (avril – août) une pente trois fois plus forte que durant la période précédente. Ces apports plus importants prenant place en été dans la partie aval du bassin versant pourraient correspondre à une contribution des eaux fournies à l'ASA du petit Mandirac (zone des rizières). La fourniture d'eau à cette ASA s'effectue entre avril et septembre et totalisait 3.21 M.m³ en 2021. Ce volume ne peut donc expliquer une telle augmentation des débits d'écoulement de la passe durant l'été.

Un second ajustement a donc été recherché de telle façon que les pentes prenant place avant et après avril 2021 soient moins contrastées. La Figure 43 présente la courbe issue de ce second ajustement. Même si l'ajustement est moins bon que le précédent sur la fin de la courbe, il paraît tout aussi acceptable. Dans ce cas (Figure 43), le volume cumulé sur 18 mois est légèrement plus faible (31.5 M.m³ par rapport à 38.3 M.m³). Dans les deux cas, le volumes cumulé sur la passe est toujours bien plus élevé qu'au Pont aux Pâtres.

La Figure 44 compare les courbes cumulées reconstituées au Pont aux Pâtres et sur la passe entre Campagnol et Ayrolle (avec les deux ajustements). Les schémas d'évolution des courbes cumulées du canal de la Réunion et de la passe sont assez différents, en particulier sur l'incidence des deux événements méditerranéens. L'évènement de novembre 2021 a induit un écoulement beaucoup plus important sur la passe qu'au Pont aux Pâtres. En revanche, l'évènement de mars 2022 a eu globalement le même type d'incidence. Cette différence pourrait s'expliquer de deux façons : (1) une pluviométrie plus importante durant le premier événement sur la partie aval du bassin versant que sur l'amont, (2) une efficacité moins importante de la pluie dans la partie amont du bassin du fait de la rétention de l'eau sur les surfaces et de la re-saturation des sols.

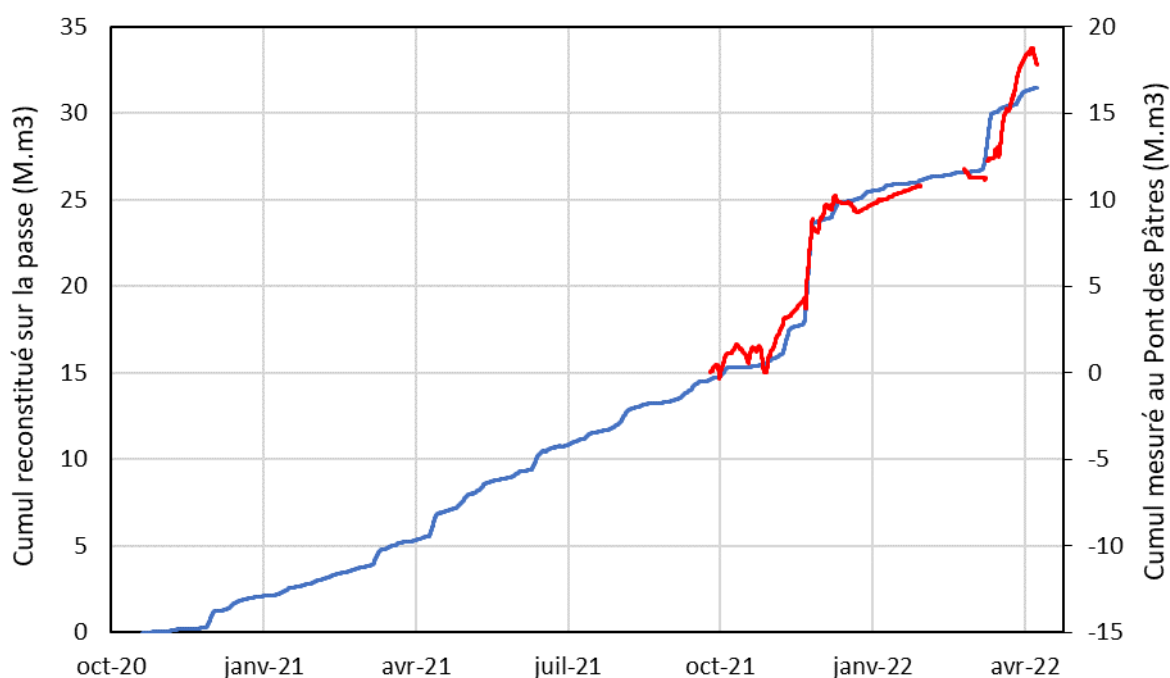


Figure 43 : Seconde courbe cumulée reconstituée des débits (courbe bleue) par ajustement de la courbe cumulée mesurée par ADCP (courbe rouge) sur la passe entre Campagnol et Ayrolle

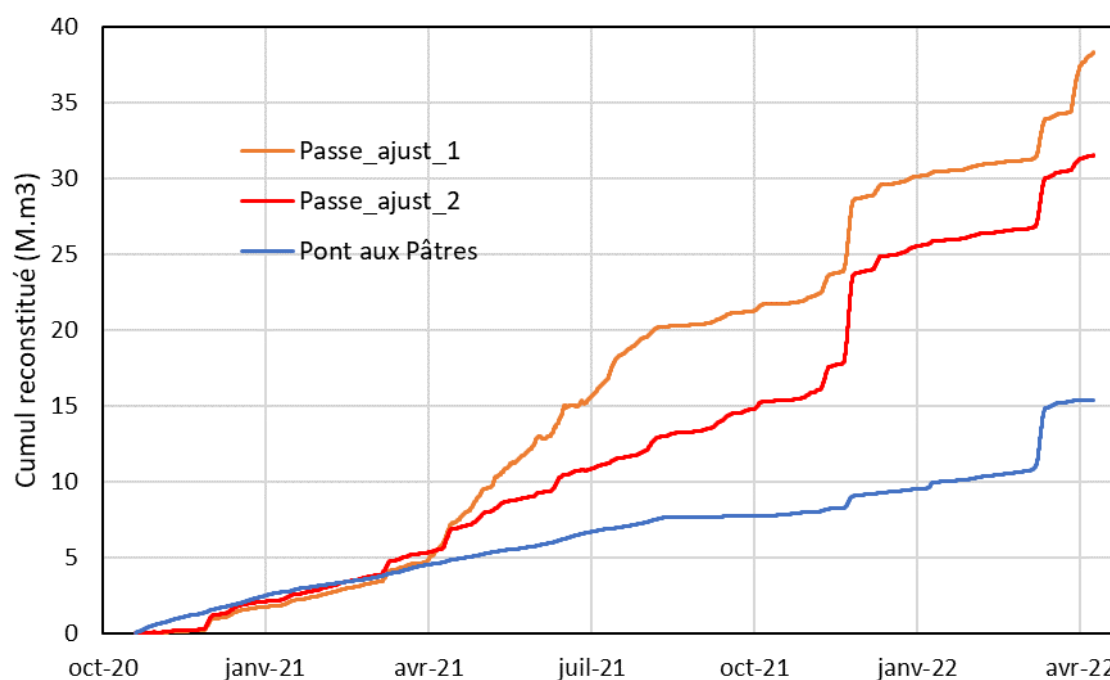


Figure 44 : Comparaison des courbes cumulées reconstituées au Pont aux Pâtres et sur la passe entre Campagnol et Ayrolle (avec les deux ajustements)

La connaissance des apports hydriques à Campagnol est un élément important dans l'étude des flux de nutriments apportés à cet étang. Le projet devait disposer pour cela d'un suivi des débits sur le canal de la Réunion amont. Malheureusement, la station du SMMAR existante n'a pas été en mesure de fournir les chroniques de débits attendues.

Des suivis à haute fréquence des débits sur le canal de la Réunion, la passe entre Campagnol et l'Ayrolle et à l'exutoire Sud des rizières ont été réalisés sur plusieurs mois. Des relations empiriques ont pu être établies entre les débits et les différences de hauteurs des niveaux d'eau, en tenant également compte de la pluie. Grâce à ces relations empiriques, une reconstitution des débits échangés a pu être proposée.

Le projet de 12 mois ayant par ailleurs été étiré sur 18 mois, les débits ont été reconstitués sur cette période de 18 mois. Cet étirement du projet sur 18 mois a également permis de caractériser deux événements de crues survenus à l'issue des 12 mois initialement prévus pour le projet. Différentes conditions hydrologiques ont donc pu être caractérisées.

5. Bilan hydrologique sur 18 mois

La réalisation du bilan des flux de nutriments apportés à l'étang de Campagnol nécessite dans un premier temps d'établir le bilan hydrologique de cette lagune. Nous disposons pour cela d'un certain nombre d'informations obtenues dans le cadre de cette étude :

- Débits reconstitués sur 18 mois au pont aux Pâtres et sur la passe entre les étangs de Campagnol et de l'Ayrolle,
- Précipitations à Narbonne, Moussoulens et Gruissan,
- Evapotranspiration potentielle (ETP) calculé par Météo-France sur ce secteur,
- Surface des bassin versants en amont du Pont aux Pâtres et en amont de la passe.

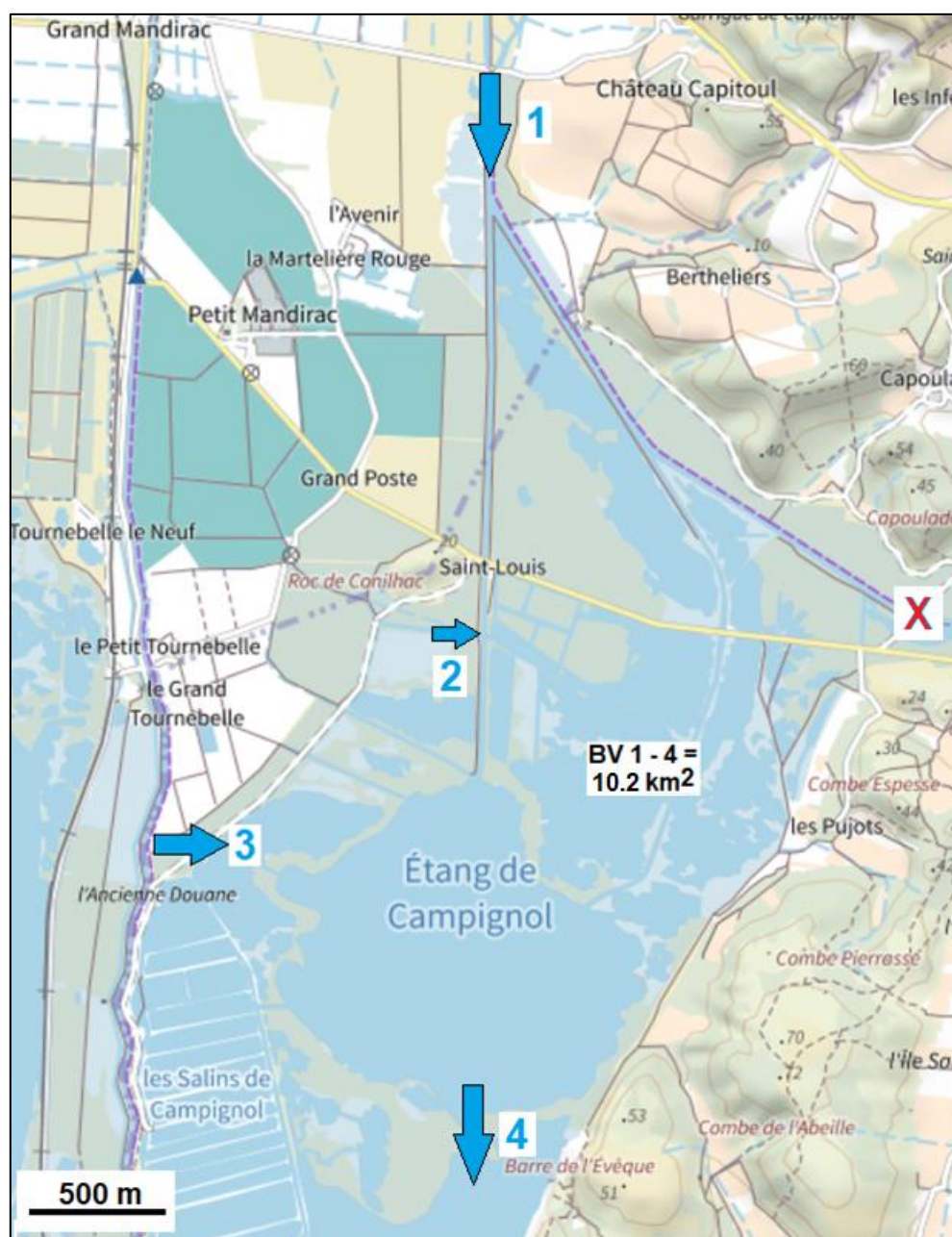


Figure 45 : Principaux flux à considérer pour l'établissement du bilan hydrique entrée-sortie de l'étang de Campagnol (1 = débit au Pont de Pâtres ; 2 = débit à l'exutoire des rizières du Petit Mandirac ; 3 = apports potentiels par le canal de la Robine ; 4 = débit sortant de Campagnol au droit de la passe)

Le bilan hydrique de Campagnol sera réalisé sur 18 mois sur une base trimestrielle, entre le Pont aux Pâtres (point 1 de la Figure 45) et la passe (point 4 de la même figure) en tenant compte des flux suivants :

- Volumes d'eau entrant au pont aux Pâtres,
- Précipitations tombant sur la partie aval du bassin versant (entre le pont aux Pâtres et la passe),
- Evapotranspiration s'exerçant sur cette même partie aval du bassin versant,
- Apports des retours d'irrigation des rizières,
- Eventuels apports par le canal de la Robine,
- Volumes d'eau sortant par la passe entre les étangs de Campagnol et de l'Ayrolle.

5.1. Apports des pluies et pertes par évapotranspiration

Nous ne considérons ici que les apports et pertes prenant place sur la partie aval du bassin versant (entre le pont aux Pâtres et la passe). Sur cette partie du bassin, sont différenciées les surfaces 'sèches' et les surfaces 'humides' (zones humides et plans d'eau). Sur les surfaces 'sèches' sont prises en compte les précipitations efficaces calculées précédemment (voir section 1.4). Sur les surfaces 'humides', sont considérées les précipitations et l'évapotranspiration, le bilan pouvant être négatif quand l'évapotranspiration excède les précipitations.

Trimestre	Pluie (mm)	ETP (mm)	Pluie efficace (mm)	Volume (M.m ³)		
				Zones 'sèches'	Zones 'humides'	Total
T1 (oct-déc 2020)	94.5	92.1	0	0	0.018	0.018
T2 (janv-mars 2021)	76.4	176.4	0	0	-0.755	-0.755
T3 (avr-juin 2021)	71.8	468.9	0	0	-2.998	-2.998
T4 (juil-sept 2021)	130.4	475.3	0	0	-2.604	-2.604
T5 (oct-déc 2021)	281	120.3	93.3	0.249	1.213	1.462
T6 (janv-mars 2022)	198.1	190.6	59.9	0.16	0.057	0.217
Total	852.2	1523.6	153.2	0.409	-5.069	-4.660

Tableau 4 : Bilan hydrique de la partie aval du bassin versant tenant compte des précipitations et de l'évapotranspiration

Les apports météoriques sur la partie aval du bassin versant sont donc négatifs. Sur 18 mois, le déficit est de 4.66 M.m³.

5.2. Surplus hydriques des ASA

Sur la partie aval du bassin versant de Campagnol, seule l'ASA du Petit Mandirac peut participer à un apport par surplus d'irrigation (Figure 46). Toutes les autres ASA du secteur sont hors bassin versant ou situées en amont du pont aux Pâtres. Seule l'ASA du Petit Mandirac est donc prise en compte pour l'établissement du bilan.

Selon les données communiquées, 123 ha de l'ASA du Petit Mandirac (sur les 175 ha présents dans le bassin versant aval) ont été irrigués en 2021. Le volume d'eau de 3.2 M.m³ apporté entre mai et septembre sur ces 123 ha représente une lame d'eau équivalente de 2.6 m. L'ETP sur ces mois d'apport représente 844 mm. L'apport d'eau est donc excédentaire et une part importante (volume de 2.2 M.m³, soit une lame d'eau équivalente de 1.76 m) retourne au milieu par les canaux de drainage ou par infiltration dans le sol et la nappe. Un volume de 0.75 M.m³ a été mesuré à l'exutoire principal des rizières (Figure 38). L'eau excédentaire peut également transiter par les exutoires amont des rizières et par infiltration dans le sol et la nappe.

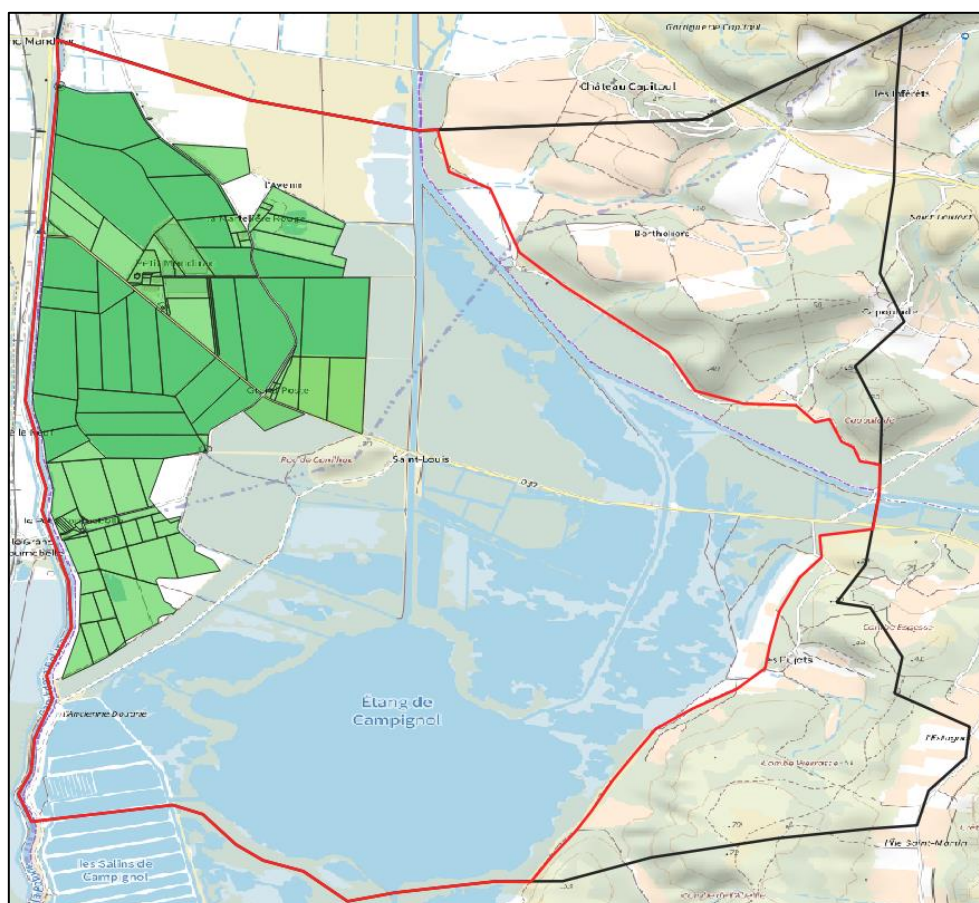


Figure 46 : Parcelles de l'ASA du petit Mandirac (en vert) incluses dans la partie aval du bassin versant de l'étang de Campagnol (trait noir) et sa zone humide ou en eau (trait rouge)

Mois 2021	Volumes ASA (m ³)	Evapotranspiration (mm)	Volume restant (m ³)
Mai	350 006	150.7	164 645
Juin	700 013	188.5	468 158
Juillet	858 427	208.9	601 480
Août	890 352	189.0	657 882
Septembre	409 536	107.4	277 434
Total	3 208 334	844.5	2 169 599

Tableau 5 : Bilan hydrique de la saison d'irrigation 2021 de l'ASA du Petit Mandirac

5.3. Pertes du canal de la Robine

Les pertes du canal de la Robine ont été évaluées dans l'étude VNF : Canal de la Robine : Quantification des pertes au droit des biefs de Roanel et de Sainte-Lucie du canal de la Robine (Novembre 2018). L'infiltration par le fond du canal est estimée à 590 000 m³/mois et les fuites à 160 000 m³/mois.

Sur la trentaine de km du canal de la Robine, les pertes mensuelles moyennes seraient ainsi de l'ordre de 25 000 m³/km. Le canal de la Robine longe la partie aval du bassin versant sur 3.72 km. Les pertes mensuelles potentielles seraient donc de 93 000 m³, à répartir potentiellement entre la rive droite et la rive gauche. Sur les 18 mois du suivi, le volume apporté par le canal de la Robine serait donc potentiellement de l'ordre de 0.84 M.m³.

Il serait également possible d'envisager que les pertes de la Robine prennent place et s'infiltrent sur tout le linéaire. Cette eau constituerait ainsi une recharge de la nappe d'accompagnement du canal de la Réunion et ressortirait plus en aval, au niveau de Campagnol, voire d'Ayrolle. Dans le bilan réalisé ci-après, cette infiltration amont depuis les pertes de la Robine est indirectement incluse dans les apports souterrains provenant de la paléo vallée.

5.4. Bilan hydrique par trimestre et sur 18 mois

Le Tableau 6 présente le bilan hydrique (en M.m³) de l'étang de Campagnol sur les 18 mois d'étude.

Trimestre	Entrée Pont aux Pâtres	Pluie – ETP sur BV aval	ASA Petit Mandirac	Canal de la Robine	Sortie Campagnol	Différence
T1 (oct-déc 2020)	2.75	0.02		0.14	2.35	-0.56
T2 (janv-mars 2021)	1.98	-0.76		0.14	3.77	2.40
T3 (avr-juin 2021)	2.14	-3.00	1.05 *	0.14	5.06	4.73
T4 (juil-sept 2021)	0.90	-2.60	2.16	0.14	4.14	3.65
T5 (oct-déc 2021)	2.16	1.46		0.14	10.54	6.78
T6 (janv-mars 2022)	5.46	0.22		0.14	5.64	-0.18
Total	15.38	-4.66	3.21	0.84	31.48	16.71

Tableau 6 : Bilan hydrique (en M.m³) de l'étang de Campagnol sur les 18 mois d'étude

(Le bilan hydrique prend directement en compte les apports bruts de l'ASA du Petit Mandirac car l'évapotranspiration sur les parcelles irriguées est déjà considérée dans le bilan météorique du bassin versant.)*

Le bilan montre que sur les 18 mois d'étude la moitié des volumes participant aux apports d'eau à l'étang de Campagnol demeure méconnue. Ces apports pourraient correspondre :

- à des arrivées d'eau souterraine,
- à des apports depuis le canal du Grazel.

Notons qu'il serait pertinent de pouvoir proposer des fourchettes de valeurs ou des pourcentages d'incertitude, mais les informations en notre possession n'en permettent pas le calcul ou l'évaluation. A dire d'expert, une incertitude de $\pm 20\%$ paraîtrait réaliste, une partie des incertitudes et des erreurs se compensant, l'une l'autre, ou dans le temps.

Mentionnons que le barrage du Pont jaune sur le canal du Grazel est fermé, mais que de l'eau peut cependant toujours passer au travers des buses présentes au droit du barrage. En considérant un débit toujours entrant (c'est-à-dire sans inversion du sens d'écoulement) de 10 à 30 l/s, le volume entrant durant 18 mois serait de 0.5 à 1.5 M.m³. Même avec cette hypothèse d'un écoulement unidirectionnel, ce volume ne peut expliquer seul le déficit observé dans le bilan hydrique. Il n'est donc pas exclu que de l'eau puisse passer au droit du barrage du Pont jaune et alimenter Campagnol, mais le volume potentiel ne pourrait expliquer le déficit du bilan hydrique.

Concernant les arrivées d'eau souterraine, celles-ci peuvent être :

- des eaux douces provenant de la plaine amont par la nappe occupant la paléo-vallée de l'Aude (flèche Nord-Sud de la Figure 47),
- des eaux douces karstiques provenant des reliefs calcaires voisins (de telles arrivées d'eau localisées sont connues des pêcheurs),
- des eaux salées 'chaudes' vraisemblablement profondes, émergeant tout le long de la bordure littorale (exemples de l'étang du Dou, des thermes de Conilhac et de Fontcaude).

Les apports souterrains d'eau douce à la lagune s'illustrent par les salinités très basses mesurées en fond de lagune (à l'interface eau – sédiment).

Le projet SALiN. (Salinisation des Aquifères Littoraux de la Narbonnaise, porté par un consortium associant le Parc naturel régional, Le Grand Narbonne, le BRGM et l'institut Agro de Montpellier) estime

HYDRIAD	Parc Naturel de la Narbonnaise en Méditerranée	Novembre 2022
---------	--	---------------

la recharge annuelle des nappes dans la plaine amont à une cinquantaine de mm. Pour un bassin versant total (excluant l'étang lui-même) de 73 km², la recharge serait de 3.65 M.m³ par an, soit de l'ordre de 5.47 M.m³ pour 18 mois. La résurgence au droit de l'étang de cette eau de recharge expliquerait pour partie le déficit du bilan. Il est cependant requis de considérer d'autres apports ou d'autres zones d'apport que le seul bassin versant topographique de l'étang. Des écoulements pourraient en effet provenir par la paléo-vallée depuis des secteurs situés en amont de l'Aude. De même, le massif de la Clape, voire celui des Corbières, pourraient contribuer à alimenter la nappe de la paléo-vallée.

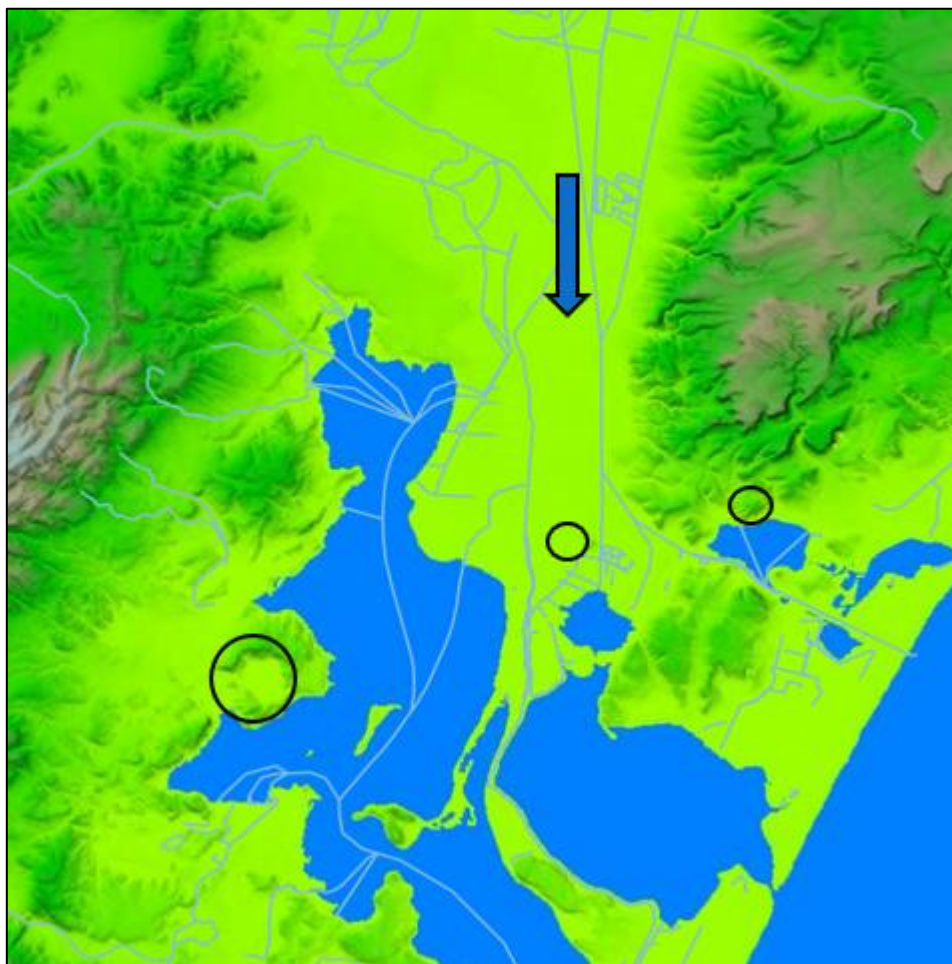


Figure 47 : Eléments géographiques d'explication des apports potentiels d'eau souterraine (la flèche bleue indique le tracé de la paléo-vallée de l'Aude, les cercles noirs les émergences salées et chaudes de l'étang du Dou, des thermes de Conilhac et de Fontcaude ; des apports karstiques peuvent prendre place depuis les reliefs calcaires, y compris depuis ceux situés en dehors du bassin versant de l'étang de Campagnol)

Le projet SALiN a évalué (à partir de la piézométrie et des propriétés hydrodynamiques) des sorties brutes vers les étangs de Bages-Sigean et de Campagnol-Ayrolle de l'ordre de 6.85 M.m³ par an, les sorties nettes étant de l'ordre de 5.3 M.m³/an du fait d'une alimentation locale des nappes par les étangs. La part profitant à l'étang de Campagnol est impossible à préciser.

A ce flux contribué par la recharge météorique des nappes, une recharge supplémentaire pourrait être induite par l'irrigation des ASA. Cependant, hormis pour le cas des rizières, les pratiques d'irrigation sur les parcelles sont rarement excédentaires. Ce sont donc principalement les pertes par infiltration des canaux d'irrigation qui peuvent induire de la recharge de nappe. Les ASA présentes sur le bassin versant amont sont celles de Raonel, Rêche et Ricardelle. Les volumes totaux utilisés par ces ASA sur les 18 mois de bilan ont été respectivement de 3.95, 2.87 et 4.12 M.m³ (les valeurs de janvier à mars 2022 ont été considérées identiques à celle de janvier – mars 2021), soit un total de 10.94 M.m³ pour les 18 mois.

Considérant (arbitrairement) des pertes de 50%, la contribution à la recharge de la nappe par les canaux d'irrigation serait de 5.47 M.m³.

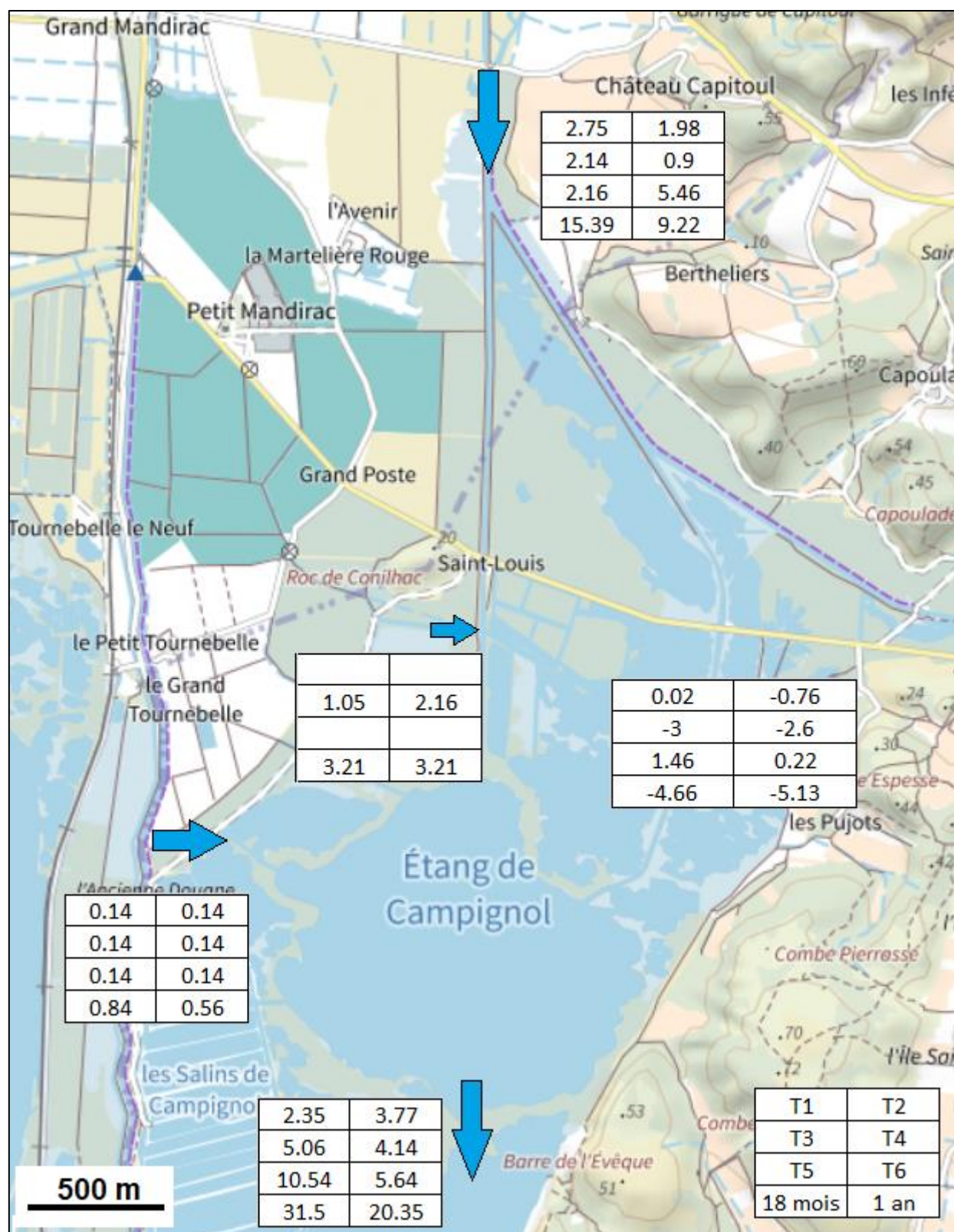


Figure 48 : Carte des flux hydriques trimestriels (en Mm³) entrant et sortant de l'étang de Campagnol sur les 18 mois d'étude et sur une année (en moyenne)

Finalement, les pertes et fuites du canal de la Robine peuvent également engendrer une recharge de la nappe de la paléo-vallée. En se basant sur les estimations de fuites et pertes de la Robine discutées à la section 5.3 et considérant un linéaire amont de 18 km, l'apport trimestriel serait de 0.675 M.m³, soit une total de 4.05 M.m³ sur 18 mois.

Le bilan hydrique de l'étang de Campagnol semble reposer de façon importante sur les apports d'eau souterraine. La provenance et l'importance de chacune des contributions est impossible à déterminer. Par ordre d'importance, ces contributions sembleraient être les suivantes :

- recharge induite par la pluie et prenant place sur le bassin versant de l'étang, pour un volume sur 18 mois de 5.5 M.m³,
- fuites des canaux d'irrigation des ASA amont pour un volume possible de l'ordre de 5.5 M.m³,
- infiltration des pertes et fuites du canal de la Robine pour un volume possible de l'ordre de 4.1 M.m³,
- contributions karstiques des massifs calcaires voisins (existence connue mais importance inconnue),
- résurgences d'eau salée chaude (existence connue mais importance inconnue),
- apport d'eau depuis des secteurs de la nappe alluviale de l'Aude situés en amont du bassin versant.

Notons que la reconstitution des débits amont fournit une estimation entre avril et octobre de l'ordre de 3 Mm³. On constate une valeur plus importante sur la reconstitution au niveau de la passe, de l'ordre de 10 Mm³, soit une différence de 7 Mm³. Durant cette période-là, la fourniture d'eau aux ASA amont a été entre avril et septembre de 8 8 Mm³ en 2021. Il ne serait donc pas exclu de penser que le surplus des eaux des ASA s'infiltre dans les nappes et par effet piston contribue à un apport d'eau souterraine à l'étang de Campagnol.

Outre ces apports d'eau souterraine, une entrée d'eau de mer par le barrage du Pont jaune n'est pas exclue, (possiblement de l'ordre de 1 M.m³), de même qu'une éventuelle contribution de l'étang de Gruissan durant les hautes eaux (événements méditerranéens).

Finalement, il n'est pas exclu que la recharge calculée avec les données de la station météorologique de Narbonne sous-estime la recharge prenant place en amont du bassin, comme le montre la différence de pluviométrie de la Figure 20.

Le suivi des débits sur le canal de la Réunion, sur la passe entre Campagnol et l'Ayrolle, et sur l'exutoire des rizières a montré que les débits échangés peuvent être très importants à cause de l'effet yoyo induit par la marée. Ainsi, beaucoup d'eau peut entrer et sortir de l'étang de Campagnol durant une journée, mais avec un bilan net (entrées – sorties) qui peut être faible, voire nul. Le bilan net de Campagnol est parfois positif (Campagnol → Ayrolle), parfois négatif (Ayrolle → Campagnol).

En dehors des périodes de pluies importantes (pendant les crues en particulier), le principal driver du sens et de l'importance des échanges demeure le vent. Durant les périodes pluvieuses, le débit est principalement entrant dans Campagnol depuis le Canal de la Réunion et sortant de l'étang de Campagnol vers l'Ayrolle. Les apports depuis le canal durant ces périodes représentent la plus grande part du bilan hydrique annuel.

De nombreux flux ne sont cependant pas connus, ni quant à leur importance dans le bilan annuel, ni dans leur fonctionnement et leur importance relative les uns par rapport aux autres. D'importants apports souterrains à Campagnol semblent exister. Les eaux de ces apports souterrains auraient des provenances différentes : recharge des nappes par les pluies, infiltration des surplus d'irrigation des ASA, fuites de la Robine et des autres canaux, apports depuis les massifs karstiques, apports depuis la nappe alluviale de l'Aude en amont de Narbonne, émergences d'eaux chaudes salées). Aucune connaissance n'existe à ce jour sur ces flux.

6. Qualité des eaux

Le suivi de qualité s'est échelonné de septembre 2020 à mars 2022. Il comprenait des suivis ponctuels 'mensuels' et des suivis évènementiels. Les points de mesures ont été présentés et décrits à la section 2.1.

Mentionnons que tous les points de mesure n'ont pas bénéficié du même nombre de prélèvements, certains points devant être prélevés de façon 'mensuelle', d'autres à une fréquence moindre.

La section suivante présente les résultats des suivis qualité des points de mesure avec leur fréquence respective attribuée par le cahier des charges de l'étude.

Remarque : Les graphiques suivants sont représentés selon la chronologie des échantillons et non pas en échelle temporelle. Il n'y a pas systématiquement eu un échantillonnage à chaque mois, et inversement plusieurs échantillons ont pu être réalisés certains mois. Ainsi par exemple, il n'y a pas d'échantillon entre mars et juin, alors que le mois de novembre présente trois échantillonnages en quelques jours. Il est parfois fait usage du terme « campagne mensuelle » sans que cela ne qualifie la fréquence des échantillonnages.

6.1. Mesures physico-chimiques in situ

Tel que mentionné à la section 2.2, des paramètres physico-chimiques d'appui (température, salinité, oxygène dissous) ont été mesurés après chaque prélèvement afin de compléter l'interprétation des données de qualité. Toutes ces mesures ont été transmises sous la forme d'une base de données et sont fournies en annexe de ce rapport.

a) Données de température

Le suivi in situ sur la période de 18 mois montre que l'évolution des températures suit une même tendance saisonnière pour tous les points de mesure avec des valeurs variant en moyenne de 5°C à 10°C pour les mois d'automne et d'hiver et de 15°C à 27°C pour les mois du printemps et d'été.

Les températures sont relativement homogènes dans les étangs de Campagnol et d'Ayrolle avec des températures régulièrement plus élevées dans Campagnol, peut-être moins influencé par l'effet de la mer que l'étang d'Ayrolle.

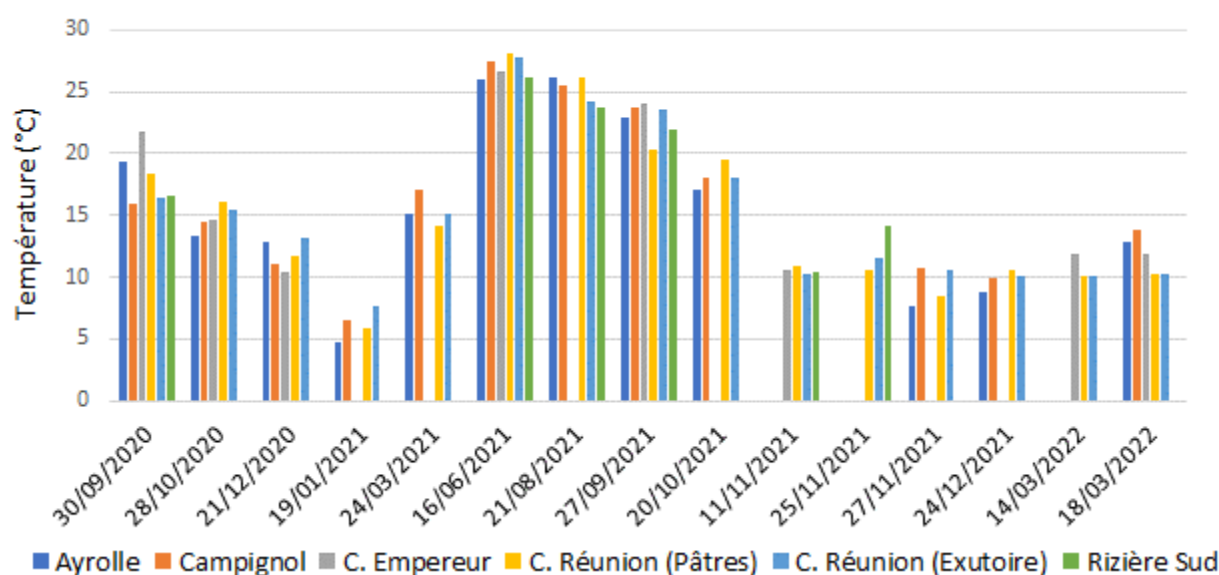


Figure 49 : Evolution de la température aux différents points de mesure

b) Données de salinité

La Figure 29 présente les valeurs de salinité des points de mesure sur la période de suivi.

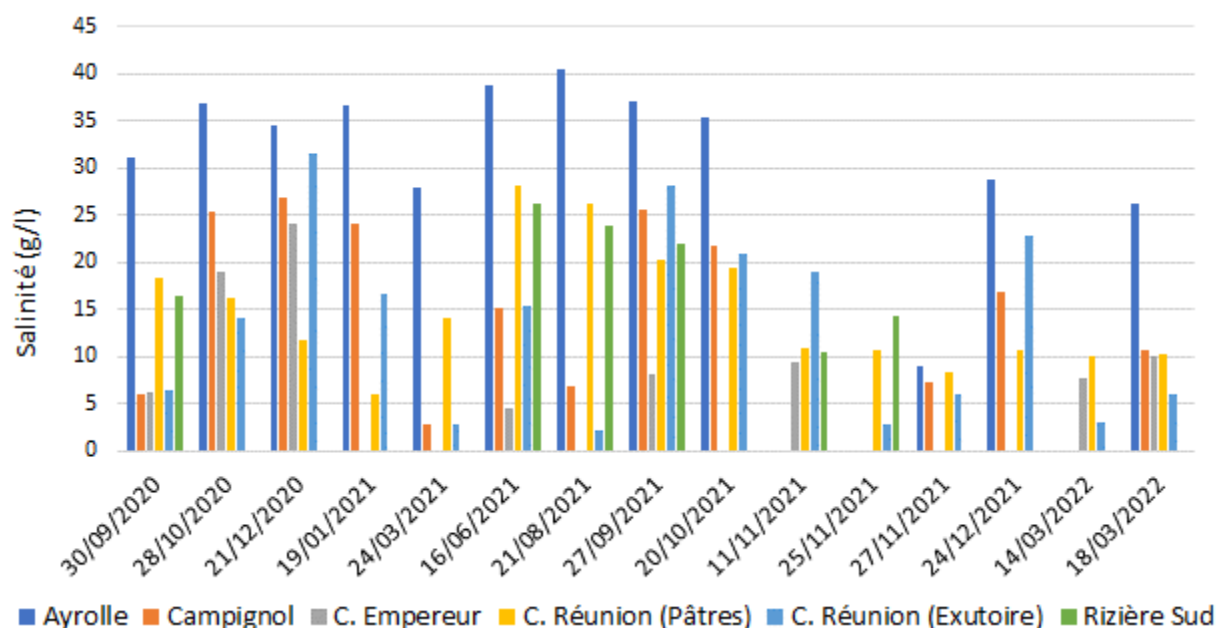


Figure 50 : Evolution de la salinité aux différents points de mesure

Les valeurs les plus élevées se situent dans l'étang d'Ayrolle et varient de 26 à 40 g/l (hors période de crue du 27/11/2021) contrairement à celles de Campagnol variant de 2,8 à 27 g/l sur la même période.

Les valeurs de salinité à l'exutoire de canal de la Réunion (2,1 à 31,7 g/l) sont assez similaires à celles de Campagnol et suivent la même tendance annuelle.

On remarquera la chute des valeurs de salinité en novembre 2021 reliée à l'épisode de crue.

Les valeurs de salinité au niveau du canal de la Réunion amont sont beaucoup plus faibles qu'à l'exutoire, de septembre 2020 à mars 2021, les mesures ayant été prises à la station du SMMAR (pont aux Pauvres). Cette zone est en effet influencée par les entrées d'eau marine (écoulement unidirectionnel) contrairement au suivi de juin 2021 à mars 2022 dont les mesures ont été effectuées au pont des Pâtres.

Sur le canal de l'Empereur les valeurs mesurées sur la période de suivi montrent une moyenne de 21,5 g/l à l'automne 2020. Par la suite, un abaissement des valeurs a été constaté de juin 2021 à mars 2022 suite à la limitation des entrées d'eau marines par la fermeture du barrage du Pont Jaune. La moyenne des valeurs de salinité sur cette dernière période est de 7,7 g/l.

Concernant l'évolution de la salinité, la Figure 51 montre pour l'étang de l'Ayrolle une augmentation des valeurs en période estivale contrairement à ce qu'on peut observer sur Campagnol où l'on constate *a contrario* une diminution des valeurs de salinité durant l'été.

Tel que mentionné auparavant, on note à l'exutoire du canal de la Réunion cette même tendance estivale de diminution des teneurs en sel. Le canal de la Réunion amont quant à lui suit la même évolution que l'étang de l'Ayrolle.

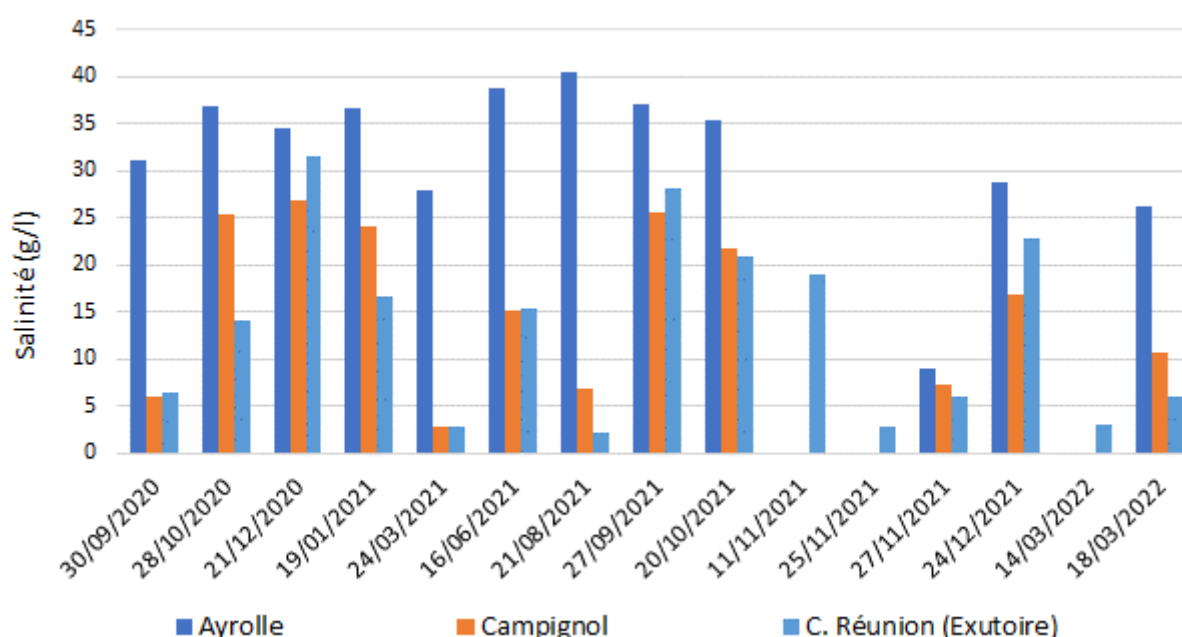


Figure 51 : Evolution saisonnière de la salinité sur les étangs et le Canal de la Réunion

c) Données de saturation en oxygène dissous

Le pourcentage moyen de saturation en oxygène dissous dans l'étang de l'Ayrolle est de 96% sur la période d'étude et de 86 % pour l'étang de Campagnol (Figure 52). Selon la grille d'interprétation de l'IFREMER, les résultats sont bons à très bons.

On remarque toutefois une diminution importante des valeurs en juin 2021 où la consommation d'oxygène est plus importante, engendrée par les températures estivales plus élevées, d'où l'état d'eutrophisation observé sur les étangs à cette période.

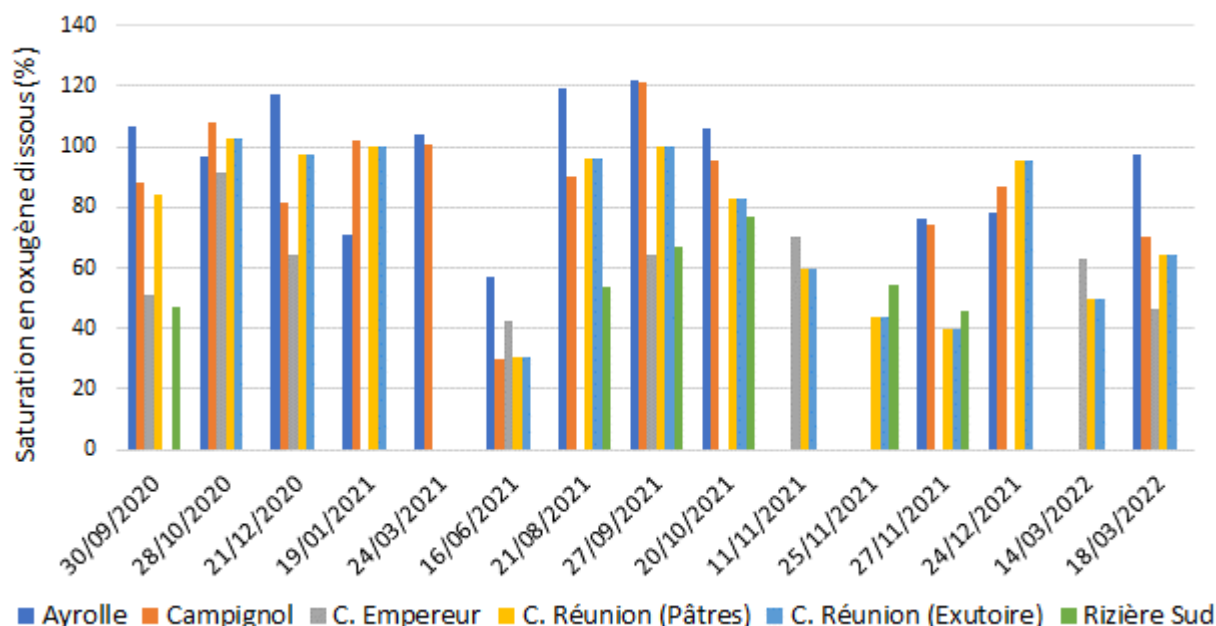


Figure 52 : Pourcentage de saturation en oxygène des points de mesure

Concernant les points plus en amont, le pourcentage de saturation en oxygène dissous moyen est de 74% pour le canal de la Réunion amont (pont des Pâtres), 69% à son exutoire et 61% pour le canal de l'Empereur.

Mentionnons par ailleurs l'impact de la crue de novembre 2021 sur la consommation d'oxygène sur le canal de la Réunion.

6.2. Analyses des formes de l'azote

Tel que mentionné à la section 2.3, les paramètres d'intérêt pour l'étude sont les formes totales, totales dissoutes, organiques et inorganiques dissoutes de l'azote :

- forme totale : NT
- forme totale dissoute : NTD
- formes inorganiques dissoutes : NO₂, NO₃, NH₄,
- formes organiques dissoutes : NOD = NTD - NID
- azote inorganique dissous : NID = NO₂ + NO₃ + NH₄

6.2.1 Formes de l'azote

Les figures suivantes présentent l'évolution des concentrations en azote total (NT) et de ses formes dissoutes organiques (NOD) et inorganiques (NID) sur les différents points de mesure au cours de la période de suivi.

Elles sont présentées géographiquement d'amont en aval pour mieux visualiser l'effet des écoulements du bassin versant vers les étangs de Campagnol et d'Ayrolle.

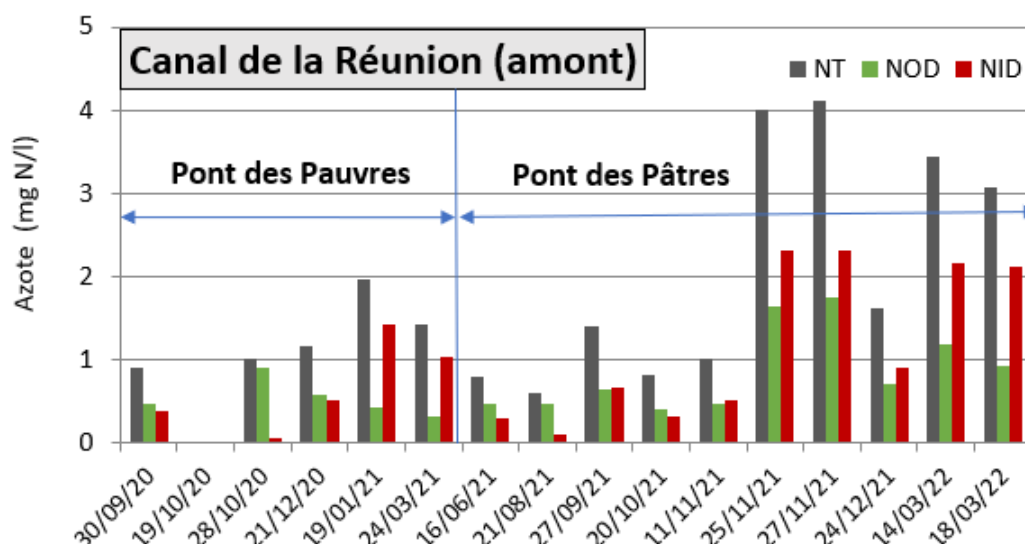


Figure 53 : Concentration en azote total et ses formes dissoutes sur le canal de la Réunion amont

Les concentrations en azote total au point amont du canal de la Réunion (Figure 53) varient de 0,5 et 2 mg N/l sur la période de suivi dans des conditions de faibles précipitations. On constate toutefois une légère augmentation des apports en azote pendant la période humide hivernale et l'impact significatif des épisodes de crues de novembre 2021 et mars 2022 sur les apports d'azote (3-4 mg N/l). L'azote inorganique dissous (NID) représente plus de 60% des apports en azote. Ces apports inorganiques proviennent essentiellement des activités anthropiques.

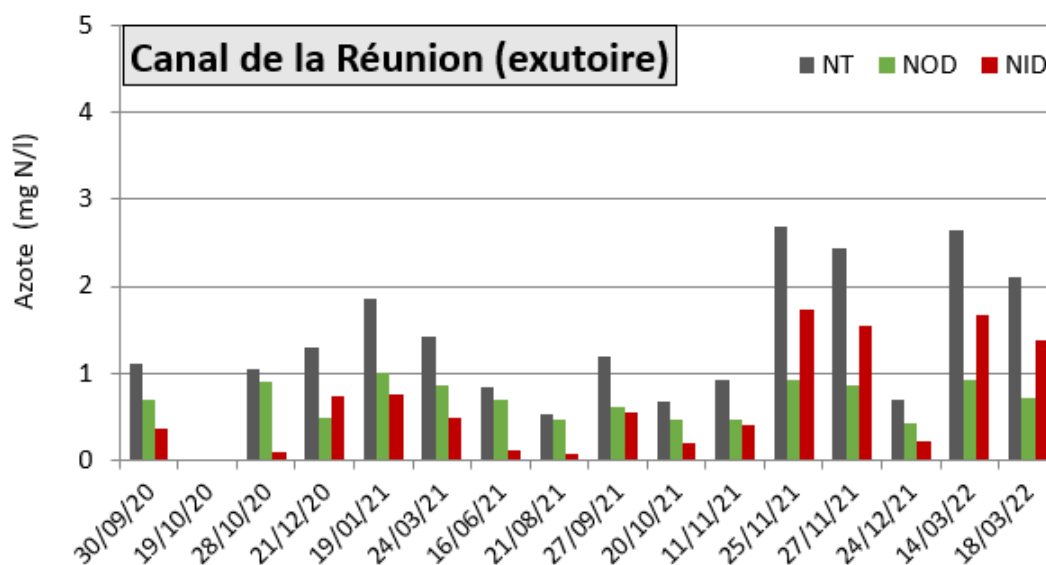


Figure 54 : Concentration en azote total et ses formes dissoutes à l'exutoire du canal de la Réunion

Les concentrations mesurées au niveau de l'exutoire du canal de la Réunion présentent la même évolution qu'en amont. Les concentrations en azote total varient également entre 0,5 à 2 mg N/L pendant l'année hydrologique 2020-2021. On remarquera l'impact des événements pluvieux sur les concentrations en azote totale, quoique moins important qu'en amont.

L'azote organique (NOD) est majoritairement présent, sauf lors des périodes humides hivernales et lors des crues où l'on observe un accroissement des apports en azote inorganique (NID). Rappelons, que les apports en azote organique sont issus entre autres de la décomposition de la matière organique

après la mort des organismes (plantes, animaux) mais aussi du lessivage par les pluies de la matière organique des sols du bassin versant.

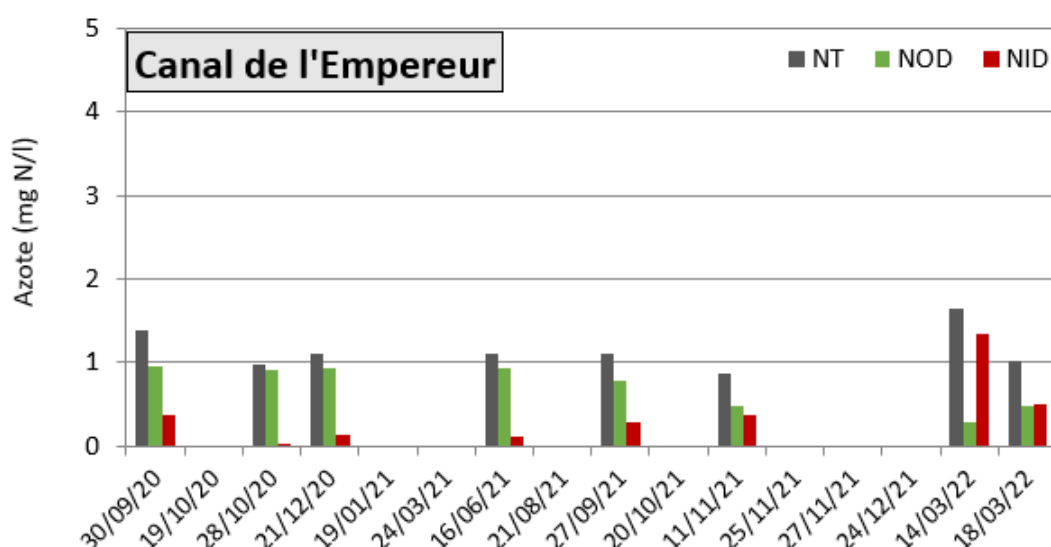


Figure 55 : Concentration en azote total et ses formes dissoutes au canal de l'Empereur

Les quelques prélèvements réalisés sur le canal de l'Empereur montrent des concentrations stables de l'ordre de 1 mg N/l en azote. L'azote est majoritairement constitué d'azote organique (NOD).

On remarque une légère augmentation de l'azote total lors de l'évènement de crue de mars 2022, avec un apport d'azote inorganique significatif par rapport aux précédents prélèvements.

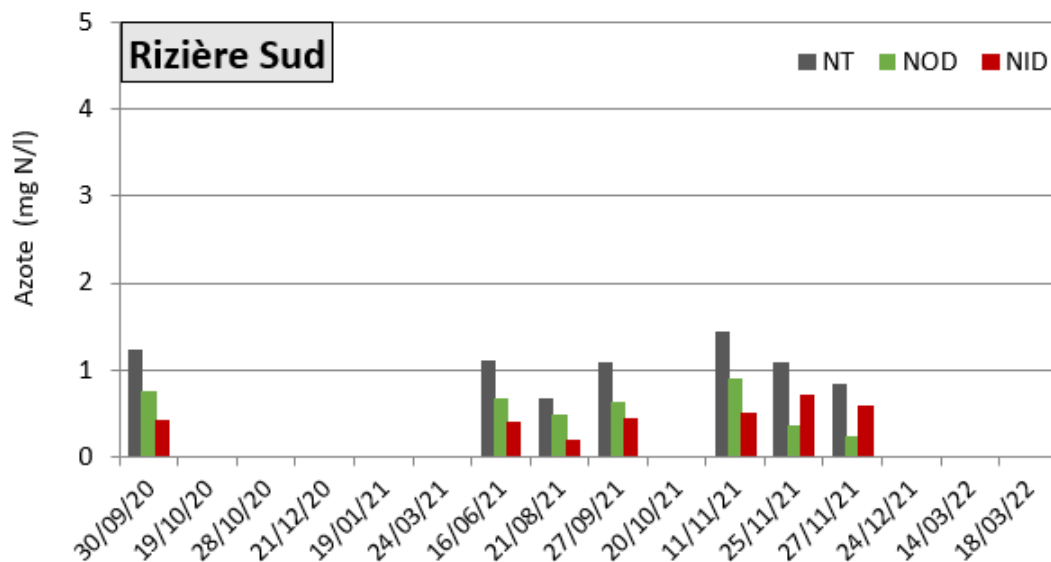


Figure 56 : Concentration en azote total et ses formes dissoutes à l'exutoire sud des rizières

Le suivi spécifique à l'exutoire sud des rizières ne montre pas d'importance particulière de sa contribution aux apports d'azote à Campagnol (voir suivi spécifique sur l'exutoire sud des rizières). Aucune augmentation significative n'a été détectée sur la période de suivi de la rizière. Les concentrations en azote total sont relativement équivalentes à celles retrouvées à l'exutoire du canal de la Réunion. On retrouve toutefois des concentrations en azote inorganique dissout plus élevées qu'à l'exutoire du canal de la Réunion pendant les périodes de vidanges probables des rizières (juin à septembre 2021).

La Figure 57 montre une tendance à la baisse des concentrations en azote de septembre 2020 jusqu'en octobre 2021. Les concentrations sont faibles et régulièrement sous les 1 mg-N/l. L'azote organique est majoritairement présent.

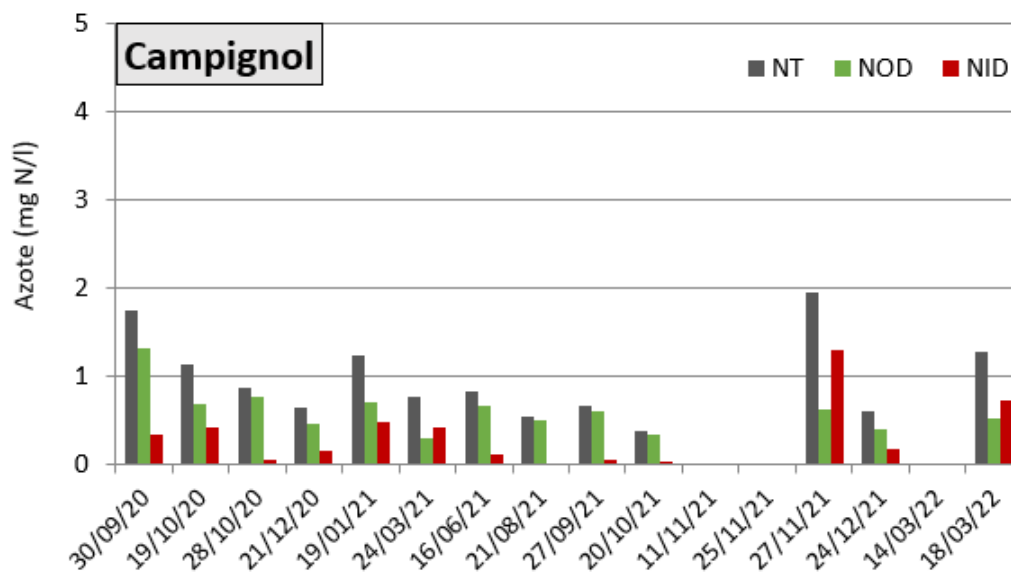


Figure 57 : Concentration en azote total et ses formes dissoutes dans Campagnol

Comme pour les points de mesure du canal de la Réunion, le ruissellement et le lessivage des sols causés par l'épisode de crue de novembre 2021 a généré un apport en azote significatif, majoritairement sous forme inorganique. L'épisode de mars 2022 a eu moins d'impact, mais toujours avec un apport inorganique plus important que lors des campagnes de prélèvement en situation normale.

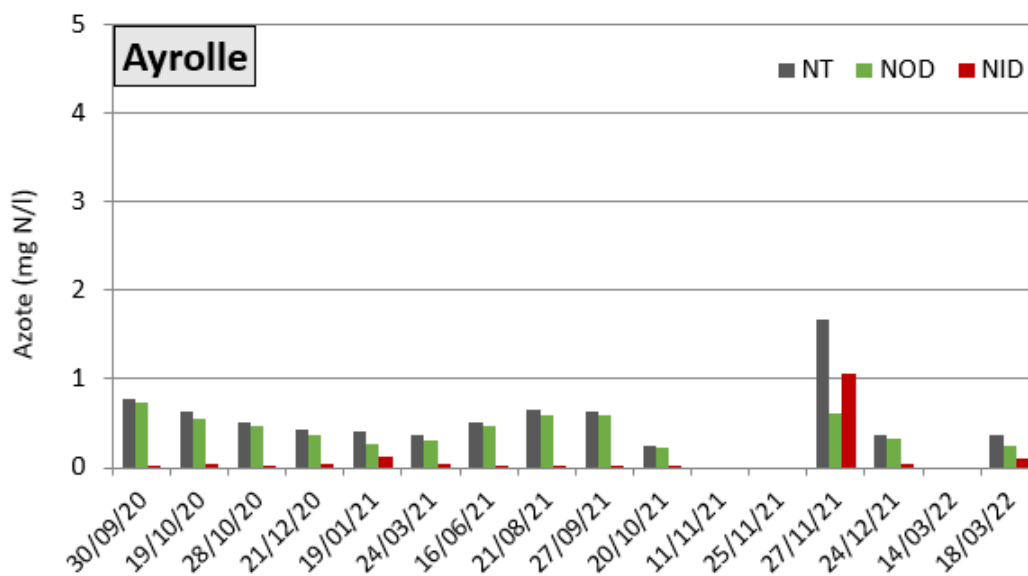


Figure 58 : Concentration en azote total et ses formes dissoutes dans Ayrolle

Concernant l'azote dans l'étang de l'Ayrolle, on observe une diminution des concentrations de septembre 2020 à mars 2021, puis une légère augmentation en période estivale. Les concentrations sont faibles (0,24 à 0,78 mg-N/l) sur les 18 mois de suivi et majoritairement sous forme organique.

L'épisode de crue de novembre 2021 a généré des apports importants en azote et l'apparition d'azote inorganique presque inexistant dans les précédents suivis. La crue de mars 2022 n'a pas eu d'impact sur l'étang d'Ayrolle.

Suivi spécifique de l'azote aux exutoires des rizières

Un suivi spécifique des sorties de l'exutoire sud des rizières (exutoire principal) a été réalisé sur la période de mai à novembre 2021. Les résultats du suivi qualité ont été présentés précédemment dans cette section. Ce suivi avait comme objectif de préciser la quantité et la qualité des apports d'eau issus de ce tributaire situé sur la partie aval du système, entre autres afin d'acquérir de l'information sur les apports potentiels de nutriments reliés aux vidanges des rizières.

Une campagne spécifique de qualité a été réalisée le 6 juin 2021 au niveau des trois exutoires des rizières (le principal exutoire au Sud et deux rejets secondaires plus au nord), sur le canal de la Réunion au niveau du pont des Pâtres et du pont St-Louis ainsi que sur le canal de l'Empereur.

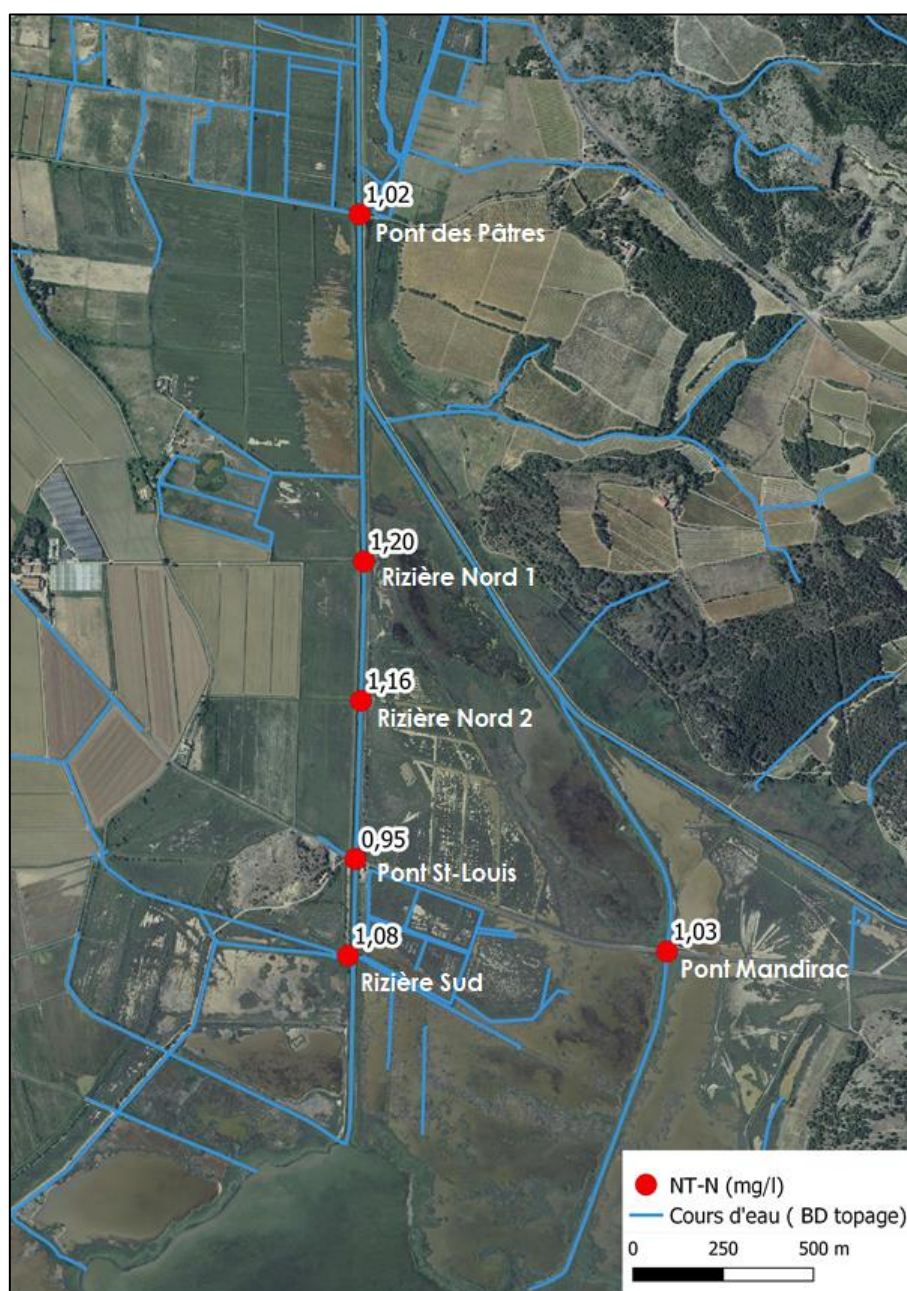


Figure 59 : Azote total sur les points de mesure de la campagne spécifique aux exutoires des rizières

Les résultats de cette campagne spécifique montrent qu'il n'y a pas d'apport significatif de nutriments en provenance des exutoires principal et secondaires des rizières. Les concentrations en azote sont relativement équivalentes entre elles que ce soit en sortie des rizières, en amont ou en aval du canal de la Réunion et au niveau du canal de l'Empereur.

Notons que les pêcheurs nous ont indiqué ne pas avoir constaté cette année-là (mai à octobre 2021) de notables vidanges des rizières.

Les résultats des campagnes ponctuelles mensuelles n'ont par ailleurs pas montré d'augmentation significative de l'azote sur la période de suivi de l'exutoire sud des rizières.

Aux vues de ces informations, les possibles vidanges des rizières n'ont pas contribué de façon importante en 2021 aux apports d'azote à l'étang de Campagnol via le canal de la Réunion.

6.2.2 Azote inorganique dissous (NID)

Tel que décrit en section 1.2, l'introduction massive de matières organiques et d'éléments nutritifs (azote, phosphore) dans les eaux de surface perturbe les équilibres naturels des écosystèmes aquatiques. Ces apports externes, issus principalement de rejets directs d'effluents (domestiques, industriels et agricoles), de l'écoulement d'eaux de ruissellement contaminées après leur passage sur des surfaces agricoles et non agricoles, et des retombées atmosphériques, conduisent aux phénomènes de pollution des eaux continentales et marines côtières.

La manifestation la plus visible de ces types de pollution est l'eutrophisation des masses d'eau fluviales, lacustres ou littorales, qui se traduit par un développement excessif d'algues et un appauvrissement de l'eau en oxygène, avec pour conséquence un risque accru de mortalité de certains organismes aquatiques.

Nous avons présenté à la section 5.2.1 les différentes formes d'azote retrouvées sur les points de mesure sur la période de suivi de 18 mois.

Le suivi analytique de la qualité des eaux prélevées avait pour but de quantifier les apports en azote organique et ne peut renseigner les origines de celui-ci. Toutefois nous pouvons rappeler que la forme organique de l'azote est induite entre autres par la décomposition de la matière organique après la mort des organismes (plantes, animaux) mais aussi du lessivage par les pluies de la matière organique des sols du bassin versant. Elle peut aussi être induite par de fortes concentrations d'oiseaux sur le secteur.

A contrario, les différentes formes minérales de l'azote peuvent renseigner sur l'origine probable des apports en azote inorganique dissous.

Les figures suivantes (Figure 60 à Figure 65) présentent la répartition des formes inorganiques dissoutes dans les eaux prélevées sur les différents points de mesure. Les informations tirées de ces figures sont révélatrices. L'azote inorganique dissous est composé majoritairement de nitrates (NO_3) sur toutes les analyses effectuées pendant le suivi. Les nitrates proviennent principalement des activités anthropiques, par le lessivage des sols agricoles (engrais minéraux, fertilisants).

L'ammonium a été retrouvé à des concentration plutôt faibles sur la plupart des points de mesure. Des concentrations plus importantes ont été retrouvées le 27 septembre 2021 sur la grande majorité des points de mesure sauf sur l'étang d'Ayrolle. L'origine de ces apports est inconnue à ce jour. Notons que dans les eaux de surface l'azote ammoniacal (NH_4) provient principalement du lessivage des terres agricoles (engrais organiques, fumier - lisier) ainsi que des eaux usées d'origine municipale et industrielle. L'ammonium peut également provenir dans les lagunes et zones humides de la décomposition des végétaux et en particulier des algues. Il n'est pas non plus exclu qu'une partie de

l'ammonium provienne aussi des fientes des oiseaux présents sur les étangs et les zones humides attenantes.

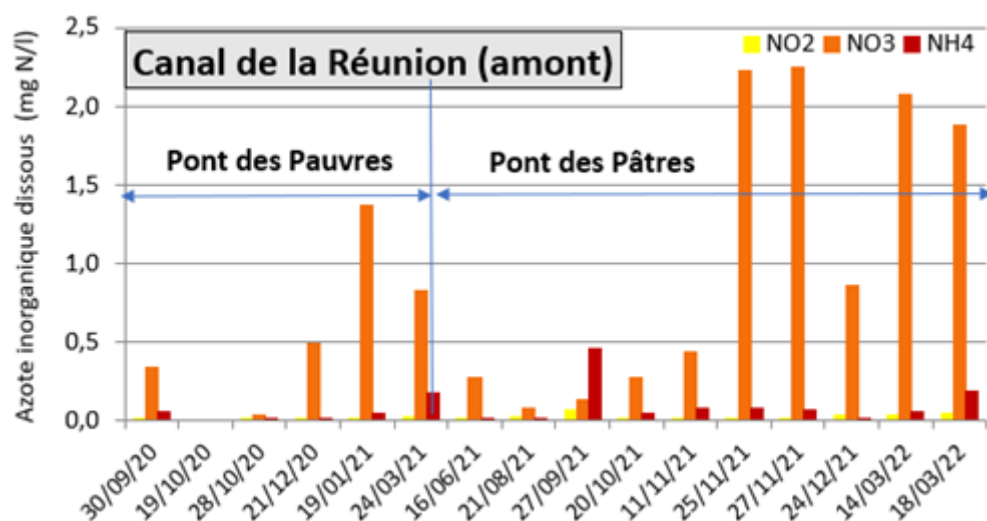


Figure 60 : Azote inorganique dissous (mg-N/l) dans le canal de la Réunion amont

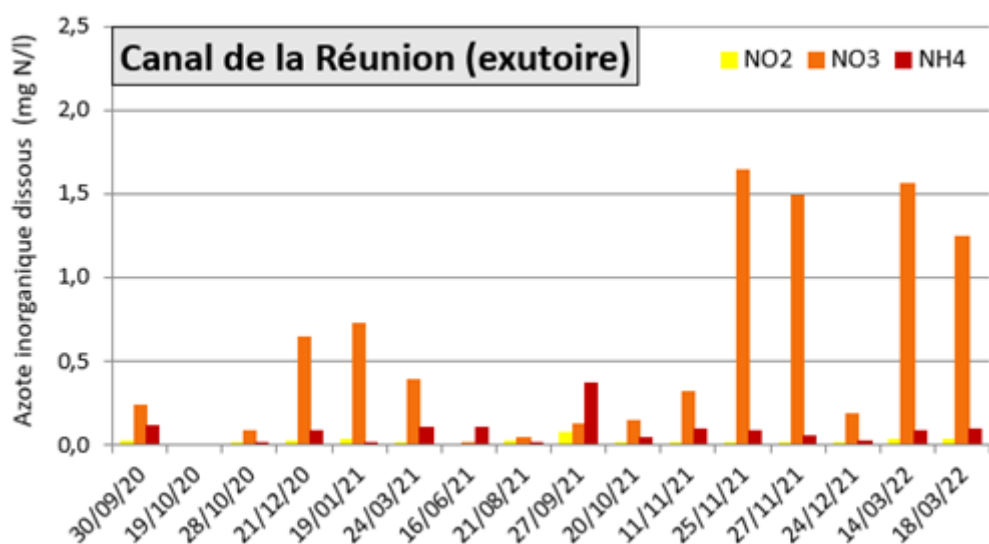


Figure 61 : Azote inorganique dissous (mg-N/l) dans le canal de la Réunion aval

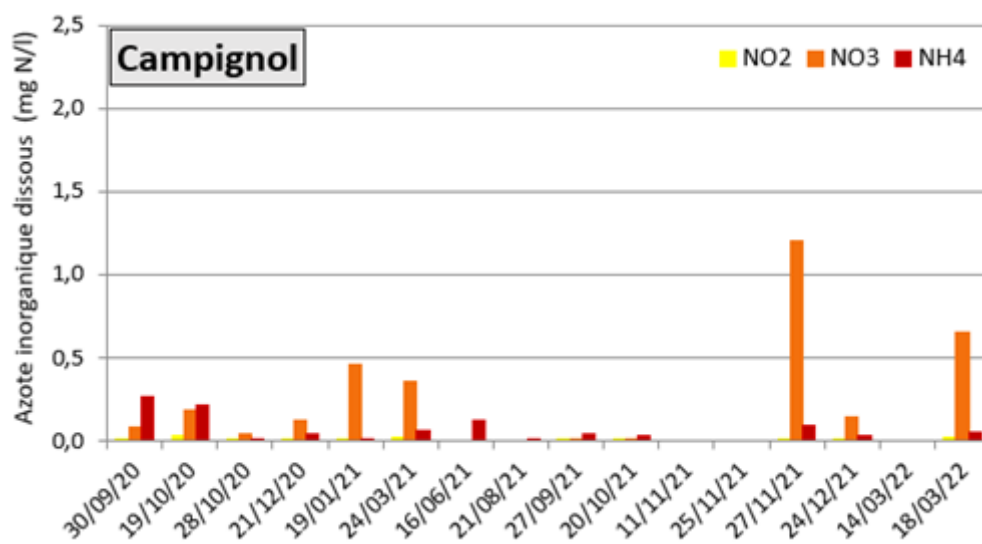


Figure 62 : Azote inorganique dissous (mg-N/l) dans Campagnol

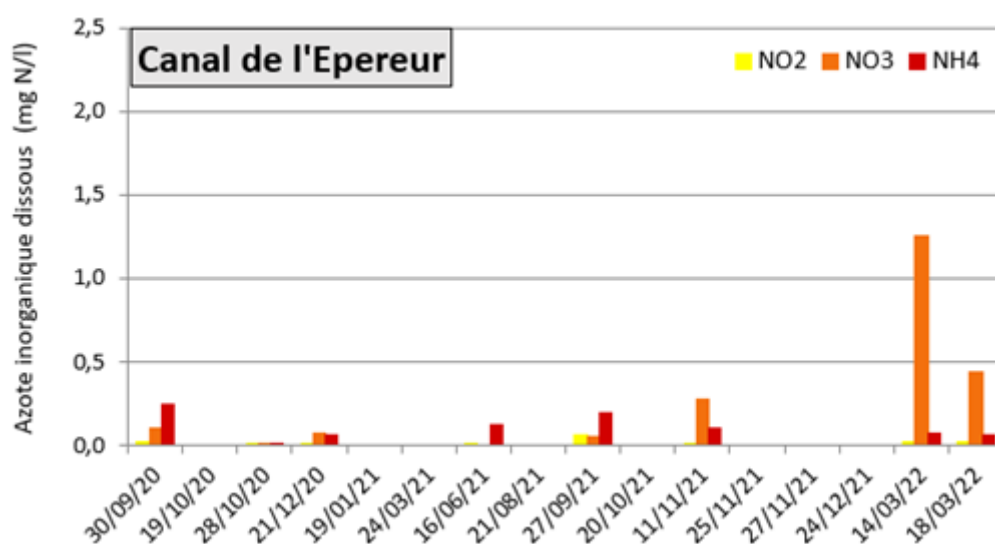


Figure 63 : Azote inorganique dissous (mg-N/l) dans le canal de l'Empereur

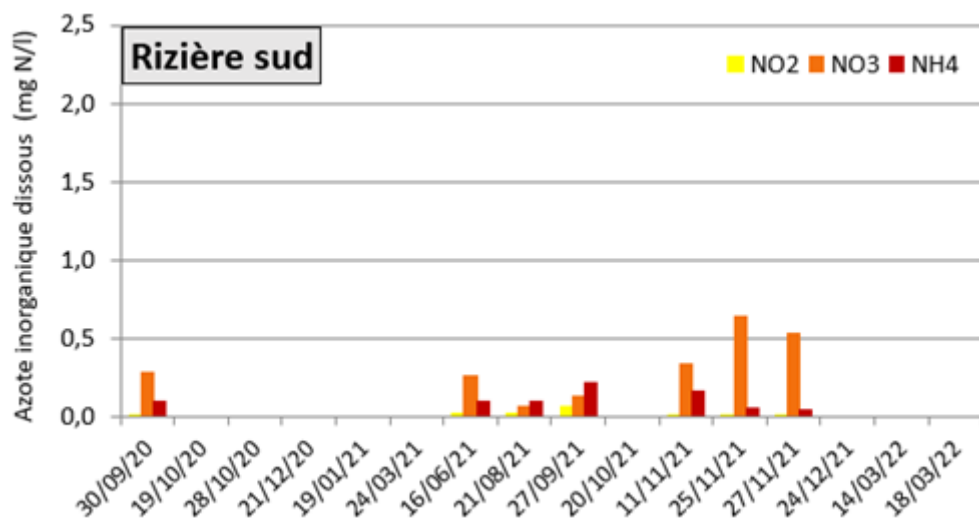


Figure 64 : Azote inorganique dissous (mg-N/l) dans l'exutoire sud des rizières

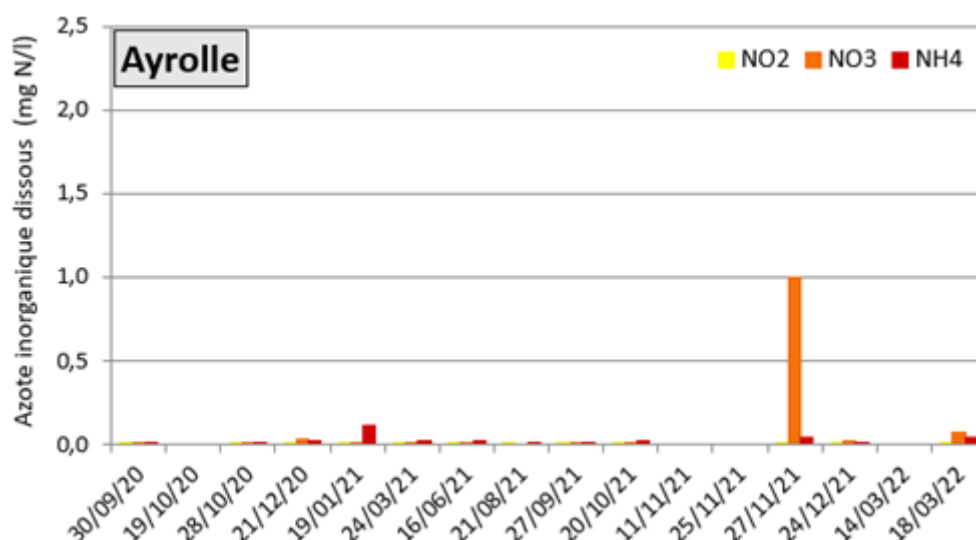


Figure 65 : Azote inorganique dissous (mg-N/l) dans l'Ayrolle

6.3. Analyses des formes du phosphore

Les paramètres d'intérêt pour l'étude sont les formes totales, totales dissoutes, organiques et inorganiques dissoutes du phosphore :

- forme totale : PT
- forme totale dissoute : PTD
- forme organique dissoute ou particulaire : POD = PTD-PO₄
- phosphore inorganique dissout : PO₄

Les Figures suivantes (Figure 66 à Figure 71) présentent l'évolution des concentrations en phosphore total (PT) et ses formes dissoutes organiques (POD) et inorganiques (PID) sur les différents points de mesure.

Sur le canal de la Réunion on observe une augmentation des concentrations à l'automne 2020 et jusqu'en mars 2021 (0,05 à 0,10 mg P/l), suivie d'une baisse des concentrations pendant l'été avant de reprendre une tendance récurrente à la hausse à partir de septembre 2021 avec l'apparition plus notable de l'azote inorganique dissous (PID = PO₄).

On constate l'impact significatif des pluies de novembre 2021 et mars 2022 sur les concentrations en phosphore sur le canal de la Réunion. Par ailleurs, une valeur 0,22 mg P/l a été détectée en janvier 2021 à l'exutoire du canal. Cette hausse subite du phosphore n'a pas été observée plus en amont.

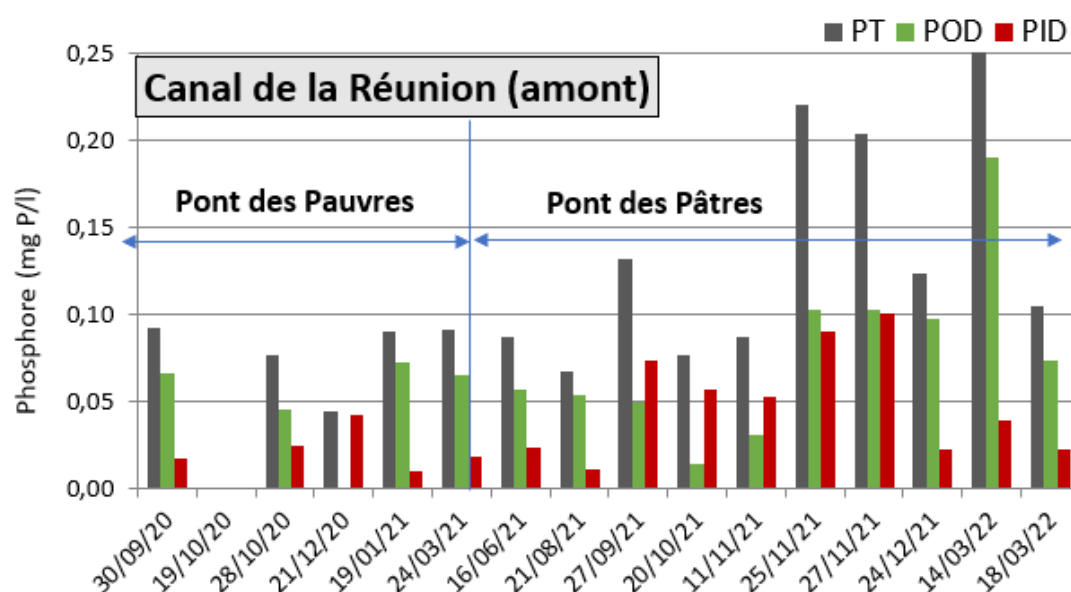


Figure 66 : Concentration en phosphore total et ses formes dissoutes sur le canal de la Réunion amont

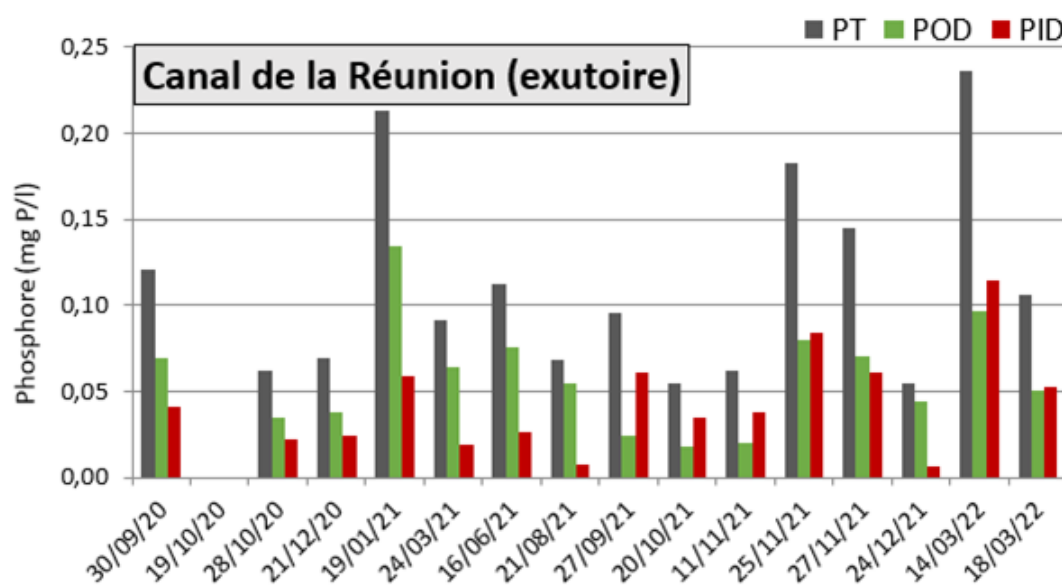


Figure 67 : Concentration en phosphore total et ses formes dissoutes à l'exutoire du canal de la Réunion

Le phosphore sur le canal de l'Empereur et à l'exutoire sud des rizières la même tendance (mais avec des concentrations plus élevées en juin 2021) que les points de suivi du canal de la Réunion. Ceci laisse à penser à un apport possible de phosphore issu de la vidange des rizières.

Le phosphore organique est majoritairement présent sauf durant les épisodes de crue qui génèrent des apports de phosphore inorganique plus conséquents.

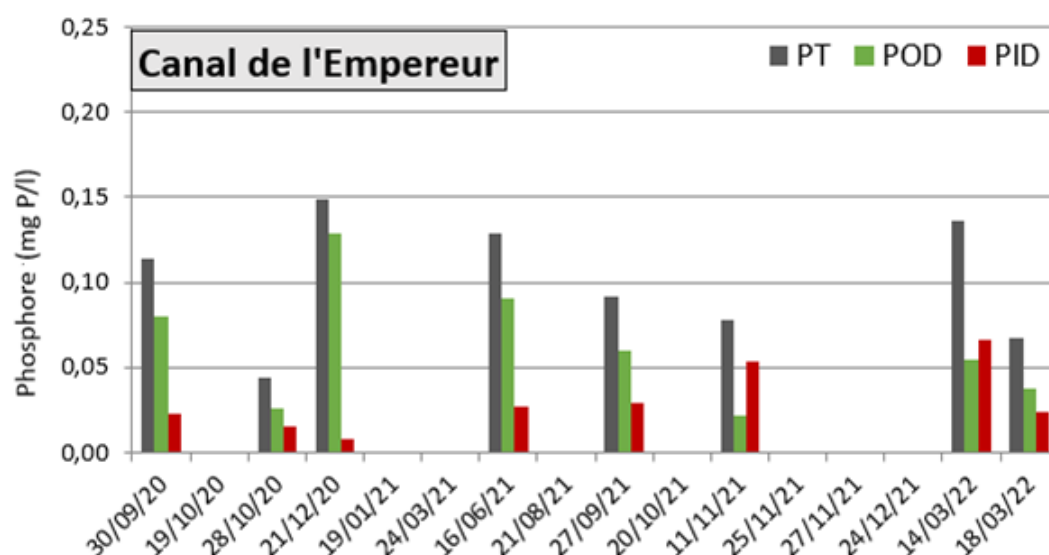


Figure 68 : Concentration en phosphore total et ses formes dissoutes sur le canal de l'Empereur

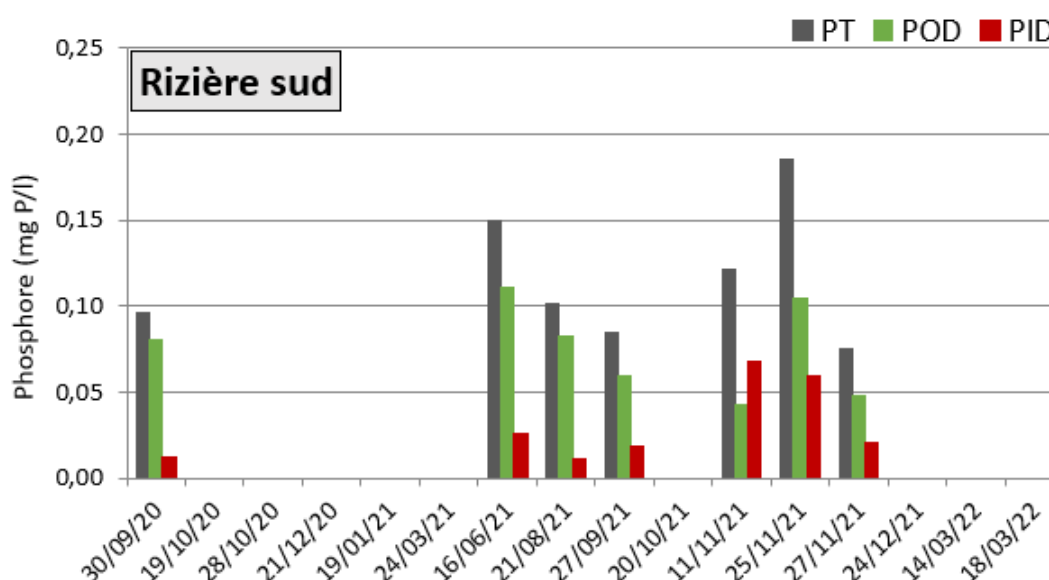


Figure 69 : Concentration en phosphore total et ses formes dissoutes à l'exutoire sud des rizières

Les concentrations en phosphore sur l'étang de Campagnol (Figure 70) sont relativement stables (0,04 à 0,06 mg P/l). Le phosphore organique ou particulaire est majoritairement présent.

Tout comme à l'exutoire du canal de la Réunion, on constate une augmentation du phosphore en janvier 2021 (0,10 mg P/l). On retrouve cette même valeur en juin 2021 (possiblement relié à la vidange des rizières) et lors de l'épisode de crue de novembre 2021.

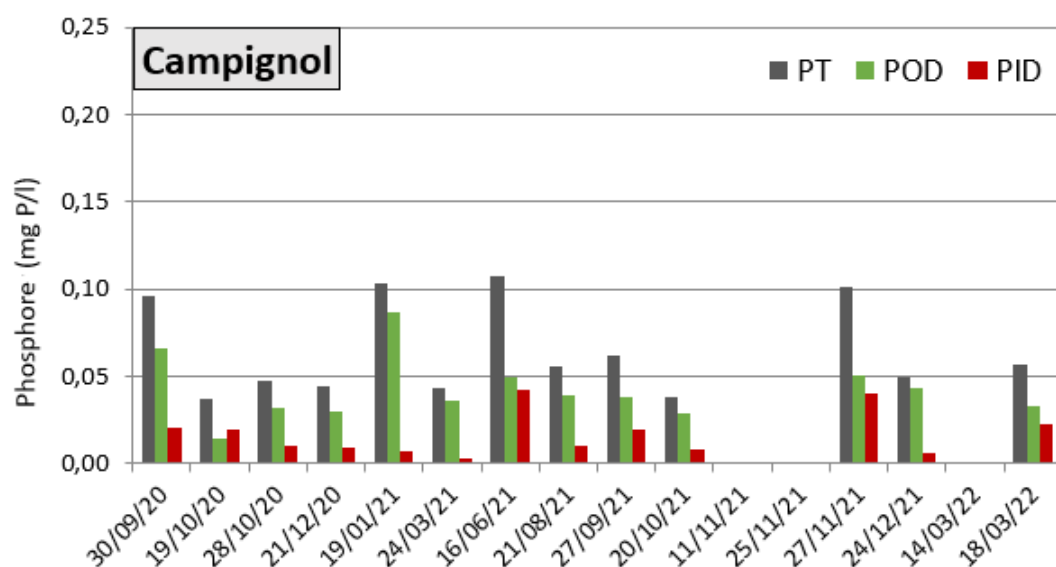


Figure 70 : Concentration en phosphore total et de ses formes dissoutes dans Campagnol

Les concentrations sur l'étang de l'Ayrolle sont faibles (0,02 à 0,06 mg P/l). On observe un léger accroissement des concentrations de juin à septembre 2021. Le phosphore se trouve majoritairement sous forme organique (particulaire), sauf lors de la crue de novembre 2021, d'où l'apparition plus conséquente du phosphore inorganique (PO_4).

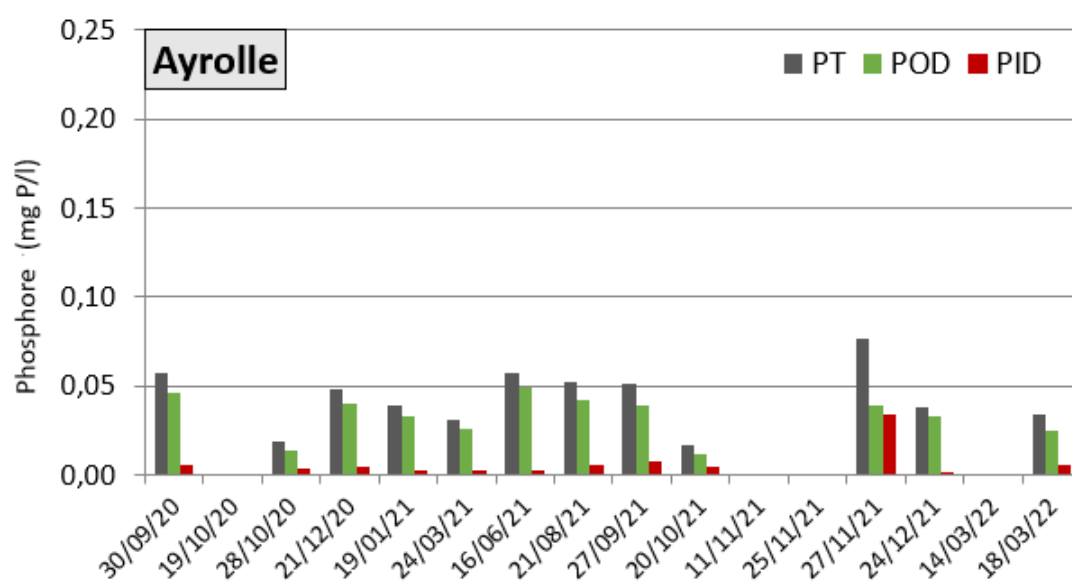


Figure 71 : Concentration en phosphore total et de ses formes dissoutes dans l'Ayrolle

Les fientes des oiseaux présents sur les étangs et les zones humides attenantes peuvent être une source importante de phosphore. Cependant, et contrairement à l'azote, la campagne spécifique réalisée sur l'exutoire des rizières semble montrer un apport en phosphore des rizières. Les concentrations en phosphore à l'exutoire nord 1 et à l'exutoire sud sont en effet presque deux fois supérieures à celles retrouvées sur le canal de la Réunion et sur le canal de l'Empereur. Le phosphore observé sur Campagnol peut donc posséder pour partie une origine anthropique. Les différentes valeurs de concentrations de cette campagne spécifique sont illustrées à la Figure 72.



Figure 72 : Phosphore total sur les points de mesure de la campagne spécifique aux exutoires des rizières

Les concentrations d'azote sont généralement plus élevées sur le canal de la Réunion amont. Elles sont plus faibles au niveau des étangs. Les eaux des exutoires des rizières ne montrent pas de concentrations particulièrement plus élevées que celles du canal de la Réunion.

Pour le phosphore, les concentrations sont également plus élevées sur le canal de la Réunion amont, et plus faible dans Campagnol et a fortiori dans l'Ayrolle. A l'exutoire des rizières, les concentrations de phosphore sont plus notables que les apports en azote.

L'azote inorganique est essentiellement composé de nitrates. L'azote organique est important, en particulier au niveau des étangs.

Le phosphore organique domine, sauf durant les périodes pluvieuses, où le phosphore inorganique devient aussi important que le phosphore organique.

7. Bilan des flux hydriques de nutriments

Le flux hydrique de nutriment représente la quantité apportée par un cours d'eau, un canal ou un bassin versant pendant une période donnée. Il dépend du débit écoulé et de la concentration en nutriments.

$$\text{Flux} = \text{Débit} \times \text{Concentration}$$

Les apports de nutriments dépendent du régime hydrologique et changent au cours des saisons, en fonction des apports d'eau, des apports des sources de nutriments et de la consommation de ces derniers par les organismes végétaux.

Ce chapitre a pour but d'estimer les apports de nutriments selon les différentes situations rencontrées que ce soit à l'échelle instantanée, journalière, et annuelle, en regardant les apports moyens calculés au moyen des chroniques mensuelles et les apports reliés aux événements pluvieux.

Les flux instantanés exprimés en kg de nutriment par heure (kg/h) seront notamment utilisés pour discuter les différents apports d'azote (N) et de phosphore (P). Ces flux instantanés sont calculés en considérant un écoulement unidirectionnel en multipliant la concentration en sels nutritifs (nutriments) par le débit instantané mesuré. Pour ce calcul, les concentrations de nutriments exprimées en $\mu\text{mol/l}$ ont été converties en kg/l, les débits étant mesurés en m^3/s .

$$\text{Flux instantané} = \text{Débit} \times \text{Concentration}$$

Les flux instantanés (kg/h) n'ont pas été utilisés dans le cadre de l'étude de Campagnol à cause de la grande variabilité des débits. Durant une campagne d'échantillonnage, il était en effet parfois possible que le débit du canal de la Réunion amont soit descendant et que celui de l'exutoire du canal soit remontant à cause du délai de réalisation des prélèvements et jaugeages. Il n'est donc pas possible dans ce contexte de comparer les deux flux.

Les flux journaliers moyens de nutriments exprimés en kg de nutriment par jour (kg/j) ont été calculés en considérant les possibles inversions de débits (par exemple entre Campagnol et Ayrolle). Ils peuvent être calculés soit en considérant les valeurs instantanées de débits et de concentrations (valeurs aux 10 minutes), soit en considérant le flux moyen journalier et la concentration moyenne associée.

Une question qui s'est posée est de savoir si l'eau échantillonnée sur le canal de la Réunion amont était toujours représentative du canal ou pouvait correspondre à de l'eau de l'étang de Campagnol quand le flux était remontant. Connaissant la distance comprise entre le point de mesure et l'étang (2 550 m), et la vitesse moyenne lorsque l'écoulement est remontant (-1.3 cm/s), il est possible de calculer le temps nécessaire (2.7 j) pour que l'eau de l'étang parvienne au point d'échantillonnage. L'eau ne peut remonter jusqu'au pont des Pâtres que si l'écoulement remontant est maintenu durant 2.7 j, ce qui est difficilement envisageable. Nous pouvons donc admettre que les échantillons prélevés sur le canal de la Réunion amont sont bien représentatifs des apports de ce canal et utilisés comme tels pour l'établissement des bilans.

Les flux moyens peuvent également être calculés sur une base mensuelle, trimestrielle ou annuelle. Dans les sections suivantes, nous utiliserons les flux trimestriels, permettant de la sorte de comparer les saisons.

La contribution d'un événement particulier (événement de crue par exemple) peut aussi être calculée en considérant le débit moyen et la concentration moyenne durant cet événement.

7.1. Flux d'azote

Le Tableau 7 et la Figure 73 représentent les concentrations trimestrielles moyennes d'azote total entrant et sortant de l'étang de Campagnol issues des données acquises sur les 18 mois d'étude. Il n'est pas possible de calculer un écart-type représentatif des concentrations car certains trimestres ne bénéficient que d'une ou de deux valeurs.

Trimestre	La Réunion (apport)	La Robine (apport)	Rizières (apport)	Campagnol (sortie)
T1 (oct-déc 2020)	1.03	1.98		1.10
T2 (janv-mars 2021)	1.69	2.40		1.01
T3 (avr-juin 2021)	0.92	1.48	1.09	0.84
T4 (juil-sept 2021)	1.01	1.18	0.87	0.60
T5 (oct-déc 2021)	2.31	2.40		0.98
T6 (janv-mars 2022)	3.26	2.31		1.27

Tableau 7 : Concentrations trimestrielles moyennes d'azote total (en mg/l) entrant et sortant de l'étang de Campagnol sur les 18 mois d'étude

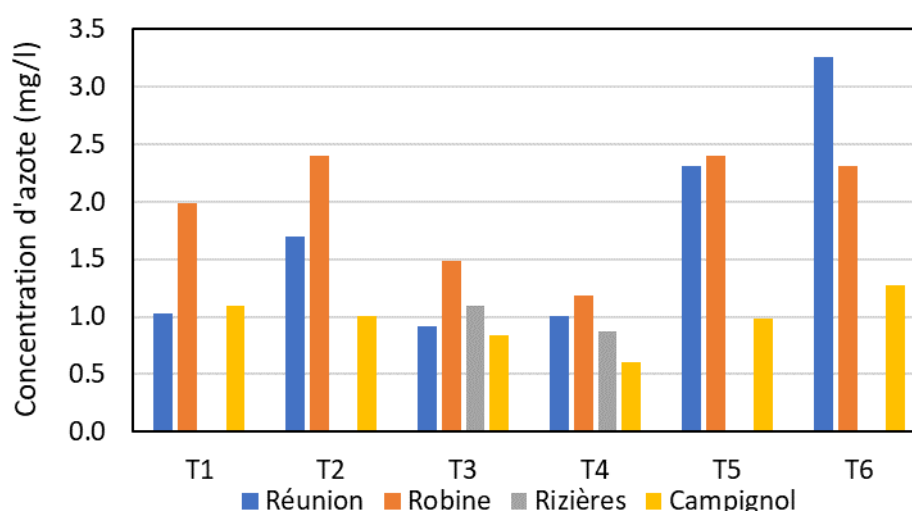


Figure 73 : Concentrations trimestrielles moyennes d'azote total entrant et sortant de l'étang de Campagnol sur les 18 mois d'étude

Le Tableau 8 et la Figure 74 représentent les flux trimestriels d'azote total (en tonnes) entrant et sortant de l'étang de Campagnol sur les 18 mois d'étude. Il s'agit ici de flux moyens calculés à partir des valeurs moyennes de concentrations et de flux. Il est impossible de calculer l'incertitude rattachée à ces flux.

Trimestre	La Réunion (apport)	La Robine (apport)	Rizières (apport)	Passe (sortie)
T1 (oct-déc 2020)	2.83	0.28	0	2.58
T2 (janv-mars 2021)	3.36	0.34	0	3.79
T3 (avr-juin 2021)	1.96	0.21	1.14	4.23
T4 (juil-sept 2021)	0.90	0.17	1.89	2.49
T5 (oct-déc 2021)	4.99	0.34	0	10.31
T6 (janv-mars 2022)	17.79	0.32	0	7.15
Total (18 mois)	31.83	1.66	3.03	30.55

Tableau 8 : Flux trimestriels d'azote total (en tonne) entrant et sortant de l'étang de Campagnol sur les 18 mois d'étude

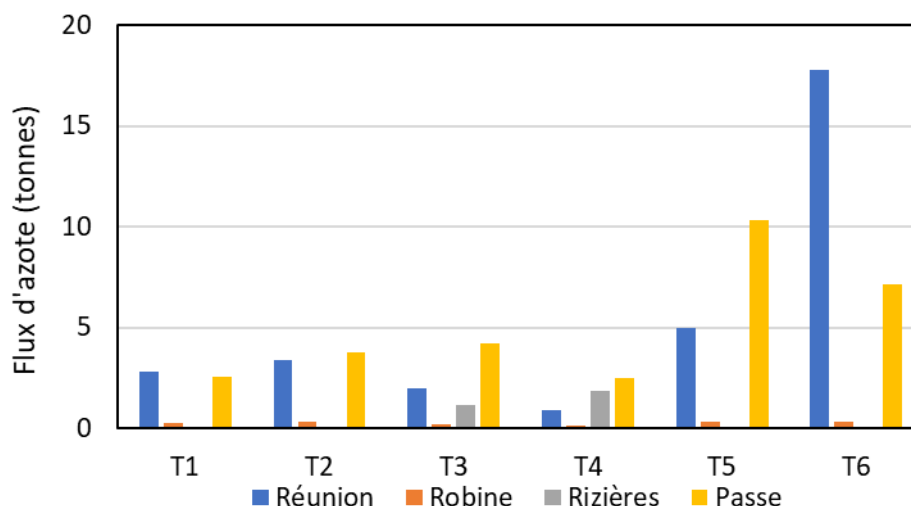


Figure 74 : Flux trimestriels d'azote total (en tonne) entrant et sortant de l'étang de Campagnol sur les 18 mois d'étude

Pour rappel, la contribution des eaux souterraines et des autres flux hydriques inconnus n'est pas prise en compte. Selon les flux calculés, le flux total entrant d'azote serait de 36.51 tonnes sur 18 mois et le flux sortant de 30.55 tonnes, soit un différentiel de 5.96 tonnes. Ce différentiel correspondrait à la consommation ou à l'immobilisation de l'azote dans l'étang (voire à sa volatilisation sous forme de gaz azotés par dénitrification par exemple).

Les flux d'azote total les plus importants sont observés en hiver 2022 (T6) sur le canal de la Réunion et durant l'automne 2021 (T5 sur la passe, ce qui confirme le rôle important des crues dans l'apport de nutriments. En dehors des trimestres de crues, les flux apportés par le canal de la Réunion paraissent plus importants durant les trimestres d'automne et hiver, que durant le printemps et l'été. Les flux sortant de Campagnol paraissent plus constants, légèrement plus forts au printemps et en hiver. Les flux issus des rizières ne coulent que durant les trimestres de mise en eau (printemps et été).

Le plus gros contributeur en azote est le canal de la Réunion (en amont des rizières). Les apports de la Robine (par ses fuites et pertes) sont négligeables. En dehors des périodes de crues, les apports des rizières sont trois fois plus faibles que ceux du canal de la Réunion, mais ne sont pas négligeables.

La Figure 75 présente en carte les flux trimestriels d'azote total (en tonnes) entrant et sortant de l'étang de Campagnol sur les 18 mois d'étude et sur une année (en moyenne).

La recharge de la nappe souterraine induite par la pluie tombant sur le bassin versant de l'étang pourrait représenter sur 18 mois un volume de 5.5 M.m³. Sur la base d'une concentration de quelques mg/l, le flux d'azote total serait de 11 tonnes sur 18 mois (pour 2 mg/l).

Les fuites des canaux d'irrigation des ASA amont représenteraient un volume possible également de l'ordre de 5.5 M.m³. Considérant la concentration moyenne du canal de la Robine de 2 mg/l, le flux d'azote total serait de 11 tonnes sur 18 mois.

Ces deux apports seraient les principaux contributeurs des eaux souterraines alimentant Campagnol. En prenant en compte ces deux flux (22 tonnes d'azote total sur 18 mois), c'est dont 28 tonnes (sur 18 mois) qui serait stockées dans l'étang, et en partie responsables de l'eutrophisation observée.

Les autres apports d'eau ne sont pas connus (pertes karstiques des massifs calcaires, résurgences d'eau salée chaude, apport d'eau via la paléo-vallée depuis la nappe alluviale de l'Aude située en amont du bassin versant). Leur contribution en flux d'azote ne peut donc être estimée. L'entrée d'eau de mer

par le barrage du Pont jaune (possiblement de l'ordre du Mm³ sur 18 mois) ne devrait pas contribuer à un apport d'azote.

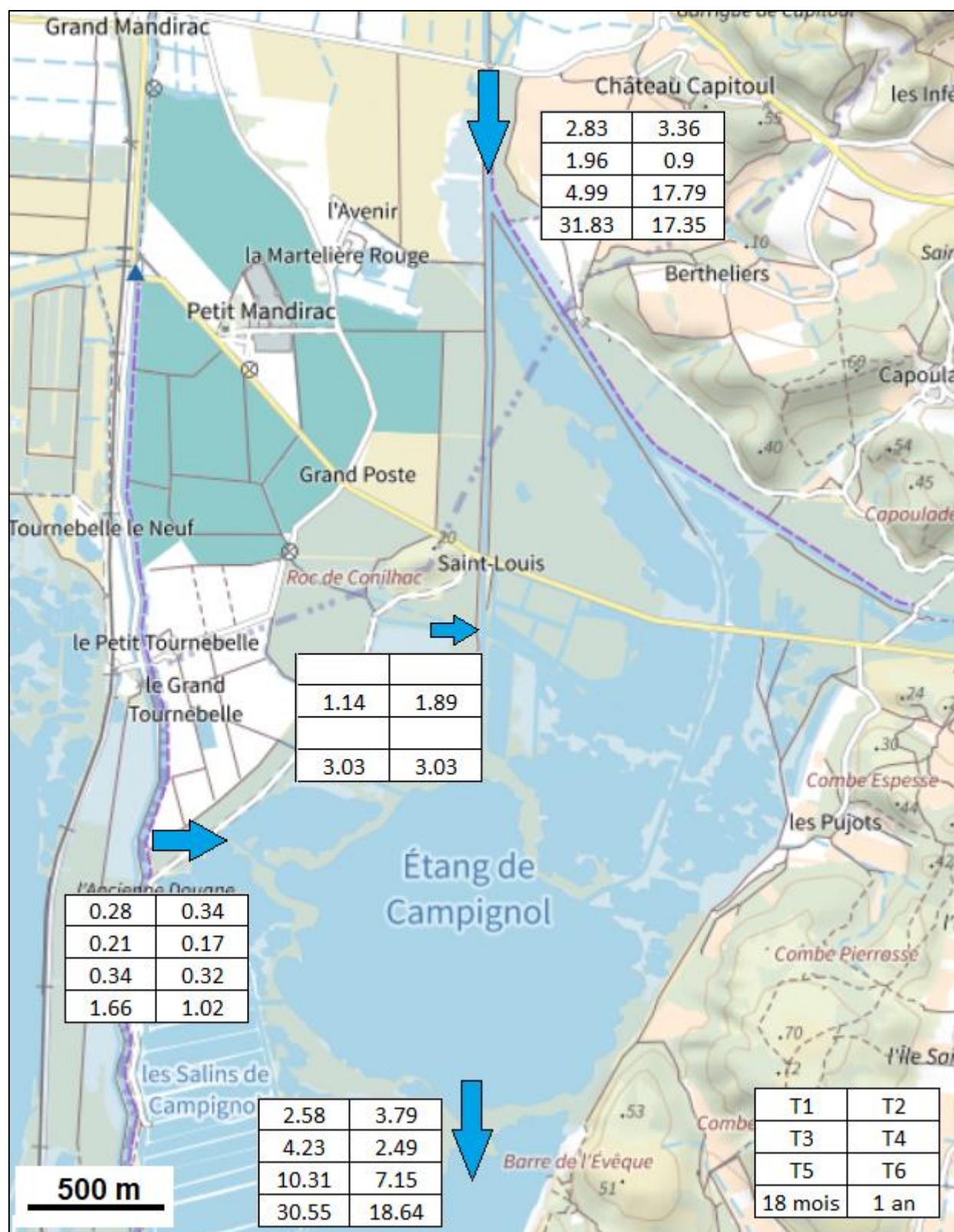


Figure 75 : Carte des flux trimestriels d'azote total (en tonne) entrant et sortant de l'étang de Campagnol sur les 18 mois d'étude et sur une année (en moyenne)

La Figure 76 présente les parts respectives des flux trimestriels d'azote total entrant et sortant de l'étang de Campagnol sur les 18 mois d'étude. On constate que le flux d'azote sortant est deux fois plus faible que les flux entrants estimés. La moitié des apports d'azote estimés serait donc stockée dans l'étang de Campagnol.

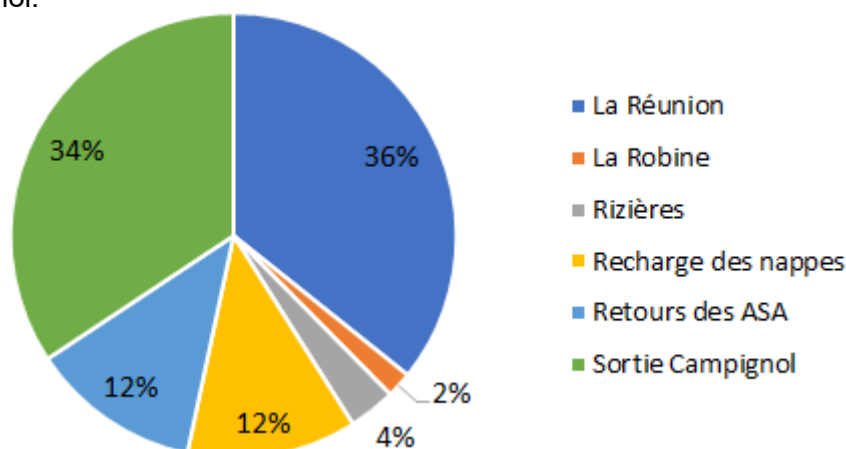


Figure 76 : Parts respectives des flux trimestriels d'azote total entrant et sortant de l'étang de Campagnol sur les 18 mois d'étude

7.2. Flux de phosphore

Le Tableau 9 et la Figure 77 représentent les concentrations trimestrielles moyennes d'azote total entrant et sortant de l'étang de Campagnol issues des données acquises sur les 18 mois d'étude.

Trimestre	La Réunion (apport)	La Robine (apport)	Rizières (apport)	Campagnol (sortie)
T1 (oct-déc 2020)	0.07	0.07		0.06
T2 (janv-mars 2021)	0.09	0.07		0.07
T3 (avr-juin 2021)	0.08	0.11	0.15	0.11
T4 (juil-sept 2021)	0.10	0.10	0.09	0.06
T5 (oct-déc 2021)	0.14	0.11		0.06
T6 (janv-mars 2022)	0.18	0.07		0.06

Tableau 9 : Concentrations trimestrielles moyennes de phosphore total (en mg/l) entrant et sortant de l'étang de Campagnol sur les 18 mois d'étude

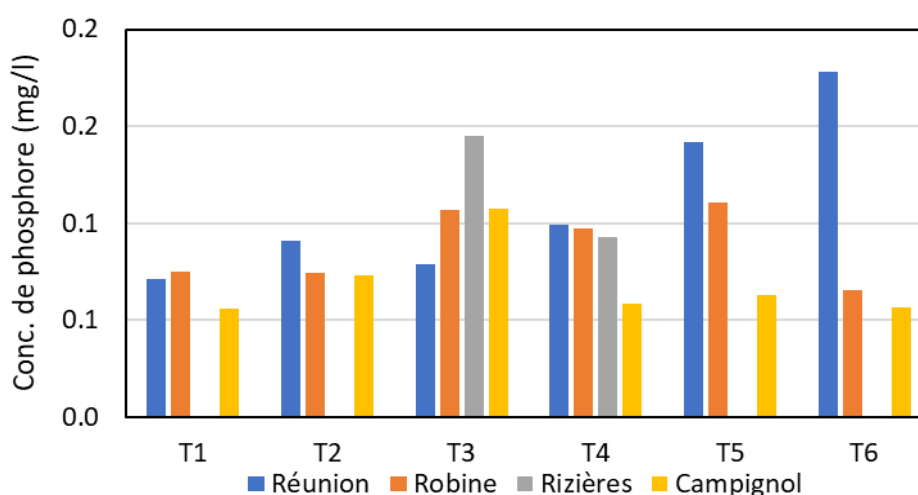


Figure 77 : Concentrations trimestrielles moyennes de phosphore total entrant et sortant de l'étang de Campagnol sur les 18 mois d'étude

Le Tableau 10 et la Figure 78 représentent les flux trimestriels de phosphore total (en tonnes) entrant et sortant de l'étang de Campagnol sur les 18 mois d'étude.

Trimestre	La Réunion (apport)	La Robine (apport)	Rizières (apport)	Campagnol (sortie)
T1 (oct-déc 2020)	0.20	0.01	0	0.13
T2 (janv-mars 2021)	0.18	0.01	0	0.27
T3 (avr-juin 2021)	0.17	0.01	0.15	0.54
T4 (juil-sept 2021)	0.09	0.01	0.20	0.24
T5 (oct-déc 2021)	0.31	0.02	0	0.66
T6 (janv-mars 2022)	0.97	0.01	0	0.32
Total (18 mois)	1.92	0.07	0.35	2.16

Tableau 10 : Flux trimestriels de phosphore total (en tonne) entrant dans Campagnol depuis le canal de la Réunion, les fuites de la Robine et les apports des rizières, et sortant de l'étang de Campagnol par la passe

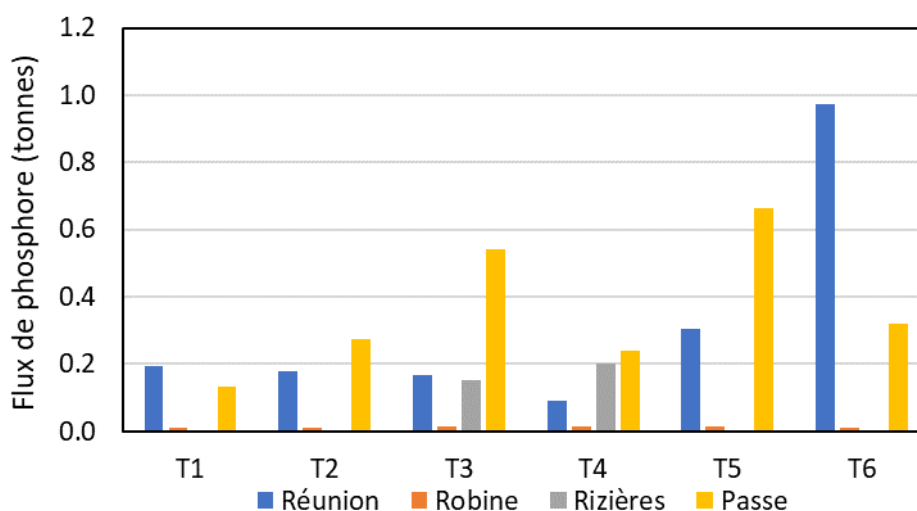


Figure 78 : Flux trimestriels de phosphore total (en tonne) entrant et sortant de l'étang de Campagnol sur les 18 mois d'étude

La Figure 79 présente en carte les flux trimestriels de phosphore total (en tonnes) entrant et sortant de l'étang de Campagnol sur les 18 mois d'étude et sur une année (en moyenne).

Comme précédemment mentionné, la contribution des eaux souterraines et des autres flux hydriques inconnus n'est pas prise en compte. Selon les flux calculés, le flux total entrant de phosphore serait de 2.34 tonnes sur 18 mois et le flux sortant de 2.17 tonnes, soit un différentiel de 0.17 tonne. Ce différentiel paraît négligeable, et qu'il sort autant de phosphore de l'étang qu'il en rentre. Ce constat ne reflète cependant que les connaissances disponibles sur les apports et les sorties. Ce constat devra être confirmé par les calculs qui seront menés suite à cette présente étude.

Mentionnons également que les eaux souterraines présentent généralement de très faibles concentrations en phosphore du fait de l'adsorption de celui-ci sur les argiles. Le flux proposé de phosphore depuis la Robine via les eaux souterraines est donc discutable. Il en est de même des flux contribués par la recharge des nappes par la pluie ou par les infiltrations depuis les ASA. Leurs flux potentiels de phosphore sont considérés faibles, voire négligeables ou nuls. Ils ne sont donc pas pris en compte dans le bilan.

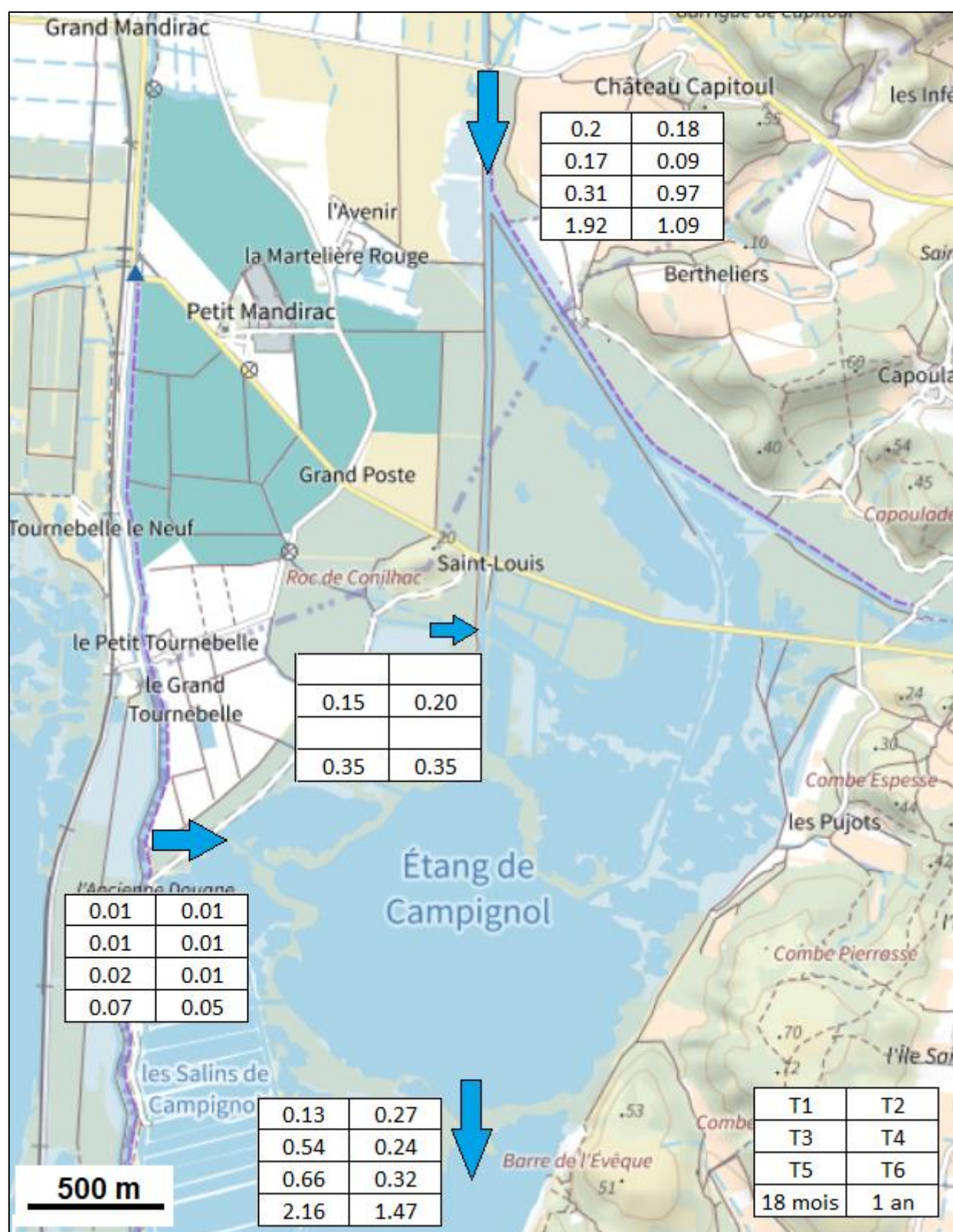


Figure 79 : Carte des flux trimestriels de phosphore total (en tonne) entrant et sortant de l'étang de Campagnol sur les 18 mois d'étude et sur une année (en moyenne)

Les flux de phosphore total les plus importants sont observés (comme pour l'azote) en hiver 2022 (T6) sur le canal de la Réunion et durant l'automne 2021 (T5) sur la passe, ce qui confirme le rôle important des crues dans l'apport de nutriments (de phosphore dans le cas présent). En dehors des

trimestres de crues, les flux apportés par le canal de la Réunion varient peu, hormis durant l'été avec un flux deux fois moindre. Les flux sortant de Campagnol sont plus variables, ceux prenant place en été semblant être particulièrement élevés. Les flux issus des rizières n'existent que durant les trimestres de mise en eau des rizières (printemps et été).

Le plus gros contributeur en phosphore est donc le canal de la Réunion (en amont des rizières). Les apports de la Robine (par ses fuites et pertes) semblent faibles, et discutables tel que mentionné ci-avant.

Le calcul des flux d'azote total et de phosphore total réalisé sur la base des mesures effectuées durant cette étude (débits x concentrations) a montré que l'apport d'azote total pourrait être de l'ordre de 58.5 tonnes (sur 18 mois) alors que le flux évacué par la passe vers l'Ayrolle serait de 30.5 tonnes (sur ces mêmes 18 mois). C'est donc 28 tonnes (sur 18 mois) qui seraient stockées dans l'étang et responsables de l'eutrophisation observée. Concernant le phosphore, les apports seraient de 4.5 tonnes (en négligeant la contribution de la Robine par les eaux souterraines du fait de l'adsorption du phosphore sur les argiles). Les sorties par la passe vers l'Ayrolle étant du même ordre de grandeur (4.3 tonnes de phosphore), il n'y aurait pas de stockage du phosphore entrant dans Campagnol.
--

8. Conclusions et perspectives

Le suivi haute fréquence des niveaux d'eau sur Campagnol et l'Ayrolle, et sa comparaison au suivi du niveau d'eau du canal de la Réunion (à la station du SMMAR) et à celui de la marée (station SHOM de Port la Nouvelle), montrent que les différents niveaux d'eau sont tous corrélés à la marée.

Les différences de niveau calculées entre le canal de la Réunion et Campagnol d'un côté et entre Campagnol et l'Ayrolle de l'autre montrent que les valeurs sont statistiquement positives, c'est-à-dire que les flux sont globalement descendants du bassin versant vers la mer. Ceci n'est cependant pas toujours le cas, d'une part à l'échelle de la journée sous l'effet de la marée, et d'autre part à l'échelle mensuelle sous l'effet des conditions de vent. Lorsque le vent dominant est de l'Ouest ou du Nord, les flux sont très majoritairement sortants vers la mer, et les étangs et les zones humides limitrophes se vident alors de façon importante (les niveaux baissent). Lorsque le vent dominant est du Sud ou de l'Est, les flux sont majoritairement entrants depuis la mer (les niveaux sont hauts dans les étangs et les zones humides).

La salinité montre des chutes extrêmement importantes et rapides, qui ne semblent pas reliées à des arrivées d'eau douce depuis l'amont du bassin, mais à des apports d'eau douce de nappe. Ces chutes surviennent principalement durant les périodes de vidange des étangs sous l'effet des vents d'Ouest et du Nord. Ainsi, la salinité est très faible quand le niveau d'eau des étangs est très faible.

La connaissance des apports hydriques à Campagnol est un élément important dans l'étude des flux de nutriments apportés à cet étang. Le projet devait disposer pour cela d'un suivi des débits sur le canal de la Réunion amont. Malheureusement, la station du SMMAR existante n'a pas été en mesure de fournir les chroniques de débits attendues.

Des suivis à haute fréquence des débits sur le canal de la Réunion, la passe entre Campagnol et l'Ayrolle et à l'exutoire Sud des rizières ont été réalisés sur plusieurs mois. Des relations empiriques ont pu être établies entre les débits et les différences de hauteurs des niveaux d'eau, en tenant également compte de la pluie. Grâce à ces relations empiriques, une reconstitution des débits échangés a pu être proposée.

Le projet de 12 mois ayant par ailleurs été étiré sur 18 mois, les débits ont été reconstitués sur cette période de 18 mois. Cet étirement du projet sur 18 mois a également permis de caractériser deux événements de crues survenus à l'issue des 12 mois initialement prévus pour le projet. Différentes conditions hydrologiques ont ainsi pu être caractérisées.

Le suivi des débits sur le canal de la Réunion, sur la passe entre Campagnol et l'Ayrolle, et sur l'exutoire des rizières a montré que les débits échangés peuvent être très importants à cause de l'effet yoyo induit par la marée. Ainsi, beaucoup d'eau peut entrer et sortir de l'étang de Campagnol durant une journée, mais avec un bilan net (entrées – sorties) qui peut être faible, voire nul. Le bilan net de Campagnol est parfois positif (Campagnol → Ayrolle), parfois négatif (Ayrolle → Campagnol).

En dehors des périodes de pluies importantes (pendant les crues en particulier), le principal driver du sens et de l'importance des échanges demeure le vent. Durant les périodes pluvieuses, le débit est principalement entrant dans Campagnol depuis le Canal de la Réunion et sortant de l'étang de Campagnol vers l'Ayrolle. Les apports depuis le canal durant ces périodes représentent la plus grande part du bilan hydrique annuel.

De nombreux flux ne sont cependant pas connus, ni quant à leur importance dans le bilan annuel, ni dans leur fonctionnement et leur importance relative les uns par rapport aux autres. D'importants apports souterrains à Campagnol semblent exister. Les eaux de ces apports souterrains auraient des provenances différentes : recharge des nappes par les pluies, infiltration des surplus d'irrigation des ASA, fuites de la Robine et des autres canaux, apports depuis les massifs karstiques, apports depuis la

nappe alluviale de l'Aude en amont de Narbonne, émergences d'eaux chaudes salées). Aucune connaissance n'existe à ce jour sur ces flux.

Les concentrations d'azote sont généralement plus élevées sur le canal de la Réunion amont. Elles sont plus faibles au niveau des étangs. Les eaux des exutoires des rizières ne montrent pas de concentrations particulièrement plus élevées que celles du canal de la Réunion.

Pour le phosphore, les concentrations sont également plus élevées sur le canal de la Réunion amont, et plus faible dans Campagnol et a fortiori dans l'Ayrolle. A l'exutoire des rizières, les concentrations de phosphore sont plus notables que les apports en azote.

L'azote inorganique est essentiellement composé de nitrates. L'azote organique est important, en particulier au niveau des étangs.

Le phosphore organique domine, sauf durant les périodes pluvieuses, où le phosphore inorganique devient aussi important que le phosphore organique.

Le calcul des flux d'azote total et de phosphore total réalisé sur la base des mesures effectuées durant cette étude (débits x concentrations) a montré que l'apport d'azote total pourrait être de l'ordre de 58.5 tonnes (sur 18 mois) alors que le flux évacué par la passe vers l'Ayrolle serait de 30.5 tonnes (sur ces mêmes 18 mois). C'est donc 28 tonnes (sur 18 mois) qui seraient stockées dans l'étang et responsables de l'eutrophisation observée. Concernant le phosphore, les apports seraient de 4.5 tonnes (en négligeant la contribution de la Robine par les eaux souterraines du fait de l'adsorption du phosphore sur les argiles). Les sorties par la passe vers l'Ayrolle étant du même ordre de grandeur (4.3 tonnes de phosphore), il n'y aurait pas de stockage du phosphore entrant dans Campagnol.

L'ensemble des mesures réalisées et des bilans effectués montre que les flux d'azote 'mesurables' sont principalement liés aux apports par le canal de la Robine. D'importants apports peuvent cependant aussi exister par le biais de l'alimentation supposée de Campagnol par les eaux souterraines. Malheureusement, l'importance de ces apports souterrains n'est pas connue, tant en termes de volumes d'eau mis en jeu que des concentrations en nutriments qui y sont rattachées.

Les apports de nutriments par les eaux superficielles semblent principalement reliés aux apports en périodes très pluvieuses (crues en particulier). De fait, les apports estivaux ne seraient pas si importants. Cependant, du fait de l'apport hydrique également faible, les concentrations pourraient être plus élevées durant la période estivale.

Il paraîtrait important de caractériser les apports souterrains suspectés (mais non démontrés) à l'étang de Campagnol, et en particulier les concentrations en nutriments qui y sont rattachées. Ceci passerait par une cartographie à l'échelle de l'étang des indicateurs d'entrée d'eau souterraine (température, pH, conductivité électrique, oxygène dissous). Des échantillonnages seraient effectués pour l'analyse des nutriments sur les zones d'apport ainsi mises en évidence.