



# FLUX D'EAU ET DE NUTRIMENTS EXTRAPOLATION MENSUELLE ET SAISONNIERE

Etude réalisée sur la lagune de Biguglia et l'estuaire de Fiume Santu  
(Haute-Corse)

## Fiche documentaire

<b>Titre du rapport :</b> Flux d'eau et de nutriments extrapolation mensuelle et saisonnière (lagune de Biguglia et estuaire de Fiume Santu).	
<b>Référence interne :</b> ODE/UL/LER-PAC/19-03  <b>Diffusion :</b> <input checked="" type="checkbox"/> libre (internet)  <input type="checkbox"/> restreinte (intranet) – date de levée d'embargo : AAA/MM/JJ  <input type="checkbox"/> interdite (confidentielle) – date de levée de confidentialité : AAA/MM/JJ	<b>Date de publication :</b> 2019/04/17 <b>Version :</b> 1.0.0  <b>Référence de l'illustration de couverture</b> Crédit photo/titre/date  <b>Langue(s) :</b>
<b>Résumé/ Abstract :</b> L Les écosystèmes côtiers marins sont parmi les plus productifs au monde et jouent un rôle essentiel dans le cycle de la matière. Ces écosystèmes ont en effet une très forte capacité d'exportation de matière, de ressources trophiques et d'organismes. Ces milieux sont en particulier fortement influencés par les variations des conditions hydro-climatiques environnantes. C'est avec l'objectif de mieux comprendre le fonctionnement écologique de ces milieux de transition que la présente étude a été réalisée. L'objectif de cette étude est d'une part de mettre en place une méthodologie de mesure et de calcul des flux d'eau et de nutriments au sein de ces milieux de transition en Haute-Corse, et d'autre part d'extrapoler les résultats horaires à des simulations journalières, saisonnières et annuelles pour la lagune de Biguglia et l'estuaire de Fiume Santu.	
<b>Mots-clés/ Key words :</b> Flux d'eau et de nutriments, nutriments, lagune, estuaire méditerranéen, débit, milieu de transition	
<b>Comment citer ce document :</b>	
<b>Disponibilité des données de la recherche :</b>	
<b>DOI :</b>	

<b>Commanditaire du rapport :</b>	
<b>Nom / référence du contrat :</b>	
<input type="checkbox"/> Rapport intermédiaire (réf. bibliographique : XXX) <input type="checkbox"/> Rapport définitif (réf. interne <b>du rapport intermédiaire</b> : R.DEP/UNIT/LABO AN-NUM/ID ARCHIMER)	
<b>Projets dans lesquels ce rapport s'inscrit</b> (programme européen, campagne, etc.) :	
<b>Auteur(s) / adresse mail</b>	<b>Affiliation / Direction / Service, laboratoire</b>
auteur 1	
auteur 2	
auteur 3	
auteur 4	
Encadrement(s) :	
Destinataire :	
Validé par :	

## Table des matières

<b>1. Introduction .....</b>	<b>7</b>
1.1. Contexte de l'étude .....	7
1.2. Objectifs de l'étude .....	7
<b>2. Lagune de Biguglia (projet RETRALAG) .....</b>	<b>8</b>
2.1. Description.....	8
2.2. Méthodologie .....	9
2.2.1. Détermination du contexte hydro-morpho-climatique.....	9
2.2.2. Les 3 campagnes de mesure et de prélèvement d'eau.....	10
2.2.3. Réalisation des jaugeages .....	10
2.2.4. Prélèvement d'eau et analyse des concentrations en nutriments .....	12
2.2.5. Calcul des flux de nutriments .....	12
2.3. Résultats .....	14
2.3.1. Contexte hydro-climatique [2000-2018] .....	14
2.3.2. Débits du Golo et du Bevinco en fonction des précipitations.....	16
2.3.3. Contexte nutritif dans la lagune .....	18
2.3.4. Débits, température et salinité mesurés.....	20
2.3.5. Contexte global des campagnes de prélèvement .....	22
2.3.6. Flux de nutriments.....	23
2.4. Conclusion.....	30
<b>3. Estuaire de Fiume Santu (projet FLUME) .....</b>	<b>31</b>
3.1. Description.....	31
3.2. Méthodologie .....	32
3.2.1. Détermination du contexte hydro-morpho-climatique.....	32
3.2.2. Les 3 campagnes de mesure et de prélèvement d'eau.....	34
3.2.3. Réalisation des jaugeages à l'estuaire.....	34
3.2.4. Prélèvement d'eau et analyse des concentrations en nutriments .....	35
3.2.5. Calcul des flux de nutriments .....	36
3.3. Résultats .....	37
3.3.1. Contexte hydro-climatique [2000-2018] .....	37
3.3.2. Contexte hydrodynamique et physico-chimique .....	39
3.3.3. Les 3 campagnes de prélèvement à l'estuaire .....	42
3.3.4. Contexte global des campagnes de prélèvement .....	43
3.3.5. Flux de nutriments.....	44
3.4. Conclusion.....	48

## Liste des Figures

Figure 1: Lagune de Biguglia, Haute-Corse.....	8
Figure 2: Riverboat équipé de l'ADCP RiverPro (RDI Teledyne) à Biguglia .....	11
Figure 3: Localisation des lignes de mesure au niveau du Grau de Biguglia (au centre) et du canal de Fossone (à droite).  représente les débits sortants (positifs) de la lagune ;  représente les débits entrants (négatifs) de la lagune.....	12
Figure 4: A droite le diagramme ombrothermique moyen sur la lagune de Biguglia sur l'échantillon [2000-2018]. A gauche la répartition des mois secs selon la définition de Gaussen. En bas, cumul de précipitation annuel et saisonnier de 2000 à 2018. ....	14
Figure 5: Cumul de précipitation mensuel et moyenne mensuelle des températures extrémales depuis janvier 2017 à décembre 2018 à la station de Bastia-Poretta, avec en gris foncés les 3 campagnes de prélèvement. Un zoom est fait sur les 3 campagnes avec les cumuls de précipitation, la température moyenne et l'indice d'humectation IK journaliers, avec en gris foncés les jours de prélèvement des 3 campagnes.....	15
Figure 6: Précipitation cumulée journalière mesurée à Bastia-Poretta (station n°20148001) et débits journaliers mesurés au Golo et au Bevinco de janvier 2017 à novembre 2018.....	17
Figure 7: Localisation de l'ensemble des stations de mesure de concentration de nutriments dans la lagune de Biguglia (BIN=Bassin Nord ; BIS=Bassin Sud ; BEV= Bevinco ; GRAU = Grau de Biguglia ; FOS= Fossone) .....	18
Figure 8: Contexte nutritif et physico-chimique dans la lagune de Biguglia, à raison de 1 prise de mesure par mois environ, du 05/10/2017 au 25/10/2018 et des campagnes de prélèvement été 2017 et hiver 2018 représentées par les losanges (  ).....	19
Figure 9: Débit, température et salinité au canal du Fossone et au Grau de Biguglia pendant les 3 campagnes d'hiver et été 2017 et hiver 2018. ....	21
Figure 10: Ensemble des nutriments et débit mesuré au canal du Fossone et du grau de Biguglia pour les campagnes d'été 2017 et hiver 2018. ....	24
Figure 11: Estimation des flux de nutriments journaliers au canal du Fossone (gauche) et au Grau de Biguglia (droite) pour les 2 campagnes d'été 2017 et hiver 2018.....	25
Figure 12: Rapport de flux de nutriments apportés à la lagune au nord (grau de Biguglia) et au sud (canal du Fossone) pour la campagne de février 2018. ....	26
Figure 13: Pourcentage d'erreur entre les deux méthodes de calcul des flux de nutriments journalier .....	27
Figure 14: Estimation du flux de nutriments annuel pour les scénarii sec (Scen.1) et pluvieux (Scen.2) au canal du Fossone à gauche et au Grau de Biguglia à droite.....	28
Figure 15: Estimation du flux de nutriments annuel pour les scénarii sec (Scen.1) et pluvieux (Scen.2) au canal du Fossone à gauche et au Grau de Biguglia à droite.....	29
Figure 16: Estuaire de Fiume Santu, Haute Corse.....	31
Figure 17: (A) Cartographie des stations météorologiques, du bassin versant et du régime hydrographique utilisés pour décrire le fonctionnement de l'estuaire de Fiume Santu (Images Géoportail ; Cartographie QGIS). (B) Photographie de l'estuaire de Fiume Santu.....	32
Figure 18: Localisation de la ligne de mesure du jaugeage et de la position du prélèvement d'eau au niveau de l'estuaire de Fiume Santu et en amont pour les 3 campagnes de prélèvement. ....	34
Figure 19: A droite le diagramme ombrothermique moyen à Oletta sur l'échantillon [2000-2018]. A gauche la répartition des mois secs à Oletta selon la définition de Gaussen. En bas, cumul de précipitation annuel et saisonnier de 2000 à 2018 .....	37
Figure 20: Cumul de précipitation mensuel et moyenne mensuelle des températures extrémales depuis janvier 2017 à décembre 2018 à la station de Santo-Pietro-Di-Tenda, avec en gris foncés les 3 campagnes de prélèvement. Un zoom est fait sur les 3 campagnes avec les cumuls de précipitation, la température	

moyenne et l'indice d'humectation IK journaliers, avec en gris foncés les jours de prélèvement des 3 campagnes.....	38
Figure 21: Débits d'eau douce mesurés en amont de l'estuaire de Fiume Santu, sans influence de la marée. ....	39
Figure 22: Variations des hauteurs d'eau retranchée de la marée à l'amont de l'estuaire (gauche) et à l'estuaire (droite) .....	40
Figure 23: Tracé de la salinité en fonction de la température sur deux années hydrologiques complètes, soit d'octobre 2016 à septembre 2018 à l'amont de l'estuaire (gauche) et à l'estuaire (droite). ....	41
Figure 24: Débits, salinité et température mesurés à l'estuaire de Fiume Santu pendant un cycle de marée descendant pour les 3 campagnes de prélèvement de mars 2017, septembre 2017 et février 2018. ....	42
Figure 25: Concentration en nutriments à l'estuaire de Fiume Santu lors des 3 campagnes de prélèvement d'hiver 2017, été 2017 et hiver 2018. Les barres correspondent à l'écart type des différents prélèvements journaliers pour chaque élément.....	43
Figure 26: Ensemble des nutriments et débit mesuré à l'estuaire de Fiume Santu pour les campagnes d'hiver 2017, été 2017 et hiver 2018.....	45
Figure 27: Estimation des flux de nutriments journaliers à l'estuaire de Fiume Santu pour les 3 campagnes d'hiver 2017, été 2017 et hiver 2018.....	46
Figure 28: Flux de nutriments saisonniers estimés selon un scénario d'année sèche (Scen.1) et un scénario d'année pluvieuse (Scen.2).....	47

## Liste des tableaux

Tableau 1: Caractéristiques de la station météorologique de Bastia-Poretta.....	9
Tableau 2: Date, lieu et plage horaire des mesures de courant et de prélèvement d'eau sur la lagune de Biguglia .....	10
Tableau 3: Conventions adoptées au niveau de chaque site d'étude pour les mesures de débits.....	11
Tableau 4: Exemple de calcul de flux journalier de nutriment au Fossone le 22/09/2017.....	13
Tableau 5: Contexte hydro-morpho-climatique des 3 campagnes de mesure et de prélèvement à la lagune de Biguglia.....	22
Tableau 6: Caractéristiques des stations météorologique de Santo-Pietro-Di-Tenda et Oletta.....	33
Tableau 7: Date, lieu et plage horaire des mesures de courant et de prélèvement d'eau à l'estuaire de Fiume Santu .....	34
Tableau 8: Contexte hydro-morpho-climatique des 3 campagnes de mesure et de prélèvement à l'estuaire de Fiume Santu .....	43

## 1. Introduction

### 1.1. Contexte de l'étude

Les écosystèmes côtiers marins sont parmi les plus productifs au monde et jouent un rôle essentiel dans le cycle de la matière. Ces écosystèmes ont en effet une très forte capacité d'exportation de matière, de ressources trophiques et d'organismes. Bien que la plupart des régions côtières européennes ont déjà été largement étudiée, les petits systèmes lagunaires et estuariens en méditerranée restent encore mal connus. Ces milieux sont en particulier fortement influencés par les variations des conditions hydro-climatiques environnantes. C'est avec l'objectif de mieux comprendre le fonctionnement écologique de ces milieux de transition que la présente étude a été réalisée.

### 1.2. Objectifs de l'étude

L'objectif de cette étude est d'une part de mettre en place une méthodologie de mesure et de calcul des flux d'eau et de nutriments au sein de ces milieux de transition en Haute-Corse, et d'autre part d'extrapoler les résultats horaires à des simulations journalières, saisonnières et annuelles.

Pour cela les données de débits d'eau et de concentrations en nutriments de 3 campagnes de prélèvements réalisés sur deux sites distincts ont été traitées :

- La lagune de Biguglia
- L'estuaire de Fiume Santu

Les résultats obtenus permettront d'obtenir des ordres de grandeur et pourront être utilisés dans des programmes de recherche étudiant par exemple le transfert trophique et l'eutrophisation des écosystèmes côtiers marins.

## 2. Lagune de Biguglia (projet RETRALAG)



Figure 1: Lagune de Biguglia, Haute-Corse

### 2.1. Description

La lagune de Biguglia se situe à 5 km au Sud de la commune de Bastia (Haute-Corse), allongée parallèlement à la côte selon un axe Nord-Sud. C'est la plus grande lagune de Corse, avec une surface de 14.5 km<sup>2</sup> et un volume estimé à 18Mm<sup>3</sup>. Elle est peu profonde et séparée de la mer par un cordon littoral dont la largeur est inférieure à 1 km.

Les entrées d'eaux marines s'effectuent par l'intermédiaire du grau principal situé au nord-est, appelé **grau de Biguglia**. Il est entretenu mécaniquement (ouverture/fermeture) en fonction des besoins hydrobiologiques du milieu (alevinage, oxygénation, etc...). Le **canal du Fossone** au sud permet également des échanges d'eau marine par l'intermédiaire du grau du Golo, mais de manière moins importante et plus aléatoire.

L'étang reçoit des apports d'eaux douces importants par:

- divers ruisseaux et petits fleuves, dont le Bevinco au Nord à caractère intermittent,
- le canal de Fossone à l'extrémité Sud, qui permet une communication avec le fleuve Golo,
- un réseau de canaux de drainage (ruissellement des collines) aboutissant aux stations de pompage.

La configuration très allongée de cette lagune avec une presque île centrale, un apport important d'eau douce au Sud par le canal de Fossone et une communication avec la mer par le grau situé au Nord induisent un gradient de salinité croissant du Sud vers le Nord.

Le fonctionnement hydrodynamique de la lagune est soumis aux conditions météorologiques, aux apports du bassin versant, et aux échanges avec la mer.

## 2.2. Méthodologie

### 2.2.1. Détermination du contexte hydro-morpho-climatique

Le climat méditerranéen est à la transition entre la zone chaude et la zone tempérée et est défini comme “un climat pluvieux et souvent doux en hiver (perturbations d’ouest) et chaud et sec en été (hautes pressions tropicales)” d’après *le dictionnaire du climat* (Daget 1977; Somot 2005).

Les données récoltées sont traitées grâce au logiciel de calcul Matlab via les scripts de Raphaël Colmet-Daâge, inspirés par Christiane Dufresne. L’ensemble de ces données (température, précipitation, salinité, hauteur d’eau et d’ouverture/fermeture de grau) traitées simultanément permettent de caractériser les relations entre les paramètres, révélant ainsi la complexité du système.

#### a. Hydro-morphologie

Deux sondes NKE-STPS-10m-SI permettant les mesures haute fréquence de salinité, pression et température de l’eau toutes les 10 min ont été installées au Grau et sur le canal du Fossone pendant toute la durée des 3 campagnes afin de suivre l’évolution des 3 paramètres hydrologiques cités ci-dessus. L’observation de l’ouverture ou de la fermeture du grau de Biguglia et du Grau du Golo apportent des précisions quant à l’influence de la morphologie de la lagune et de ses affluents.

#### b. Climatologie

La station météorologique de Bastia-Poretta permet d’obtenir les données de température et de cumul de précipitation pour la lagune de Biguglia. Ces caractéristiques sont citées en tableau 1.

Tableau 1: Caractéristiques de la station météorologique de Bastia-Poretta

		Bastia-Poretta (n°20148001)
Caractéristiques des stations météorologiques	Coordonnées	42°32’26’’ N 9°29’07’’ E
	Altitude (m)	10
	Dates de fonctionnement	01/05/1944
	Données récoltées	toutes
	Fréquence	horaire ; journalière
	Distance à la lagune (km)	1
	A l’intérieur du bassin versant de la lagune de Biguglia ?	OUI

Certains indices climatiques ont également été calculés.

- La variante de l’indice de Gaussen, permet la détermination des mois secs, vérifiant l’équation

$$\frac{P(i)}{T(i)} < 3$$

Avec

*P* le cumul de précipitations mensuel en mm/mois

*T* la moyenne de température mensuelle en °C.

L’indice de Gaussen est représenté par un diagramme ombrothermique, réalisé grâce à la superposition des moyennes de température et les cumuls de précipitations mensuels sur un même graphique avec une échelle des ordonnées précise, vérifiant  $\frac{P}{T} = 3$ .

- L'indice d'humectation  $IK$ , permet de calculer l'état d'humectation du sol à chaque averse d'après Chevalier (1983) selon l'équation

$$IK^n = (IK^{n-1} + P^{n-1}) * e^{-\alpha.\theta}$$

Avec

$IK^n$ , l'indice d'humectation du sol à l'averse ( $n$ )

$P^n$ , le cumul de pluie de l'averse ( $n$ )

$\alpha$ , le coefficient de calage compris entre  $[0 ; 2]$  et le plus souvent égal à 0.5

$\theta$ , temps séparant la fin de l'averse ( $n-1$ ) et le début de l'averse ( $n$ ) en heure

### 2.2.2. Les 3 campagnes de mesure et de prélèvement d'eau

3 campagnes de mesure et de prélèvement d'eau présentant des conditions météorologiques contrastées ont été réalisées afin d'identifier les concentrations en nutriments et les débits d'eau dans la lagune de Biguglia.

- La Campagne hiver 2017 du 31 mars au 4 avril 2017.
- La Campagne été 2017 du 20 au 25 septembre 2017.
- La Campagne hiver 2018 du 22 au 27 février 2018.

Les opérations de mesure et de prélèvement d'eau ont été réalisées au niveau du grau de Biguglia et du canal de Fossone, et sont répertoriées dans le tableau 2 ci-dessous.

L'ensemble des mesures est effectuées sur un demi-cycle de marée complet, en passant par l'étale de pleine mer (PM) ou l'étale de basse mer (BM).

Tableau 2: Date, lieu et plage horaire des mesures de courant et de prélèvement d'eau sur la lagune de Biguglia

Campagne	Localisation	Date	Plage Horaire (UTC)
<b>Hiver 2017</b>	Grau	31/03/2017	6h30-15h30
		03/04/2017	7h30-15h30
	Fossone	04/04/2017	7h45-14h45
<b>Été 2017</b>	Grau	20/09/2017	8h00-11h30
	Fossone	22/09/2017	7h20-16h40
		25/09/2017	6h20-14h40
<b>Hiver 2018</b>	Grau	23/02/2018	8h00-12h00
		27/02/2018	11h30-13h30
	Fossone	22/02/2018	8h00-14h40
		26/02/2018	11h00-14h20

### 2.2.3. Réalisation des jaugeages

Les jaugeages sont tirés du rapport de synthèse *Réalisation des études de débits entre la lagune de Biguglia (Haute-Corse) et la mer* effectués par Stéphane KERVELLA, membre du groupement I-SEA SAS.

#### a. Appareil de mesure

Des mesures des courants de marée et des débits entrants et sortants au niveau du grau de la lagune de Biguglia et du canal du Fossone ont été réalisées à l'aide d'un profileur de courant à effet Doppler de

type RiverPro RDI, évoluant sur un flotteur de type Riverboat tracté depuis des berges à l'aide de poulies (figure 2).

Pour chaque site, les mesures couvrent un cycle de marée complet et sont réalisées toutes les heures environ.

La résolution des mesures de vitesse est de l'ordre de 0,1 cm/s et la précision est de l'ordre de 0,3% (informations constructeur). La gamme de mesure de vitesse est typiquement de  $\pm 5$  m/s.



Figure 2: Riverboat équipé de l'ADCP RiverPro (RDI Teledyne) à Biguglia

### b. Convention des débits

Par convention, la « rive gauche » des sections est toujours celle qui est située à la gauche d'un observateur, lorsque celui-ci se place dans le sens de l'écoulement de l'eau, c'est-à-dire depuis l'amont vers l'aval. Ici, la lagune est considérée comme la « source » d'eau, située en amont des Grau. Ainsi les débits mesurés négatifs correspondent à un débit d'eau entrant dans la lagune, et inversement pour les débits positifs (tableau 3 et figure 3)

**Attention :** Il est important de noter que parfois le grau de Biguglia peut être fermé rendant impossible la mesure des débits çà cet endroit.

Tableau 3: Conventions adoptées au niveau de chaque site d'étude pour les mesures de débits.

Convention des débits			
Grau de Biguglia		Canal du Fossone	
Entrant	Sortant	Entrant	Sortant
négatif	positif	négatif	positif

### c. Localisation des transects

- Grau de Biguglia, mesures réalisées le long d'une ligne située 80 m en aval du pont de la Route de la lagune.
- Canal du Fossone, mesures réalisées le long de deux lignes de part et d'autre du pont de la route de la Canonica, à proximité de la raffinerie pétrolière. Ce site est situé à environ 2000 m de la partie sud de l'étang de Biguglia (figure 3).

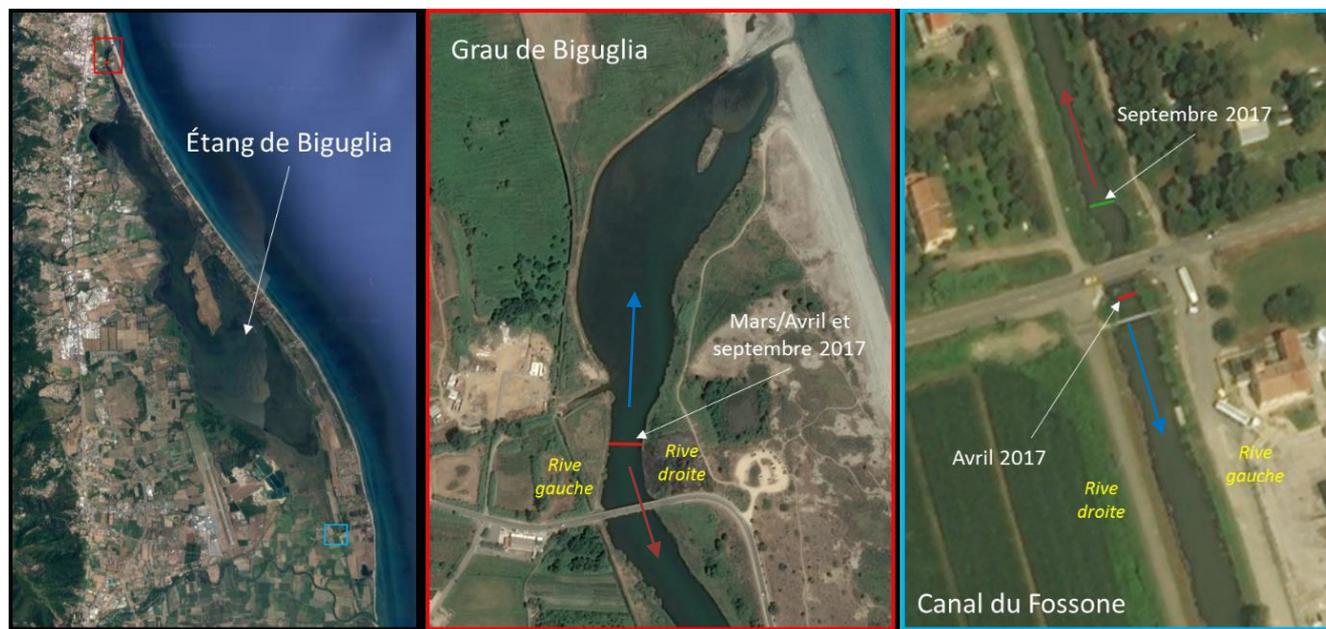


Figure 3: Localisation des lignes de mesure au niveau du Grau de Biguglia (au centre) et du canal de Fossone (à droite).  
 —→ représente les débits sortants (positifs) de la lagune ; —→ représente les débits entrants (négatifs) de la lagune

## 2.2.4. Prélèvement d'eau et analyse des concentrations en nutriments

Les prélèvements d'eau ont été effectués aux mêmes plages horaires et même lieu que les jaugeages (tableau 2), soit au Grau de Biguglia et le canal du Fossone.

- Dans des flacons plastiques de 100 ml pour l'analyse de l'azote inorganique dissout (NID), du phosphate (PO<sub>4</sub>) et de la Silice (SiO<sub>4</sub>) après filtration sur filtre GF/F 0.7µm effectuée sur site.
- Dans des flacons en verre de 20 ml pour l'analyse sur site des teneurs en azote total (NT), phosphore total (PT) et carbone organique total (COT) après filtration sur filtre nylon 20 µm effectuée sur site.
- Dans des flacons en verre de 20 ml pour l'analyse de l'azote organique dissout (NOD), le phosphore organique dissout (POD) et le carbone organique dissout (COD) après filtration sur filtre GF/F 0.7 µm effectuée sur site.

## 2.2.5. Calcul des flux de nutriments

### a. Flux horaire

L'analyse des concentrations en nutriments et autres paramètres organiques et inorganiques présents dans l'eau de rivière combinée aux mesures de débit au niveau du Grau de Biguglia et du canal du Fossone, permet de calculer le flux de nutriment dans notre rivière comme suit :

$$\text{Flux (mol/s)} = \text{Débit (L/s)} * \text{Concentration (}\mu\text{M} = \mu\text{mol/L)} * 10^{-6} = Q * [X] * 10^{-6}$$

### b. Flux journalier : Méthode de la somme

Somme des flux de nutriments horaires sortants ou entrants selon un minimum d'un quart de cycle de marée complet puis extrapolation à la journée complète soit aux deux cycles de marée complets. Le flux journalier a été calculé en fonction des heures de marée, du nombre de cycles de marée obtenus sur une journée complète et des heures de flux entrant ou sortant de la lagune.

Prenons pour exemple le résultat des flux de NO<sub>2</sub> du 22/09/2017 obtenu au canal du Fossone pour la campagne été 2017 (tableau 4)

Tableau 4: Exemple de calcul de flux journalier de nutriment au Fossone le 22/09/2017

Heure du jaugeage (UTC)	Moment de la marée	Heure de marée Bastia (UTC)	Flux de NO <sub>2</sub> horaire au 22/09/2017 (10 <sup>3</sup> mol/h)	Heures de marée	Flux de NO <sub>2</sub> journalier au 22/09/2017 (10 <sup>3</sup> mol/j)
07H30	PM-1	BM : 02H47	0,1	Entrante = 6h	<i>Flux journalier entrant</i> $= \sum Fluxentrants(3h) * \frac{2}{24}$ = 6h de flux entrant = -5,7 10 <sup>3</sup> mol/j  <i>Flux journalier sortant</i> $= \sum Fluxsortants(6h) * \frac{3}{24}$ = 18h de flux sortant = 18,4 10 <sup>3</sup> mol/j
08H45	PM	PM : 08H36	-0,8		
09H45	PM+1	BM : 14H57	-0,8		
10H40	PM+2	PM : 21H00	-1,3		
11H45	PM+3		0,6	Sortante = 18h	
12H50	PM+4		1,7		
13H40	PM+5		1,8		
14H40	BM		1,0		
15H40	PM-5.5		1,1		

c. Flux saisonnier et annuel : Méthode de la moyenne

Moyenne des flux de nutriments horaires sortants ou entrants disponibles puis extrapolation à une journée moyenne classique de 2 cycles de marée de 12h chacun.

Nous avons fait l'hypothèse que sur plusieurs mois, les différences d'heures de marée sortante et entrantes s'équilibrent à environ 6h. On estime donc les flux de nutriments journalier sur 12h de flux moyen selon la formule ci-dessous :

$$Flux\ journalier\ entrant = moyenne\ (flux\ entrants\ horaires) * 12h = mol/j$$

L'année est découpée en deux saisons : Une saison pluvieuse et une saison sèche selon la définition de Gaussen (voir partie 2.2.1 b).

Le flux de nutriments saisonnier est calculé sur la durée de la saison pluvieuse et sèche en considérant un flux de nutriment journalier constant pour chacune des saisons. Par exemple :

$$Flux\ d'hiver\ entrant = flux\ entrants\ hiver * d = mol/hiver$$

En conclusion, le flux annuel correspond à la somme des flux saisonniers :

$$Flux\ annuel\ entrant = flux\ d'hiver\ entrant + flux\ d'été\ entrant = mol/an$$

## 2.3. Résultats

### 2.3.1. Contexte hydro-climatique [2000-2018]

La détermination des saisons a été effectuée en fonction de l'indice de Gausson moyen obtenu sur l'ensemble des données disponibles, obtenant ainsi une année découpée en 3 saisons seulement, avec:

**La saison sèche**, correspond aux mois vérifiant  $P < 3 * T$  (variante de l'indice de Gausson).

**La saison pluvieuse d'hiver**, correspondant aux mois pluvieux précédents la saison sèche.

**La saison pluvieuse d'automne**, correspondant aux mois pluvieux suivant la saison sèche

Le climat de la lagune de Biguglia est de type méditerranéen, avec en moyenne 4.1 +/-0.8 mois secs et un cumul de précipitation annuel moyen de 783mm. L'automne cumule 44% des précipitations annuelle, la saison sèche correspond aux 3 mois d'été, et s'étend parfois aux mois de mai et septembre (figure 4).

L'année 2017 est très sèche ; avec 8 mois secs consécutifs de mars à octobre compris et 580mm de précipitation annuelle.

L'année 2018 est très humide ; avec 90mm de précipitation pour les 3 mois de sécheresse en été, et jusqu'à 1130mm à l'année (figure 4).

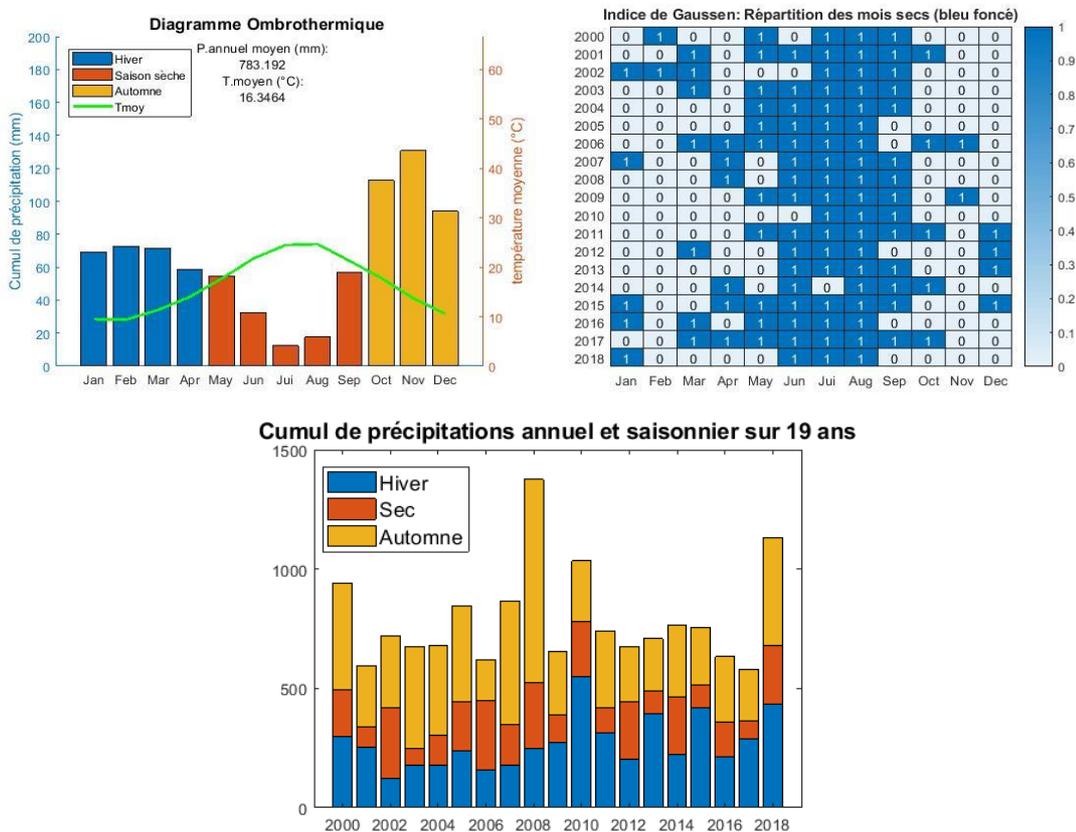
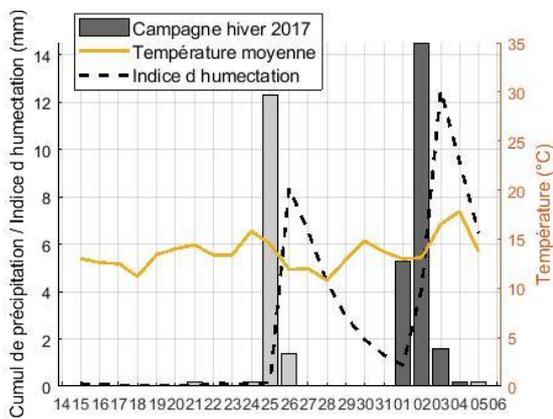
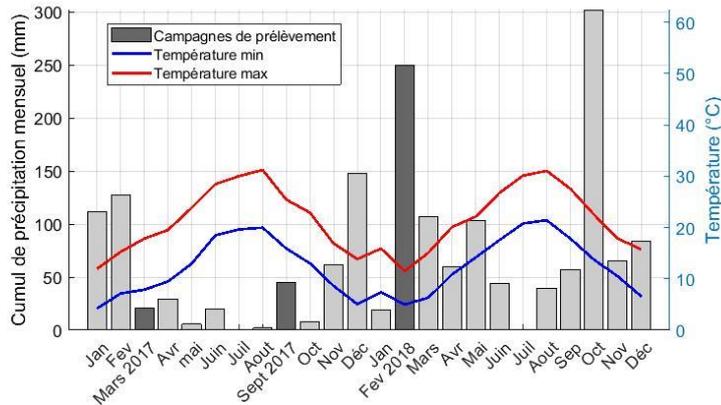


Figure 4: A droite le diagramme ombrothermique moyen sur la lagune de Biguglia sur l'échantillon [2000-2018]. A gauche la répartition des mois secs selon la définition de Gausson. En bas, cumul de précipitation annuel et saisonnier de 2000 à 2018.

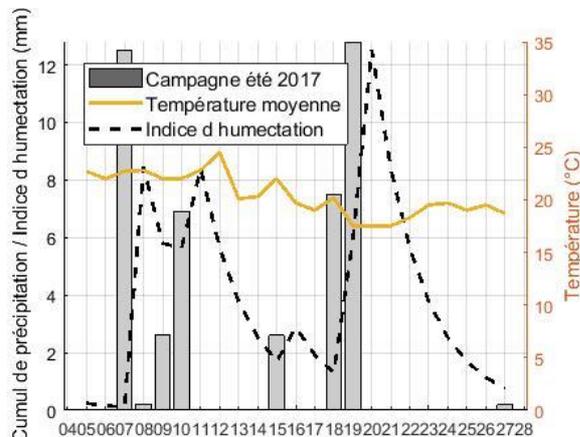
La campagne de mars 2017 marque le début d'une période de sécheresse précoce. La température est de 14 à 17°C ; l'indice IK d'humectation du sol est faible mais non nul (de 1 à 12mm) suite aux pluies de 12mm le 25/03 et 20mm le 01-02/04.

La campagne de septembre 2017 fait suite à la longue période de sécheresse. La température est de 19 à 20°C ; l'indice IK d'humectation du sol est faible mais non nul (de 12 à 1mm) suite à la pluie de 20mm du 18-19/09.

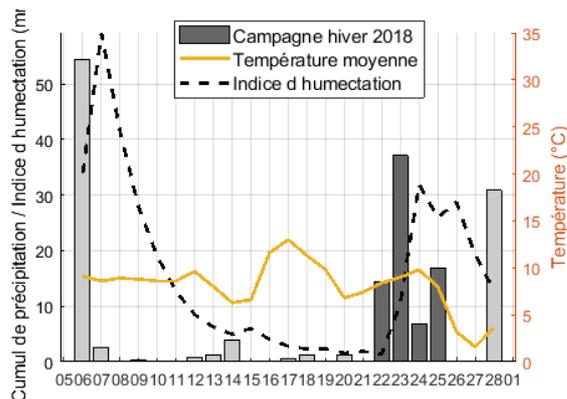
La campagne de février 2018 est au cœur d'un hiver pluvieux. La température est de 9 à 13°C ; l'indice IK d'humectation du sol est faible (de 2 à 8mm) mais fait suite à un évènement de précipitation extrême le 08-09/02 avec un indice IK de 60mm.



Campagne du 31 mars au 04 avril



Campagne du 20 au 25 septembre



Campagne du 22 au 27 février

Figure 5: Cumul de précipitation mensuel et moyenne mensuelle des températures extrêmes depuis janvier 2017 à décembre 2018 à la station de Bastia-Poretta, avec en gris foncés les 3 campagnes de prélèvement. Un zoom est fait sur les 3 campagnes avec les cumuls de précipitation, la température moyenne et l'indice d'humectation IK journaliers, avec en gris foncés les jours de prélèvement des 3 campagnes.

### 2.3.2. Débits du Golo et du Bevinco en fonction des précipitations

Le Golo et le Bevinco sont les 2 principales sources d'eau douce alimentant la lagune de Biguglia, dont les données sont extraites de la banque hydro france<sup>1</sup>:

	Station	Altitude	Distance à la lagune	Bassin versant drainé	Coordonnées (lambert II étendue)		Régime influencé
	N°	m	Km	Km <sup>2</sup>	X	Y	
<b>Golo Volpajola</b>	à Y7212010	80	12,3	926	1178980	1748430	Fortement
<b>Bevinco Olmeta-Di-Tuda</b>	à Y7315010	209	6	53	1178676	1759218	Faible

Il est important de noter que certaines mesures de débit sont manquantes, et ont été estimés directement par la banque hydro. L'ensemble des données exploitées est renseigné en annexe.

En 2017, au Golo, des débits atteignant plus de 200 m<sup>3</sup>/s sont mesurés en février 2017 mais s'estompent rapidement en mars à seulement 10 m<sup>3</sup>/s en moyenne. L'étiage est atteint très rapidement et ce jusqu'en novembre, en passant par des mesures entre 1 et 3 m<sup>3</sup>/s en septembre 2017. Le Bevinco évolue à 3 m<sup>3</sup>/s en janvier et février 2017, puis retrouve son débit d'étiage moyen de 0.26 +/- 0.25 m<sup>3</sup>/s de mars à décembre 2017.

En 2018, le Golo présente un débit important de 33 m<sup>3</sup>/s de moyenne de janvier à juin, en passant par des débits de 60 m<sup>3</sup>/s en février 2018 puis 120 m<sup>3</sup>/s en mars. Le Bevinco atteint 1.3 m<sup>3</sup>/s en moyenne pour cette même période, en passant par des débits estimés de 0 à 8.5 m<sup>3</sup>/s en février 2018.

<sup>1</sup> <http://www.hydro.eaufrance.fr/>



Figure 6: Précipitation cumulée journalière mesurée à Bastia-Poretta (station n°20148001) et débits journaliers mesurés au Golo et au Bevinco de janvier 2017 à novembre 2018

### 2.3.3. Contexte nutritif dans la lagune

La lagune de Biguglia est échantillonnée mensuellement afin de relever les données de température, salinité, turbidité, et concentration en différents nutriments. 5 points de mesures permettent le suivi de ces paramètres : BIN=Bassin Nord ; BIS=Bassin Sud ; BEV= Bevinco ; GRAU = Grau de Biguglia ; FOS= Fossone.

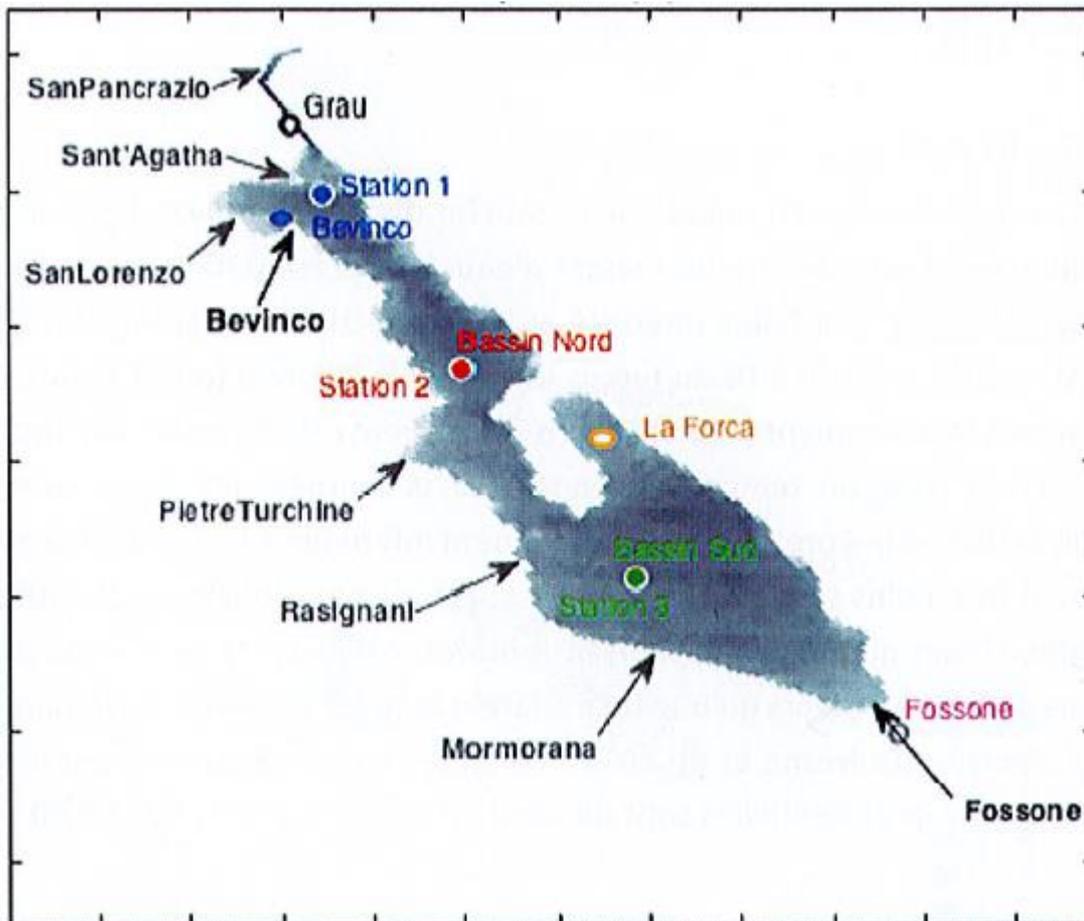


Figure 7: Localisation de l'ensemble des stations de mesure de concentration de nutriments dans la lagune de Biguglia (BIN=Bassin Nord ; BIS=Bassin Sud ; BEV= Bevinco ; GRAU = Grau de Biguglia ; FOS= Fossone)

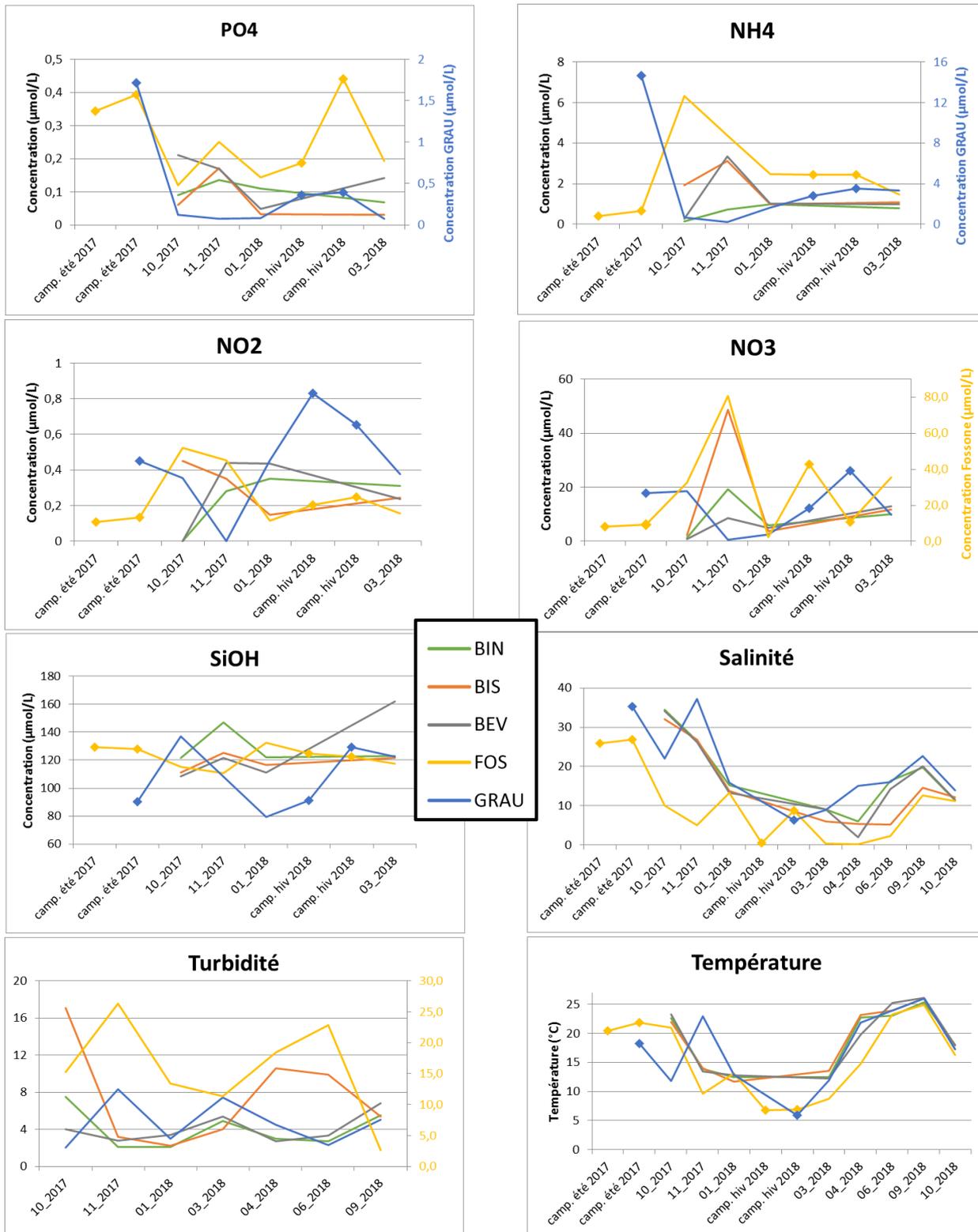


Figure 8: Contexte nutritif et physico-chimique dans la lagune de Biguglia, à raison de 1 prise de mesure par mois environ, du 05/10/2017 au 25/10/2018 et des campagnes de prélèvement été 2017 et hiver 2018 représentées par les losanges (◆)

### 2.3.4. Débits, température et salinité mesurés

Les mesures de débit couvrent l'ensemble des 3 campagnes de mesure.

Deux cycles de marée complets ont pu être mesurés, sur deux fois deux jours non consécutifs, au grau de Biguglia à la campagne d'hiver 2017 et au canal du Fossone à la campagne d'été 2017.

La durée du flot est très variable, allant de 3 à 7h au canal du Fossone comme au grau de Biguglia.

Les débits au grau de Biguglia varient entre  $-20$  et  $22\text{m}^3/\text{s}$ , au canal du Fossone entre  $-4$  et  $6\text{m}^3/\text{s}$ .

- Pendant la campagne hiver 2017 :

On observe un cumul de précipitation de 21,6mm du 01 au 03/04 engendrant une augmentation de 50% au moins des débits du Golo et du Bevinco atteignant respectivement 14 et  $0,7\text{m}^3/\text{s}$  et un indice d'humectation passant de 1 à 13mm (figure 5).

- 2 mesures au grau de Biguglia :

L'étale de pleine et basse mer est décalée d'environ -3h avec Bastia le 31/03.

On observe 6h de flot et  $-18\text{m}^3/\text{s}$  le 31/03 contre 3h de flot et  $-12\text{m}^3/\text{s}$  le 03/04.

Le 31/03 la salinité atteint son seuil haut de 36 à PM puis stagne même pendant le jusant.

Le 04/04 la salinité décroît durant le jusant puis croît durant les 3h de flot avant de décroître à nouveau, le tout dans l'intervalle [31;22;35].

La température augmente entre le maximum du flot et le maximum du jusant le 31/03 et inversement le 03/04.

- 1 mesure au canal du Fossone :

L'étale de pleine mer est alignée avec celle de Bastia.

Les débits sont faibles probablement dû à la fermeture de l'estuaire du Golo, oscillant dans l'intervalle  $[-2 ; +2]\text{m}^3/\text{s}$ .

La salinité, faible, croît durant le jusant puis décroît durant le flot dans l'intervalle [5 ; 10 ; 5].

De même pour la température dans l'intervalle [15 ; 18 ; 16] °C.

- Pendant la campagne d'été 2017.

Pas de précipitation pendant les deux mesures du 22 et 25/09.

- Pas de mesure au grau de Biguglia car fermé.

- 2 mesures au canal du Fossone :

L'étale de pleine mer est décalée de -3h par rapport à Bastia, l'étale de basse mer est décalée d'au moins +4h par rapport à Bastia.

On observe 3h de flot à  $-2\text{m}^3/\text{s}$  maximum contre une estimation de 8h de jusant à  $4\text{m}^3/\text{s}$ .

La salinité augmente pendant le jusant puis décroît pendant le flot dans l'intervalle [20 ; 30]

- Pendant la campagne hiver 2018 :

On observe un cumul de précipitation de 75mm du 22 au 25/02. Les débits du Golo et du Bevinco augmentent respectivement de 20 à  $60\text{m}^3/\text{s}$  et de 0,5 à  $8\text{m}^3/\text{s}$  avec un indice d'humectation passant de 1 à 30mm.

- Au grau de Biguglia :

L'étale de pleine mer est décalée d'au moins -2h.

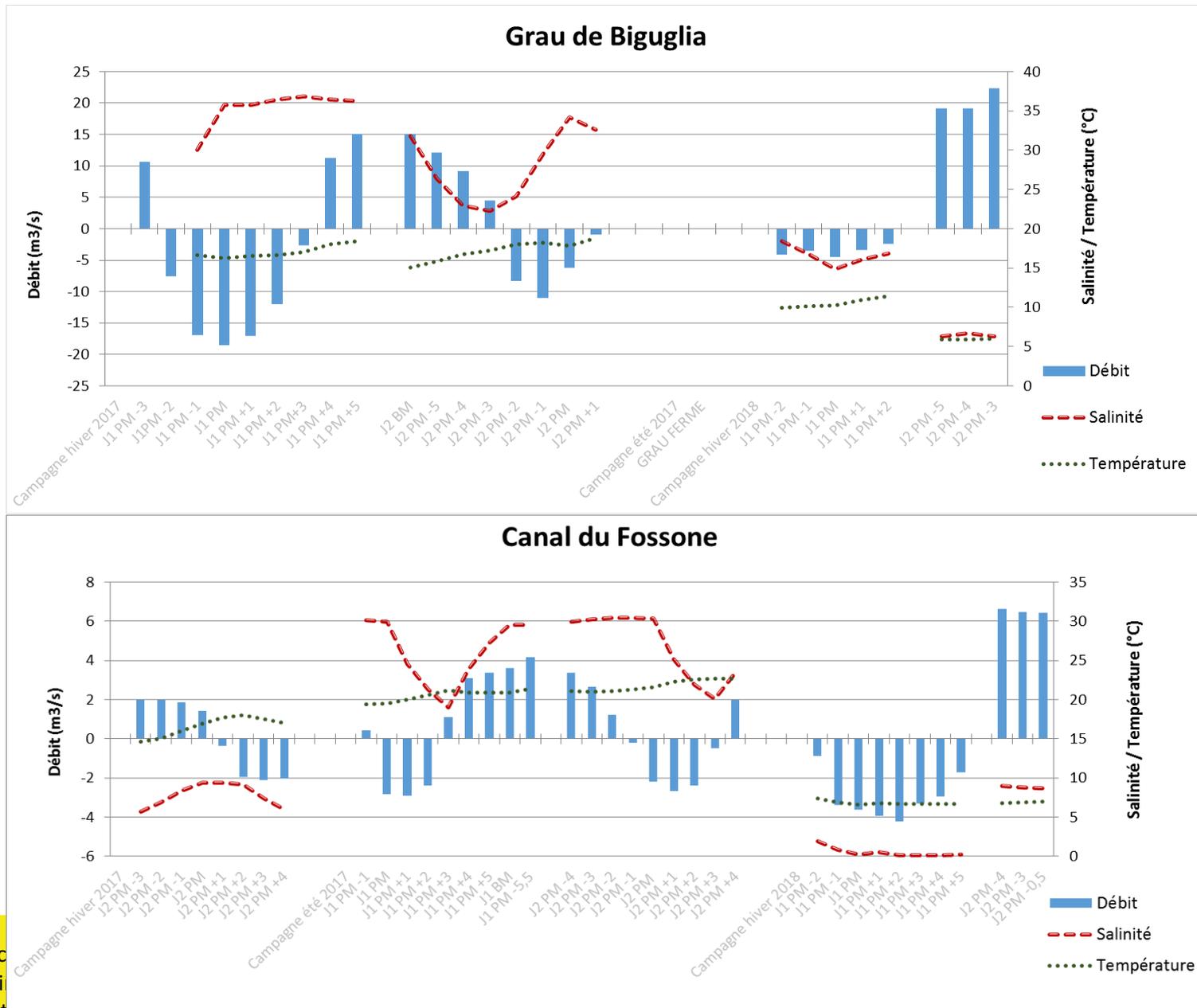
Le flot est faible le 23/02 avec  $-4\text{m}^3/\text{s}$  contrairement au jusant enregistrant  $22\text{m}^3/\text{s}$  le 27/02.

La salinité atteint son minimum de 15 à l'étale de pleine mer de Bastia le 23/02, tandis que la température évolue peu. La salinité est très faible à 6 le 27/02, et la température à 6°C

- Au canal du Fossone :

Le flot enregistre  $-4\text{m}^3/\text{s}$  le 22/02 contre  $6\text{m}^3/\text{s}$  au jusant le 26/02.

La salinité est de 0 le 22/02 pendant le flot puis monte à 9 le 26/02 pendant le jusant.



Département Océanographie  
 Laboratoire Environnements et Dynamique des Systèmes  
 Auteurs : Colmet-Daage Raphaël • Malet Nathanaël  
 Date : avril 2019  
 ODE/UL/LER-PAC/19-03

Figure 9. Débit, température et salinité au canal du Fossone et au Grau de Biguglia pendant les 3 campagnes d'hiver et été 2017 et hiver 2018.

## Conclusion :

Le grau de Biguglia et le canal du Fossone ont des comportements différents.

### 1. Salinité :

Au canal du Fossone, la salinité augmente lors du jusant (débit sortant positif) dû à l'eau salée accumulée dans la partie sud de la lagune ; et diminue ensuite lors du flot (débit entrant négatif) par l'apport d'eau douce provenant du Golo à travers le canal. En période de forte pluie comme en février 2018, la salinité est proche de 0 pendant le flot et augmente légèrement lors du jusant.

Au grau de Biguglia, la salinité diminue lors du jusant dû à l'apport d'eau douce du Bevinco lorsque celui-ci n'est pas à sec. La salinité augmente ensuite lors du flot dû aux apports d'eau salée de la mer entrant par le grau et peut stagner à des valeurs élevées si le débit du Bevinco est trop faible.

### 2. Débits

En période pluvieuse le débit du Golo augmente et s'engouffre par l'extérieur dans la lagune via le canal du Fossone lors du flot. Ainsi, le débit entrant dans la lagune durant le flot est important et dessalé, et ce jusqu'à 8h durant. Lors du jusant, l'eau saumâtre de la lagune sort jusqu'au grau du Golo avec un débit plus important qu'au flot (22-26/02/18). L'étale de pleine mer est décalée de celle de Bastia. En périodes sèche le flot est de seulement 3h et de faible ampleur, compensée par un jusant plus long et puissant mais le manque de données ne nous permet pas de le confirmer.

Lorsque le grau du Golo est fermé comme en mars 2017, les débits entrants et sortants sont faibles et de même amplitude.

En période pluvieuse le débit du Bevinco augmente et pénètre directement l'intérieur de la lagune au Nord proche du grau. Ainsi lors du flot, le débit d'eau de mer entrant est faible car opposé au débit du Bevinco en écoulement permanent. Lors du jusant, le débit sortant augmente rapidement pour atteindre jusqu'à 20 m<sup>3</sup>/s en février 2018.

### 3. Température

Les évolutions de température ne sont pas assez marquées pour pouvoir conclure mais elles permettent de confirmer les hypothèses soulevées au travers de l'analyse de la salinité et du débit.

## 2.3.5. Contexte global des campagnes de prélèvement

Résumé de tous les paramètres énoncés précédemment :

Tableau 5: Contexte hydro-morpho-climatique des 3 campagnes de mesure et de prélèvement à la lagune de Biguglia

	Campagne hiver 2017	Campagne été 2017	Campagne hiver 2018
Cumul de pluie sur 15 jours précédents (mm)	36mm	45 mm	118 mm
Indice d'humectation sur 15 jours précédents (mm)	Faible (entre 0 et 12)	Faible (entre 0 et 12)	Fort (entre 0 et 59)
Cumul de pluie pendant campagne (mm)	21.6	0	75
Débit Golo (m3/s)	8 - 14	1 - 2,5	20 - 60
Débit Bevinco (m3/s)	0,4 - 0,7	0,07	0,75 - 8

Dép

Laboratoire Environnement Ressource Provence Azur Corse

Auteurs : Colmet-Daâge Raphaël • Malet Nathalie

Date : avril 2019

ODE/UL/LER-PAC/19-03

Site	Grau de Biguglia		Canal du Fossone		Grau de Biguglia		Canal du Fossone					
Salinité (min - max)	22 - 37		6 - 9		/		20 - 30		7 - 19		0 - 9	
Température (min - max)	15 - 19		15 - 18		/		19 - 23		6 - 11		7	
Ouverture/fermeture des Grau	Ouvert		Fermé		Fermé		Ouvert		Ouvert		Ouvert	
Jour de prélèvement	31/3	02/4	04/4	/	22/9	25/9	23/2	27/2	22/2	26/2		
Durée du flot (h)	6	3,5	>4	/	3	4	>5	n.d	7	n.d		
Débit max journaliers (m3/s)	Entrant		-		/		-		-		-	
	Sortant		+		/		+		n.d		+	
	-18	-11	-2	/	-3	-3	-4	n.d	-4	n.d	-4	n.d
	+16	+15	+2	/	+4	+3	n.d	+22	n.d	n.d	+6,6	

- Campagne hiver 2017 du 31 mars au 4 avril 2017.
- Campagne été 2017 du 20 au 25 septembre 2017.
- Campagne hiver 2018 du 22 au 27 février 2018.

### 2.3.6. Flux de nutriments

Le flux de nutriments a été calculé pour l'ensemble des nutriments inorganiques (NO<sub>2</sub>, NO<sub>3</sub>, NH<sub>4</sub>, PO<sub>4</sub>) de la silice (SiOH<sub>4</sub>) et des nutriments organiques et totaux (NOD, NT, POD, PT, COD, CT).

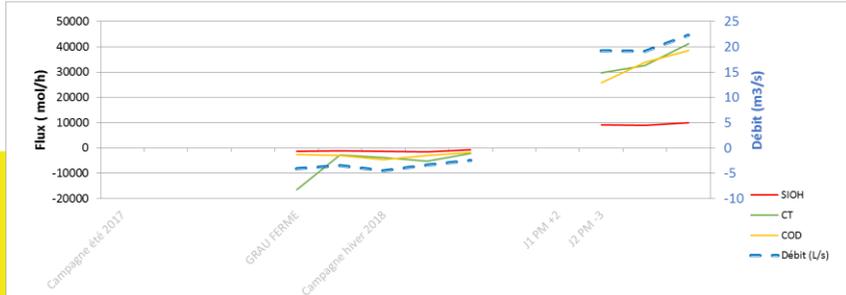
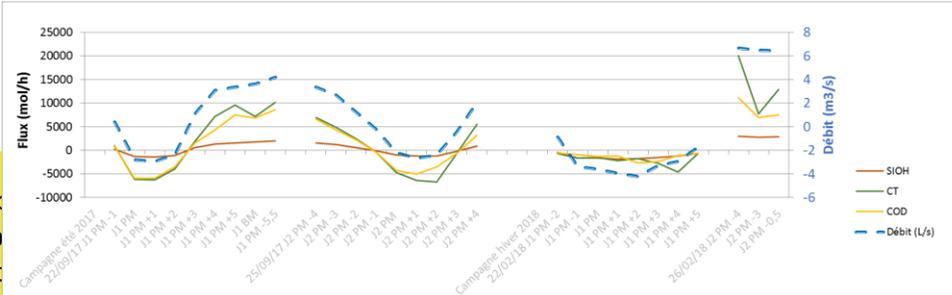
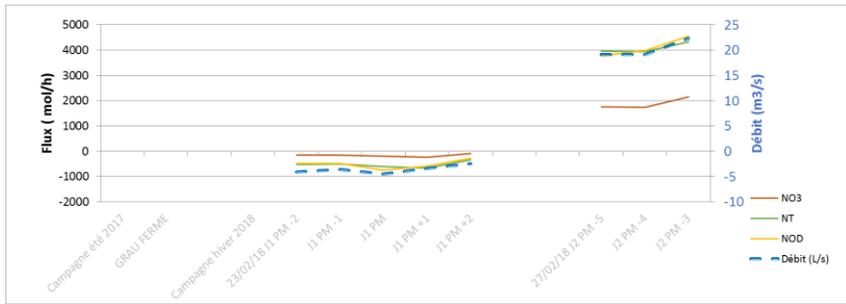
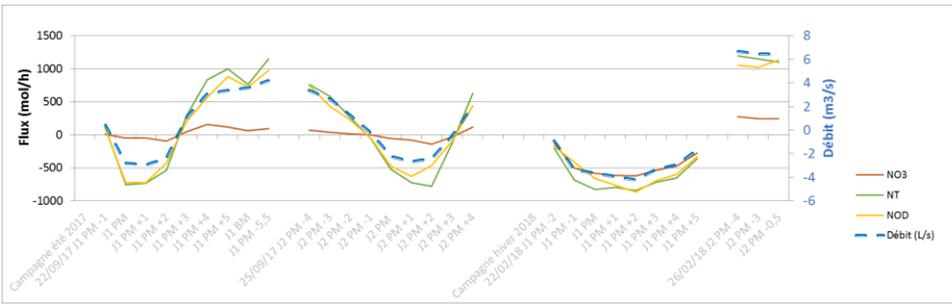
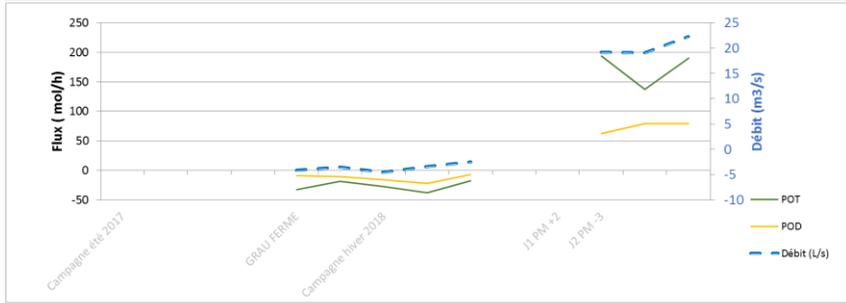
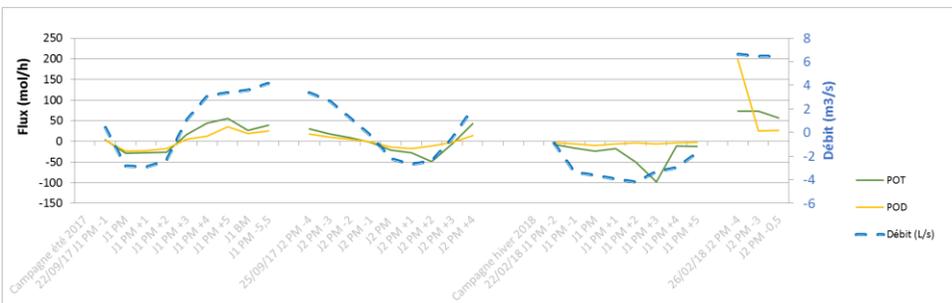
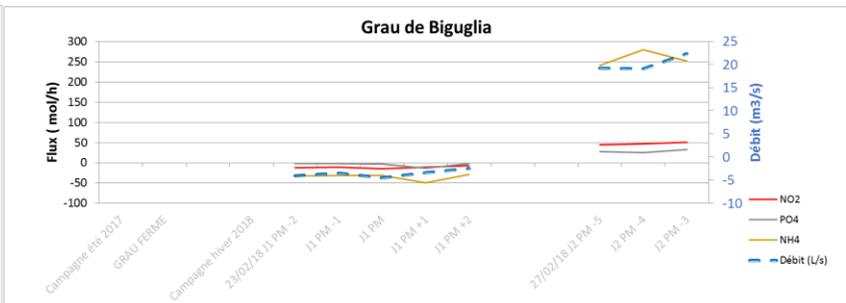
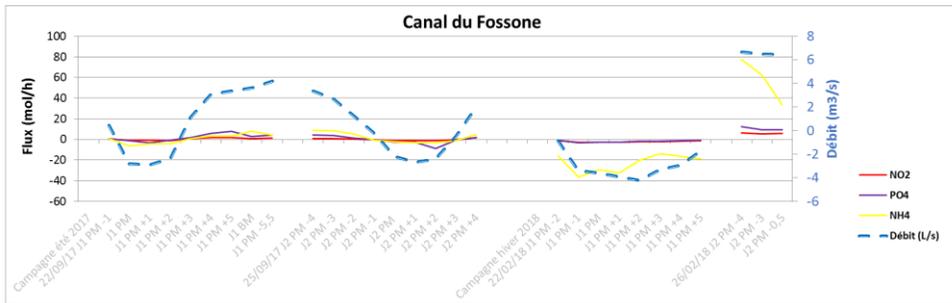
Les flux ont été calculés séparément pour les flux entrants (négatifs) et les flux sortants (positifs).

L'ensemble de la méthodologie est expliquée en partie 2.2.5.

- Le calcul des flux horaires instantanés dépend des mesures de débit au grau de Biguglia et au canal du Fossone ainsi que les analyses de concentrations en nutriments prélevées aux mêmes instants (voir partie 2.2.5.a).
- Le calcul des flux de nutriments journalier est effectué selon la méthode de la somme (voir partie 2.2.5.b).
- Le calcul des flux de nutriments annuels est effectué par la méthode de la moyenne, extrapolée aux saisons puis à l'année (voir partie 2.2.5.c).

Le flux de nutriment journalier sortant au Fossone le 26/02/2018 et au grau de Biguglia le 27/02/2018 a été estimée théoriquement car seulement 3 mesures de débit ont été effectuées sans pouvoir apercevoir le début ni la fin du cycle de jusant étudié. Afin de pouvoir obtenir une mesure journalière, la moyenne des mesures a été calculée et ramenée à la journée en faisant l'hypothèse d'un cycle de marée classique de 12h.

#### a. Flux de nutriments horaires



Dép  
Lab  
Aut

Date: avril 2019

ODE/UL/LER-PAC/19-03

Figure 10: Ensemble des nutriments et débit mesuré au canal du Fossone et du grau de Biguglia pour les campagnes d'été 2017 et hiver 2018.

### b. Flux de nutriments journalier

Du fait de l'important débit d'eau douce s'écoulant dans la lagune par le fleuve Golo ou le fleuve Bevinco, la durée du flot varie entre 3h et 7h contrairement aux 6h environ des marées classiques.

De ce fait, le flux journalier sortant et entrant dans la lagune varie considérablement en fonction du nombre d'heures de marée sortante et entrante affecté à chaque jour.

Les flux de nutriment sortant au Fossone le 26/02/2018 et au grau de Biguglia les 22 et 27/02/2018 ont été calculés selon la méthode de la moyenne (contrairement aux flux du 22 et 25/09/17 calculés selon la méthode de la somme) car seulement 3 mesures de débit ont été effectuées sans pouvoir apercevoir le début ni la fin du cycle de jusant étudié.

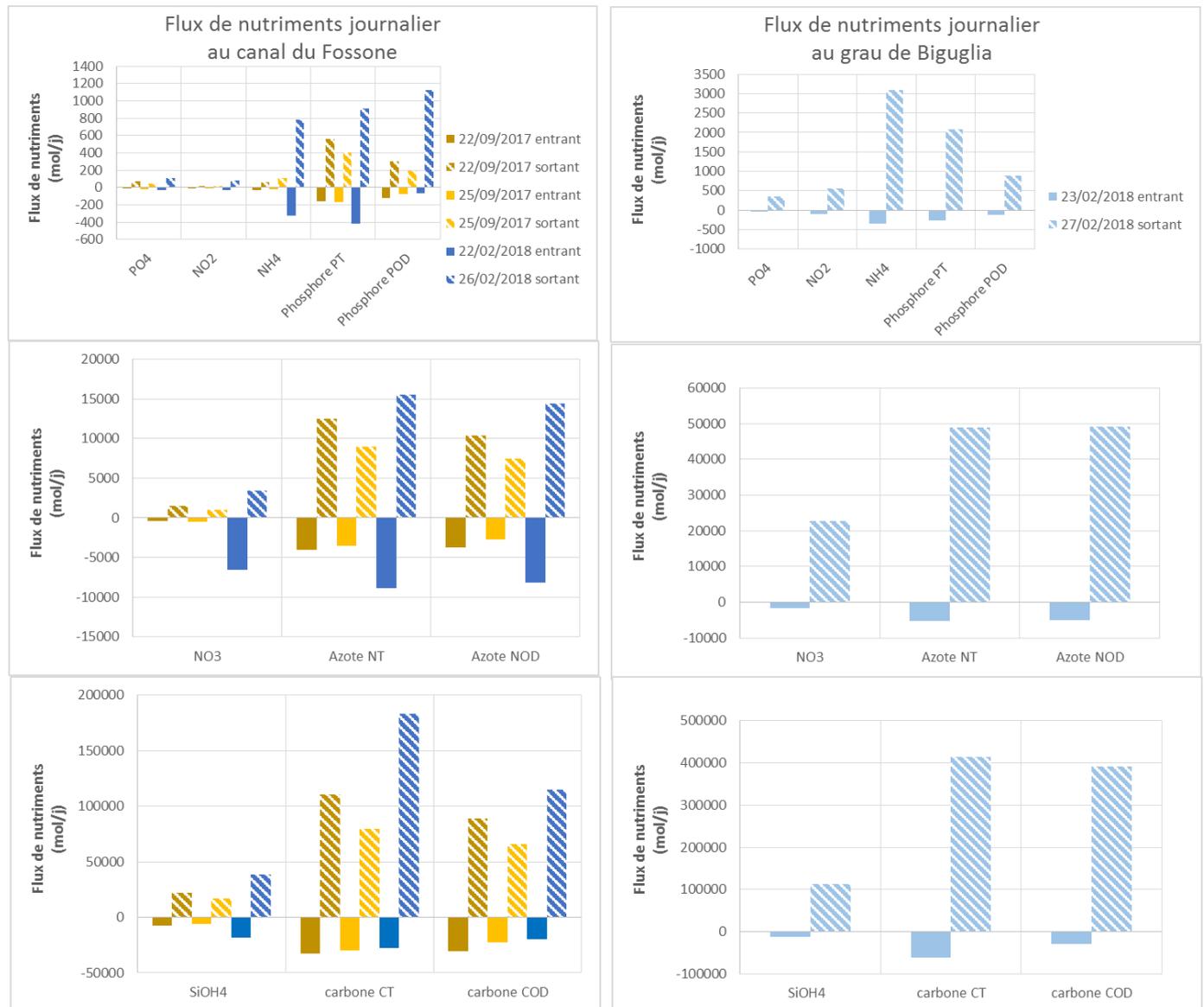


Figure 11: Estimation des flux de nutriments journaliers au canal du Fossone (gauche) et au Grau de Biguglia (droite) pour les 2 campagnes d'été 2017 et hiver 2018.

La figure 12 montre le rapport entre les flux de nutriments apportés à la lagune via le grau de Biguglia comparé au canal du Fossone lors de la campagne de février 2018, selon la formule suivante :

$$\text{Rapport} = \frac{[\text{Flux}_{\text{Biguglia}} - \text{Flux}_{\text{Fossone}}]}{\text{Flux}_{\text{Fossone}}}$$

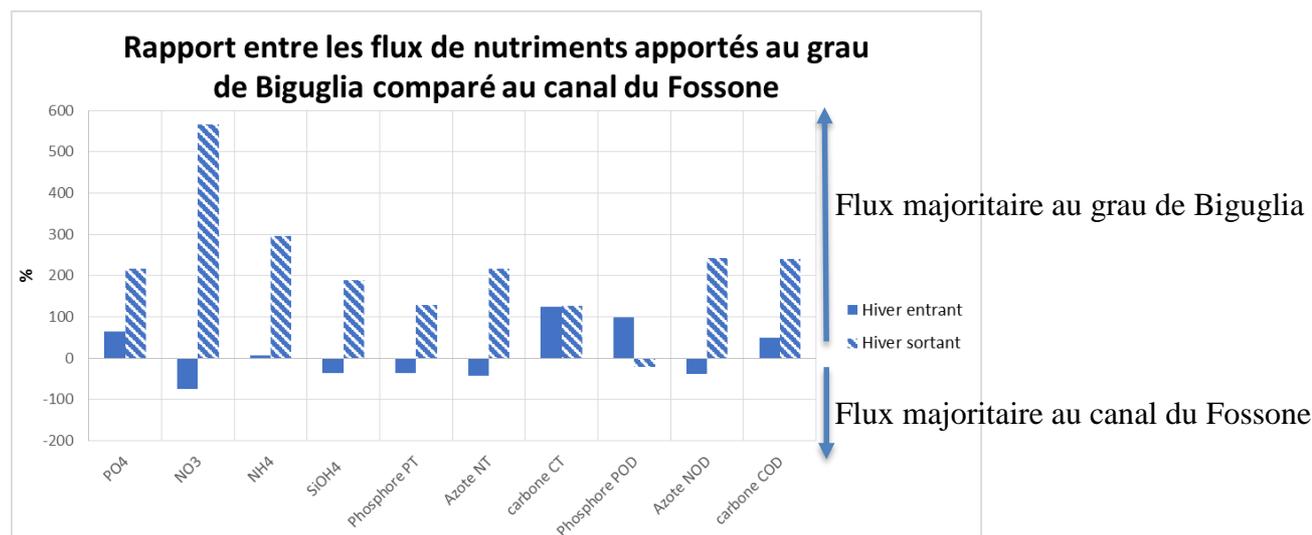


Figure 12: Rapport de flux de nutriments apportés à la lagune au nord (grau de Biguglia) et au sud (canal du Fossone) pour la campagne de février 2018.

Les flux majoritaires sortants de la lagune se situent au grau de Biguglia, tandis que les flux entrants dans la lagune sont pour certains nutriments plus importants au canal du Fossone qu'au grau de Biguglia malgré des débits plus faibles (figure10)

### c. Flux de nutriments annuel

Afin de pouvoir calculer des flux de nutriments annuels et saisonniers, une seconde méthode, décrite dans la partie 2.2.5.c, a été utilisée.

Ainsi deux méthodes de calcul de flux journalier sont utilisées :

- Somme des flux mesurés sur un demi-cycle de marée complet, multiplié par deux pour obtenir un cycle de marée complet : C'est la « méthode de la somme ».
- Moyenne des flux mesurés multiplié par 12, pour obtenir le flux moyen sur les 12h journalières : C'est la « méthode de la moyenne ».

Le pourcentage d'erreur de la méthode de la moyenne par rapport à la méthode de la somme est présenté figure 13.

Le pourcentage d'erreur varie entre 16,7% et 100% pour les flux entrants, soit une surestimation du débit réel par la méthode de la moyenne. Le pourcentage d'erreur varie de 0 à -33% pour les flux sortants, soit une sous-estimation du débit réel.

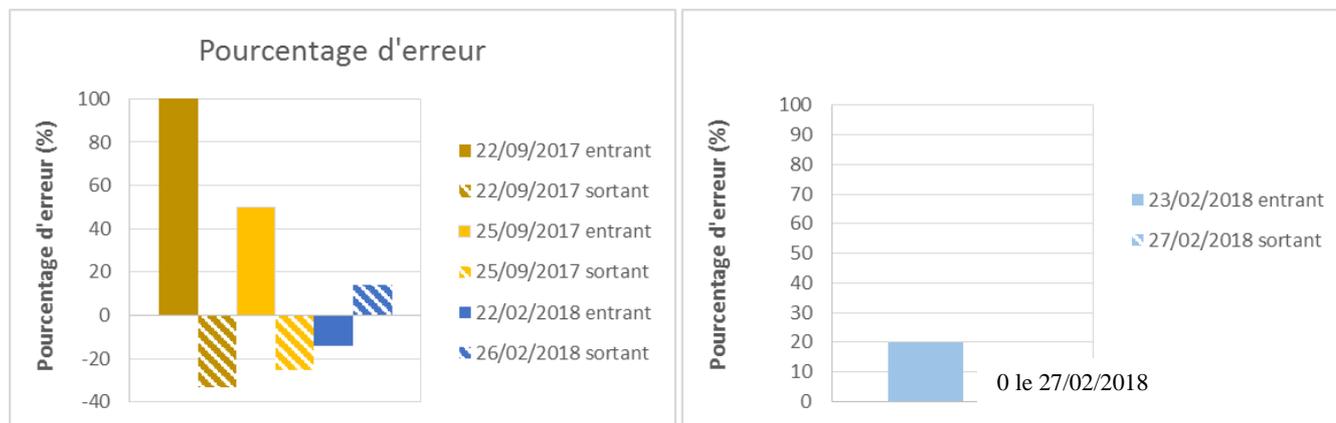


Figure 13: Pourcentage d'erreur entre les deux méthodes de calcul des flux de nutriments journalier

Pour la suite, nous avons estimé les flux de nutriments annuels et saisonniers par la méthode de la moyenne, pour deux scénarios climatique distinct :

- **Une année sèche avec 4 mois pluvieux et 8 mois secs (scénario 1)**
- **Une année pluvieuse avec 8 mois pluvieux et 4 mois secs (scénario 2)**

De manière générale, le flux de nutriment sortant de la lagune est plus important que le flux entrant pour les deux scénarii. Sauf pour le cas particulier du NO<sub>3</sub> au canal du Fossone dont le flux annuel est majoritairement entrant dans la lagune. Cela laisse à penser que le Golo est particulièrement chargé en nitrates.

De manière générale, les flux de nutriments sont plus importants en hiver qu'en été, même pour le scénario de 8 mois sec (Scen.1). Cette observation est moins maquée pour les composés azotés (NT, NOD) la silice (SiOH<sub>4</sub>) et les composés carbonés (CT,COD).

Les résultats sont exposés sur les figures 14 et 15.

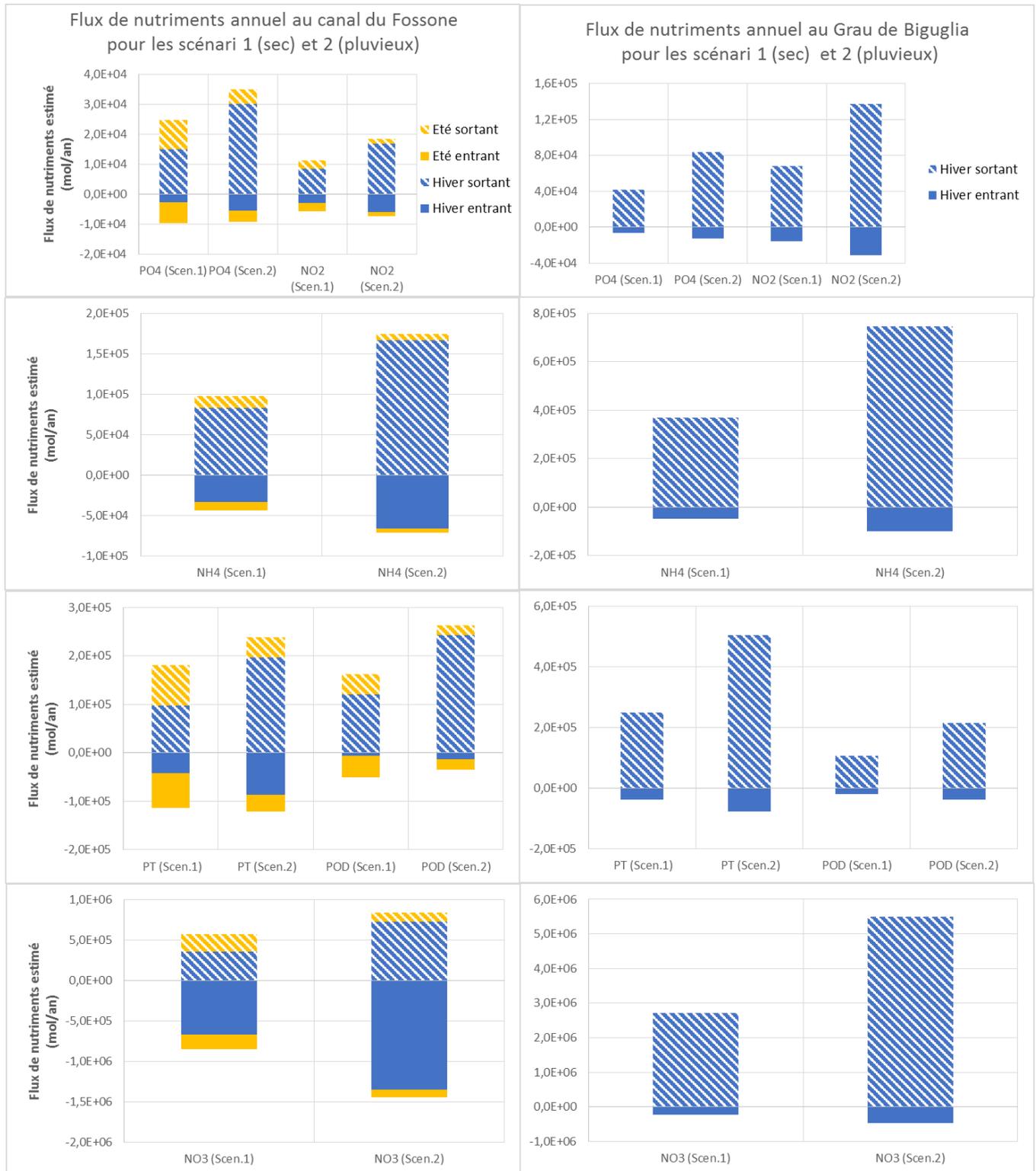


Figure 14: Estimation du flux de nutriments annuel pour les scénarii sec (Scen.1) et pluvieux (Scen.2) au canal du Fossone à gauche et au Grau de Biguglia à droite.

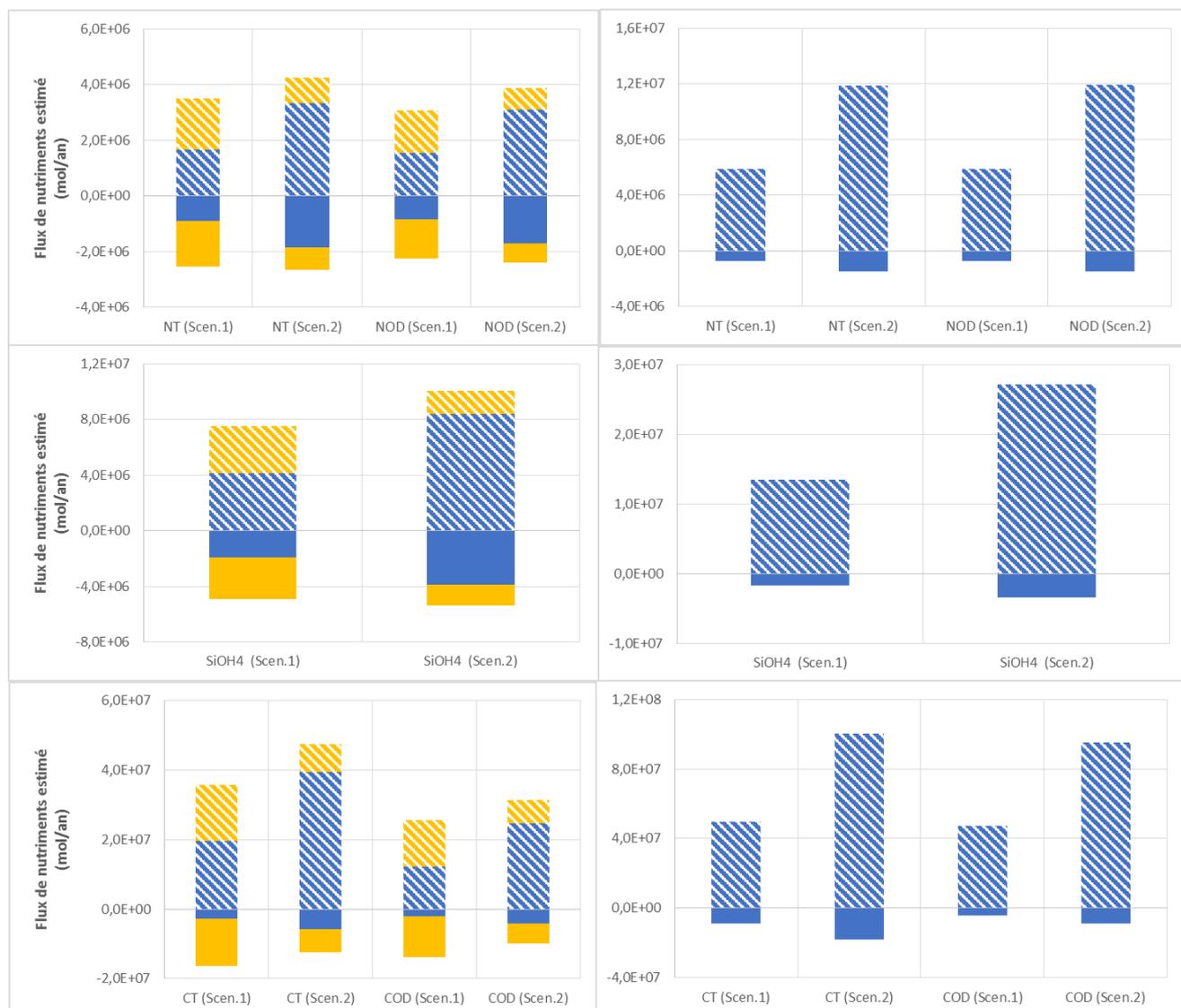


Figure 15: Estimation du flux de nutriments annuel pour les scénarii sec (Scen.1) et pluvieux (Scen.2) au canal du Fossone à gauche et au Grau de Biguglia à droite.

## 2.4. Conclusion

La lagune de Biguglia connaît des contextes hydro-morpho-climatiques interannuels très diversifiés, avec par exemple l'année 2017 comptabilisant 8 mois secs et un grau fermé à Biguglia comparée à l'année 2018 comptabilisant 3 mois secs seulement avec un grau ouvert à Biguglia.

Les sources d'eau douce principales sont le Golo et le Bevinco qui sont tous les deux des fleuves dont le débit peut être multiplié par 100 en période de crue comparé à l'étiage.

Le fonctionnement hydrodynamique (salinité, débit d'eau douce, marée) est presque opposé entre le nord et le sud de la lagune. Ceci s'explique par les apports d'eau du Bevinco directement à l'intérieur de la lagune au nord (grau de Biguglia) et les apports d'eau du Golo par l'extérieur au sud via le canal du Fossone.

Au canal du Fossone, les flux de  $\text{NH}_4$  et  $\text{NO}_3$  sont multipliés respectivement par 13 et 18 en février 2018 comparés à septembre 2017. A l'inverse, les flux de CT, COD et POD sont légèrement plus important en été.

D'après la figure 12, au grau de Biguglia les flux de nutriments sortants vers la mer sont en moyenne 256% et jusqu'à 600% ( $\text{NO}_3$ ) supérieurs au canal du Fossone.

Contrairement au flux de nutriments entrants qui sont seulement de 35% supérieur en moyenne.

Le flux de nitrate est un cas particulier, avec un flux sortant environ 600% supérieur au grau de Biguglia, à l'inverse du flux entrant d'environ 75% supérieur au canal du Fossone.

Cette même constatation est faite pour les flux saisonniers et annuel. Pour le scénario 1 (sec) et pour le scénario 2 (humide), les flux de nutriments journaliers sont majoritairement sortants, particulièrement remarquable au grau de Biguglia. Au canal du Fossone une exception est faite pour les flux de nitrates ( $\text{NO}_3$ ) dont le flux entrant est supérieur au flux sortant, probablement apporté massivement par le Golo.

### 3. Estuaire de Fiume Santu (projet FLUME)



Figure 16: Estuaire de Fiume Santu, Haute Corse

#### 3.1. Description

L'estuaire de Fiume Santu est situé au nord-ouest de la commune de Saint-Florent (Haute-Corse). C'est un micro-estuaire temporaire connecté à la mer méditerranée par le golfe de Saint-Florent. Les effets de la marée y sont faibles mais non négligeables et les apports d'eau douce ne perdurent qu'en saison pluvieuse (automne-hiver).

L'Agriate, zone de maquis méditerranéen surnommée « désert » connaît une densité humaine globale très faible, nous permettant ainsi d'étudier un site quasi exempt de pression anthropique.

L'estuaire est au cœur du *désert de l'Agriate*, protégé et géré depuis 1979 par le Conservatoire du Littoral<sup>2</sup> et la collectivité de Corse (CdC)<sup>3</sup>. Les cartes MNT (Modèle Numérique de Terrain) utilisées

<sup>2</sup>[http://www.conservatoire-du-littoral.fr/siteLittoral/42/28-agriate-2b\\_haute-corse.htm](http://www.conservatoire-du-littoral.fr/siteLittoral/42/28-agriate-2b_haute-corse.htm)

<sup>3</sup><https://www.isula.corsica/>

sont fournies par la de Corse (CdC). La délimitation du bassin versant et du fleuve Santu a été effectuée par Guillaume Chevalier (*comm. Pers*), chercheur à l'Université de Corse.

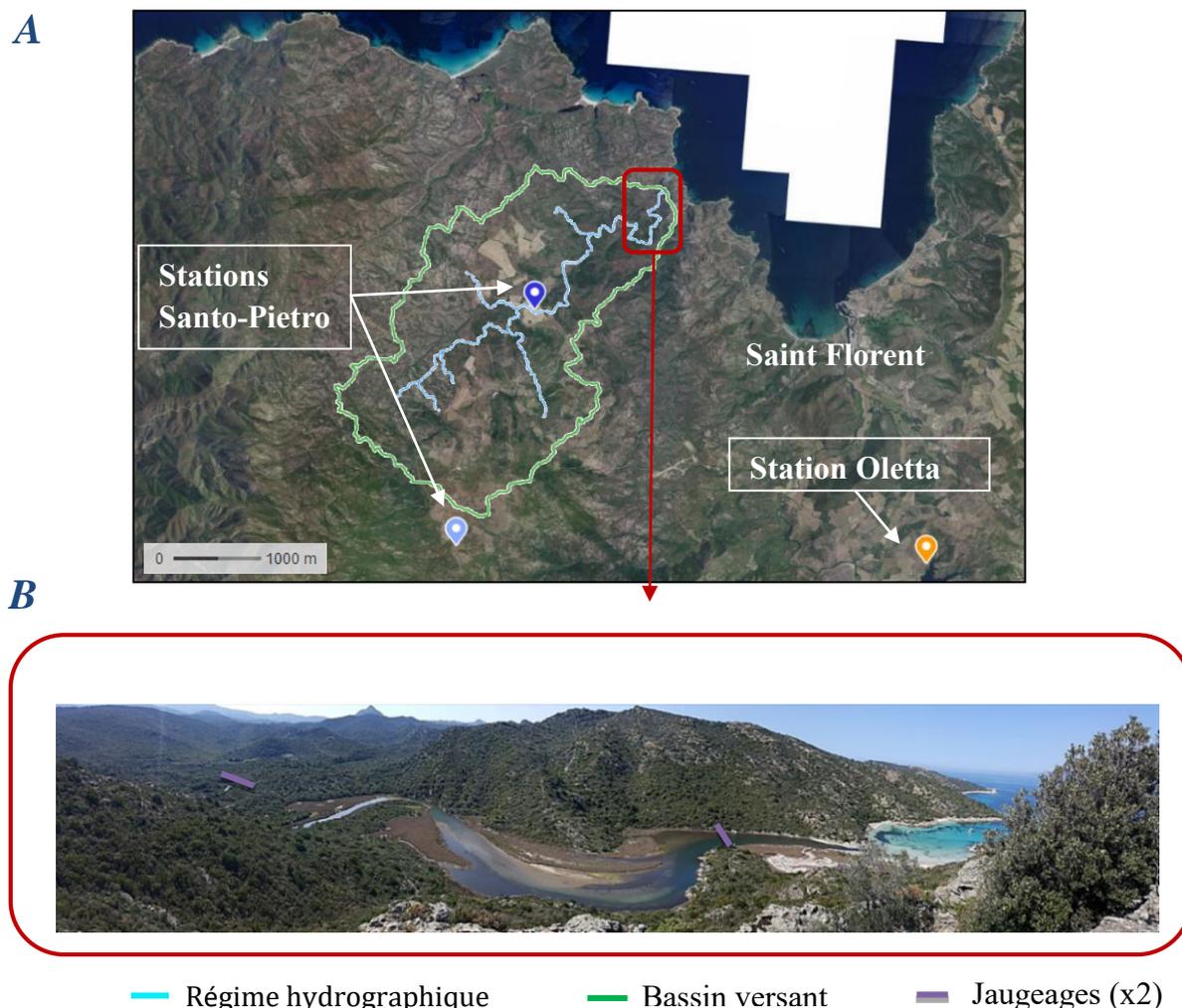


Figure 17 : (A) Cartographie des stations météorologiques, du bassin versant et du régime hydrographique utilisés pour décrire le fonctionnement de l'estuaire de Fiume Santu (Images Géoportail ; Cartographie QGIS). (B) Photographie de l'estuaire de Fiume Santu

## 3.2. Méthodologie

### 3.2.1. Détermination du contexte hydro-morpho-climatique

Le climat méditerranéen est à la transition entre la zone chaude et la zone tempérée et est défini comme “un climat pluvieux et souvent doux en hiver (perturbations d’ouest) et chaud et sec en été (hautes pressions tropicales)” d’après le *dictionnaire du climat* (Daget 1977; Somot 2005).

Les données récoltées sont traitées grâce au logiciel de calcul Matlab via les scripts de Raphaël Colmet-Daâge, inspirés par Christiane Dufresne. L’ensemble de ces données (température, précipitation, salinité, hauteur d’eau et d’ouverture/fermeture de grau) traitées simultanément permettent de caractériser les relations entre les paramètres, révélant ainsi la complexité du système.

### a. Hydro-morphologie

Deux sondes NKE-STPS-10m-SI permettant les mesures haute fréquence de salinité, pression et température de l'eau toutes les 10 min ont été installées à l'estuaire de Fiume Santu et en amont depuis 2017 et donc également pendant toute la durée des 3 campagnes afin de suivre l'évolution des 3 paramètres hydrologiques cités ci-dessus.

L'observation de l'ouverture ou de la fermeture du grau apporte des précisions quant à l'influence de la morphologie de la lagune et de ses affluents.

### b. Climatologie

La station météorologique de Santo-Pietro-Di-Tenda permet d'obtenir les données de température et de cumul de précipitation proche de l'estuaire de Fiume Santu.

Tableau 6: Caractéristiques des stations météorologique de Santo-Pietro-Di-Tenda et Oletta

		Santo-Pietro (n°20314005)	Oletta (20185003)
Caractéristiques des stations météorologiques	Coordonnées	42°40'48" N 9°13'12" E	42°37'54" N 9°19'12" E
	Altitude (m)	128	75
	Dates de fonctionnement	Début : 06/06/2013 Fin : 08/02/2018	Début : 18/01/2006 En cours
	Données récoltées	Précipitation et température	Précipitation et température
	Fréquence	Journalière et horaire	Journalière et horaire
	Distance à l'estuaire (km)	3,9	9,8
	A l'intérieur du bassin versant de Fiume Santu ?	OUI	NON

Certains indices climatiques ont également été calculés.

- La variante de l'indice de Gausсен, permet la détermination des mois secs, vérifiant l'équation

$$\frac{P(i)}{T(i)} < 3$$

Avec

*P* le cumul de précipitations mensuel en mm/mois

*T* la moyenne de température mensuelle en °C.

L'indice de Gausсен est représenté par un diagramme ombrothermique, réalisé grâce à la superposition des moyennes de température et les cumuls de précipitations mensuels sur un même graphique avec une échelle des ordonnées précise, vérifiant  $\frac{P}{T} = 3$ .

- L'indice d'humectation IK, permet de calculer l'état d'humectation du sol à chaque averse d'après Chevalier (1983) selon l'équation

$$IK^n = (IK^{n-1} + P^{n-1}) * e^{-\alpha \cdot \theta}$$

Avec

*IK<sup>n</sup>*, l'indice d'humectation du sol à l'averse (*n*)

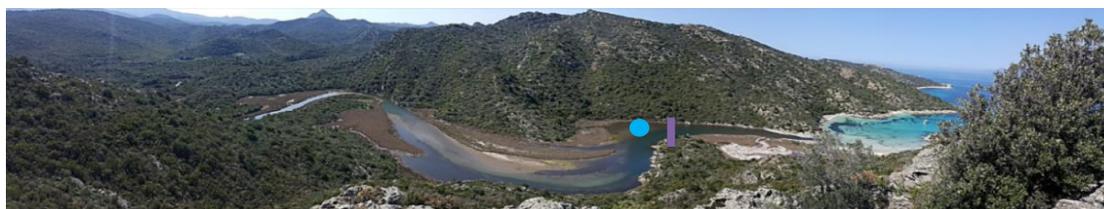
*P<sup>n</sup>*, le cumul de pluie de l'averse (*n*)

$\alpha$ , le coefficient de calage compris entre [0 ; 2] et le plus souvent égal à 0.5  
 $\theta$ , temps séparant la fin de l'averse (n-1) et le début de l'averse (n) en heure

### 3.2.2. Les 3 campagnes de mesure et de prélèvement d'eau

3 campagnes de mesure et de prélèvement d'eau présentant des conditions météorologiques contrastées ont été réalisées afin d'identifier les concentrations en nutriments et les débits d'eau dans l'estuaire de Fiume Santu.

- La *Campagne hiver 2017* du 27 au 30 mars 2017.
- La *Campagne été 2017* du 18 au 22 septembre 2017.
- La *Campagne hiver 2018* du 19 au 22 février 2018.



— Jaugeage      ● Point de prélèvement

Figure 18: Localisation de la ligne de mesure du jaugeage et de la position du prélèvement d'eau au niveau de l'estuaire de Fiume Santu et en amont pour les 3 campagnes de prélèvement.

Les opérations de mesure et de prélèvement d'eau sont répertoriées dans le tableau ci-dessous (tableau 7).

Tableau 7: Date, lieu et plage horaire des mesures de courant et de prélèvement d'eau à l'estuaire de Fiume Santu

Campagne	Localisation	Date	Plage Horaire (TU)
<b>Hiver 2017</b>	Estuaire de Fiume Santu	28/03/2017	7h00-16h00
		29/04/2017	6h15 – 15h20
		30/03/2017	06h00 – 13h35
<b>Été 2017</b>	Estuaire de Fiume Santu	19/09/2017	06h55 – 14h15
		21/09/2017	08h50 – 16h10
<b>Hiver 2018</b>	Estuaire de Fiume Santu	20/02/2018	09h45 – 17h05
		21/02/2018	09h48 – 17h25

### 3.2.3. Réalisation des jaugeages à l'estuaire

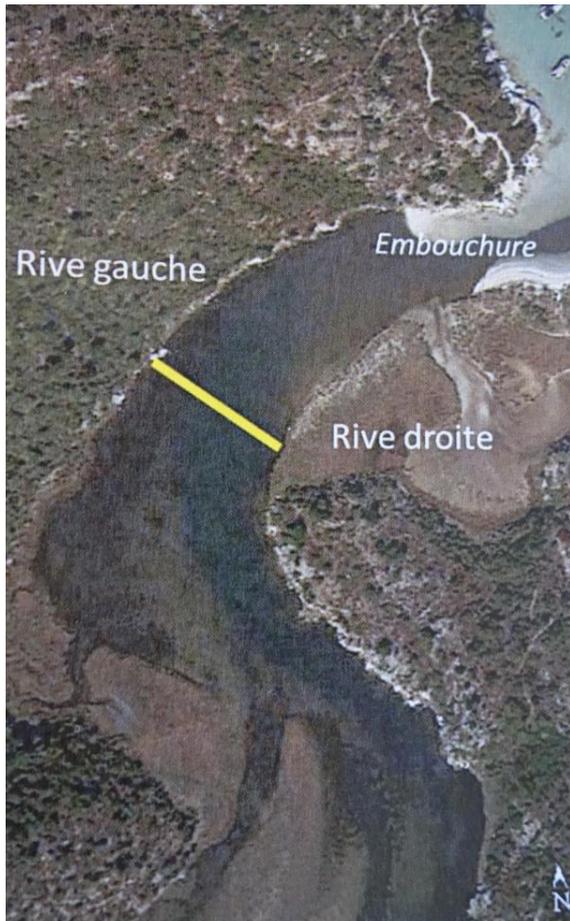
#### a. Appareil de mesure

Des mesures des courants de marée et des débits entrants et sortants au niveau du grau de l'estuaire de Fiume Santu ont été réalisées à l'aide d'un profileur de courant à effet Doppler de type RiverPro RDI, évoluant sur un flotteur de type Riverboat tracté depuis des berges à l'aide de poulies (figure 20).

Les mesures couvrent un cycle de marée complet et sont réalisées toutes les heures environ.

La résolution des mesures de vitesse est de l'ordre de 0,1 cm/s et la précision est de l'ordre de 0,3% (informations constructeur). La gamme de mesures de vitesse est typiquement de  $\pm 5$  m/s.

*b. Localisation du transect*



### 3.2.4. Prélèvement d'eau et analyse des concentrations en nutriments

Les prélèvements d'eau ont été effectués aux mêmes plages horaires et au même lieu que les jaugeages

- Dans des flacons plastiques de 100 ml pour l'analyse de l'azote inorganique dissout (NID), du phosphate ( $\text{PO}_4^{2-}$ ) et de la Silice ( $\text{SiOH}_4$ ) après filtration sur filtre GF/F 0.7 $\mu\text{m}$  effectuée sur site.
- Dans des flacons en verre de 20 ml pour l'analyse sur site des teneurs en azote total (NT), phosphore total (PT) et carbone organique total (COT) après filtration sur filtre nylon 20  $\mu\text{m}$  effectuée sur site.
- Dans des flacons en verre de 20 ml pour l'analyse de l'azote organique dissout (NOD), le phosphore organique dissout (POD) et le carbone organique dissout (COD) après filtration sur filtre GF/F 0.7  $\mu\text{m}$  effectuée sur site.

### 3.2.5. Calcul des flux de nutriments

#### a. Flux horaire

L'analyse des concentrations en nutriments et autres paramètres organiques et inorganiques présents dans l'eau du fleuve combiné aux mesures de débit au niveau du grau de l'estuaire de Fiume Santu, permet de calculer le flux de nutriment dans notre rivière comme suit :

$$\text{Flux (mol/s)} = \text{Débit (l/s)} * \text{Concentration } (\mu\text{M} = \mu\text{ mol/L}) * 10^{-6} = Q * [X] * 10^{-6}$$

#### b. Flux saisonnier et annuel : Méthode de la moyenne

Moyenne des flux de nutriments horaires sortants ou entrants disponibles puis extrapolation à une journée moyenne classique de 2 cycles de marée de 12h chacun.

$$\text{Flux journalier entrant} = \text{moyenne (flux entrants horaires)} * 12h = \text{mol/j}$$

L'année est découpée en deux saisons : Une saison pluvieuse et une saison sèche selon la définition de Gaussen (voir partie 2.2.1 b).

Le flux de nutriments saisonnier est calculé sur la durée de la saison pluvieuse et sèche en considérant un flux de nutriment journalier constant pour chacune des saisons. Par exemple :

$$\text{Flux d'hiver entrant} = \text{flux entrants hiver} * d = \text{mol/d.jours}$$

En conclusion, le flux annuel correspond à la somme des flux saisonniers :

$$\underline{\text{Flux annuel entrant} = \text{flux d'hiver entrant} + \text{flux d'été entrant} = \text{mol/an}}$$

### 3.3. Résultats

#### 3.3.1. Contexte hydro-climatique [2000-2018]

La détermination des saisons a été effectuée en fonction de l'indice de Gausson moyen obtenu sur l'ensemble des données disponibles, obtenant ainsi une année découpée en 3 saisons seulement, avec: **La saison sèche**, correspond aux mois vérifiant  $P < 3 * T$  (variante de l'indice de Gausson). **La saison pluvieuse d'hiver**, correspondant aux mois pluvieux précédents la saison sèche. **La saison pluvieuse d'automne**, correspondant aux mois pluvieux suivant la saison sèche

Le climat de l'estuaire de Fiume Santu est de type méditerranéen, avec en moyenne 5,8 +/- 1,5 mois secs et un cumul de précipitation annuel moyen de 775mm. L'automne cumule 42% des précipitations annuelle, la saison sèche correspondant aux 3 mois d'été, s'étend très régulièrement aux mois de mai et septembre voir d'avril (figure 20).

L'année 2017 est très sèche ; avec 8 mois secs consécutifs de mars à octobre compris et 764mm de précipitation annuelle.

L'année 2018 est très humide ; avec 88mm de précipitation pour les 4 mois de sécheresse estivaux, et jusqu'à 863mm à l'année (figure 20).

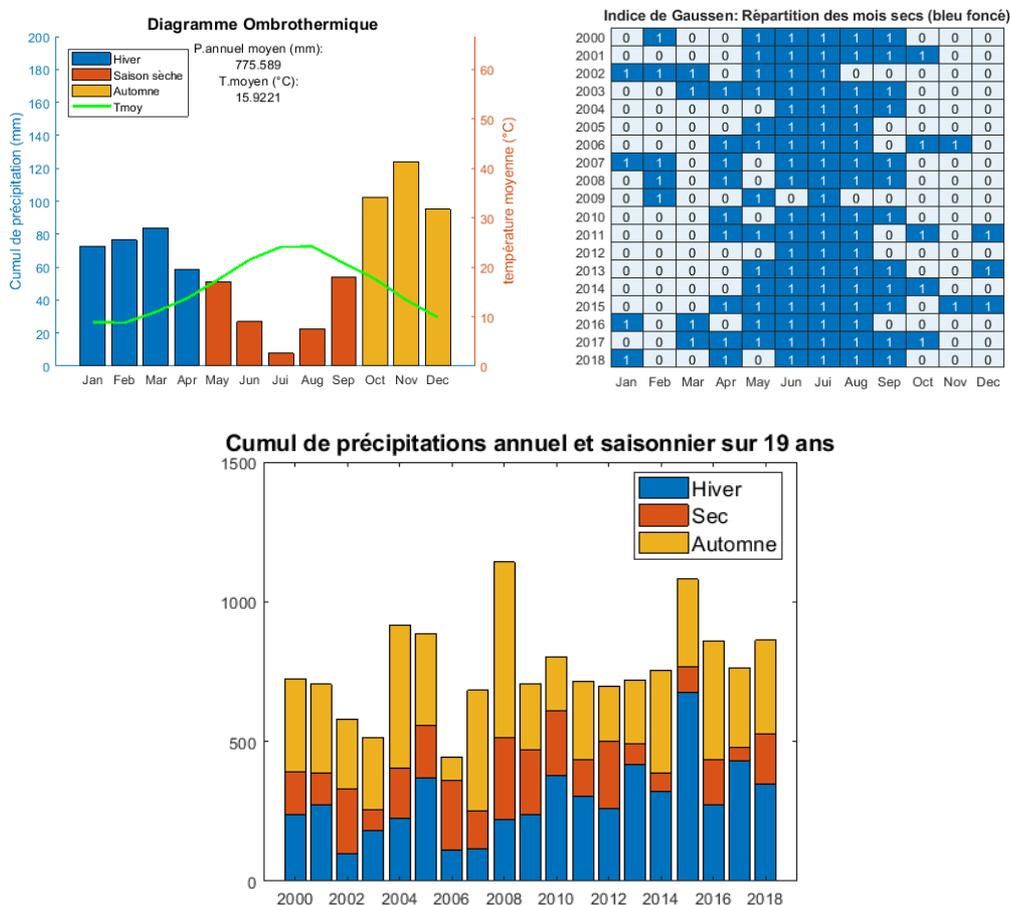
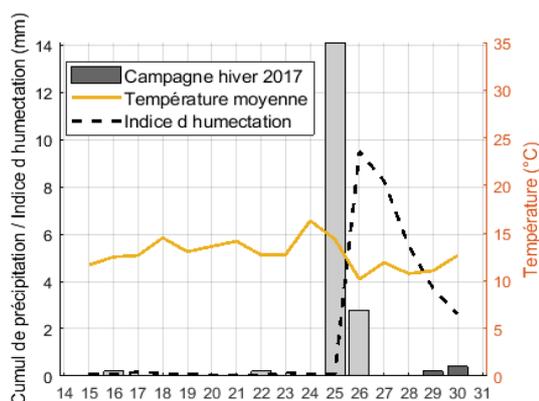
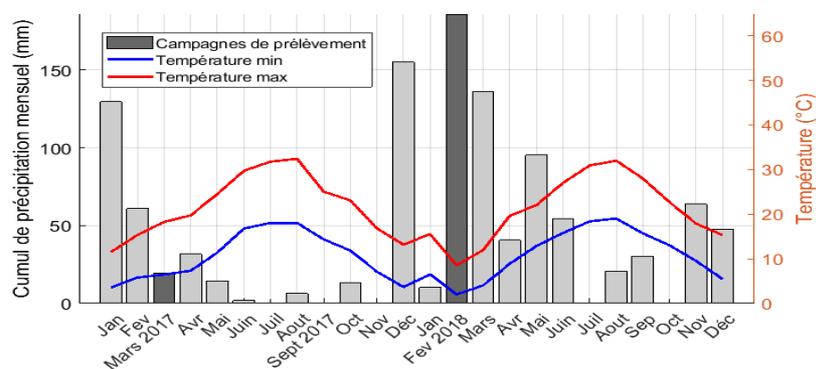


Figure 19: A droite le diagramme ombrothermique moyen à Oletta sur l'échantillon [2000-2018]. A gauche la répartition des mois secs à Oletta selon la définition de Gausson. En bas, cumul de précipitation annuel et saisonnier de 2000 à 2018

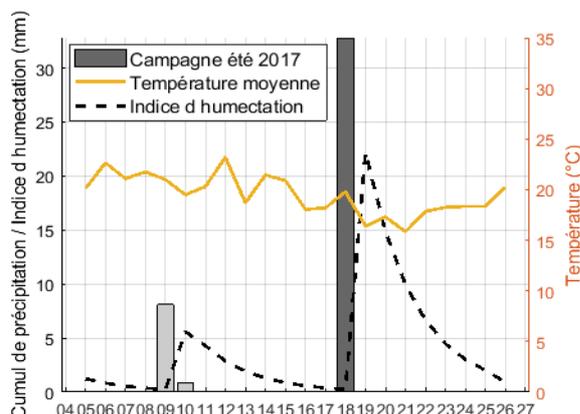
La campagne de mars 2017 marque le début d'une période de sécheresse précoce. La température est de 11 à 13°C ; l'indice IK d'humectation du sol est faible mais non nul (de 1 à 12mm) suite à l'évènement pluvieux cumulant 16mm les 25-26/03/2017

La campagne de septembre 2017 fait suite à la longue période de sécheresse. La température est de 16 à 20°C ; l'indice IK d'humectation du sol est moyen (de 20 à 1mm) suite l'évènement pluvieux cumulant 32,8mm le 18/09/2017

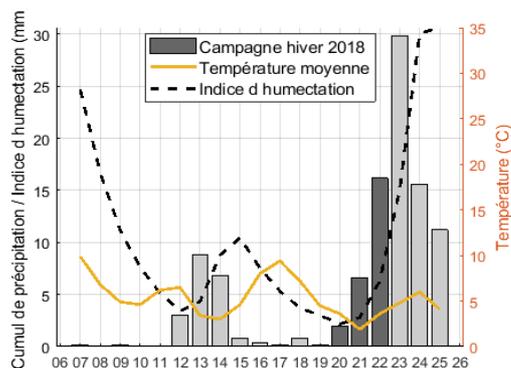
La campagne de février 2018 est au cœur d'un hiver pluvieux. La température est de 3 à 5°C ; l'indice IK d'humectation du sol est fort (de 3 à 30mm) et fait suite à un évènement pluvieux important les 20-21-22-23/02/2018 cumulant 60mm.



Campagne du 27 au 30 mars



Campagne du 18 au 22 septembre

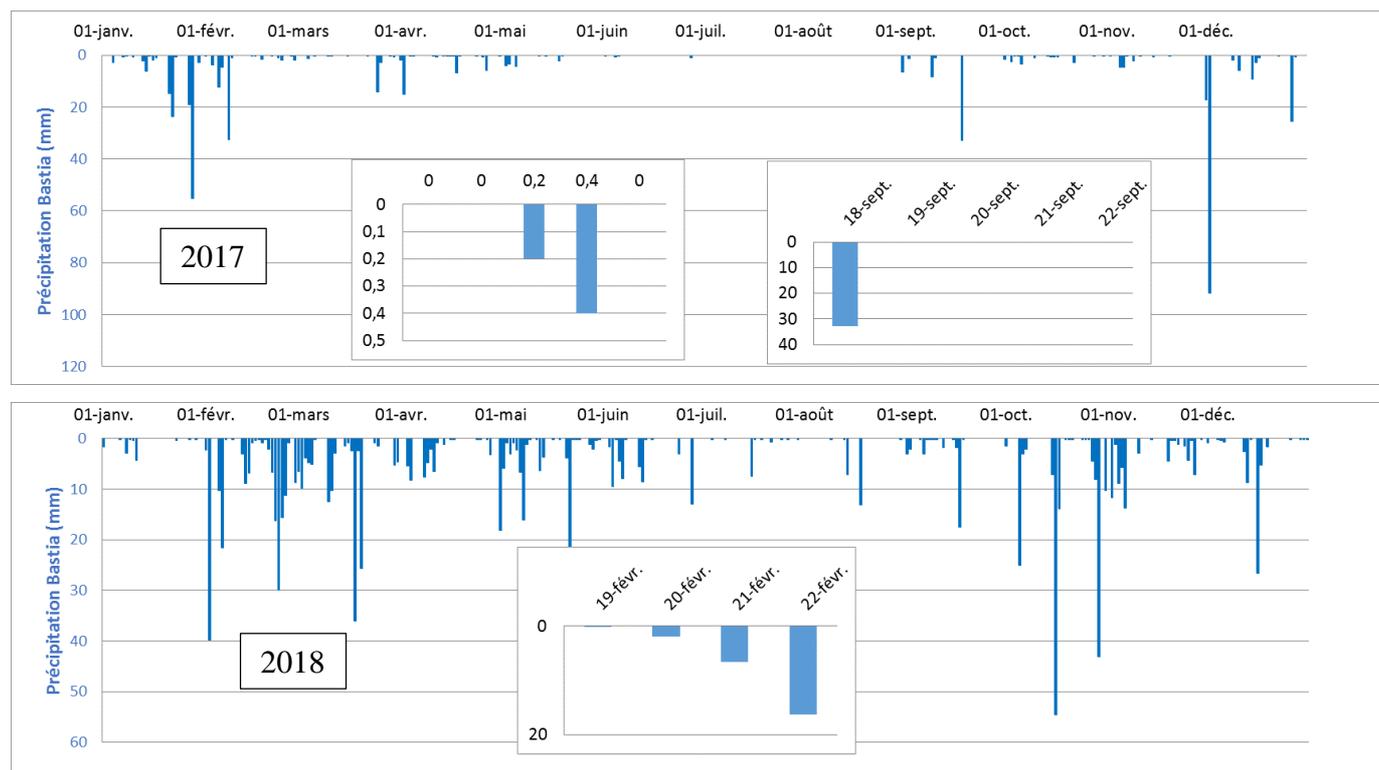


Campagne du 19 au 22 février

Figure 20: Cumul de précipitation mensuel et moyenne mensuelle des températures extrémales depuis janvier 2017 à décembre 2018 à la station de Santo-Pietro-Di-Tenda, avec en gris foncés les 3 campagnes de prélèvement. Un zoom est fait sur les 3 campagnes avec les cumuls de précipitation, la température moyenne et l'indice d'humectation IK journaliers, avec en gris foncés les jours de prélèvement des 3 campagnes.

### 3.3.2. Contexte hydrodynamique et physico-chimique

#### a. Précipitations



L'année 2018 fût particulièrement pluvieuse, à l'inverse de l'année 2017 qui comptabilisa 9 mois de sécheresse de mars à novembre.

#### b. Contexte hydrodynamique

6 mesures de débit ont pu être effectuées en amont de l'estuaire afin de mesurer un débit d'eau douce sans influence de la marée. Le débit est faible, allant de 7 à 77 L/s atteint en avril 2018. Les résultats sont présentés figure 22

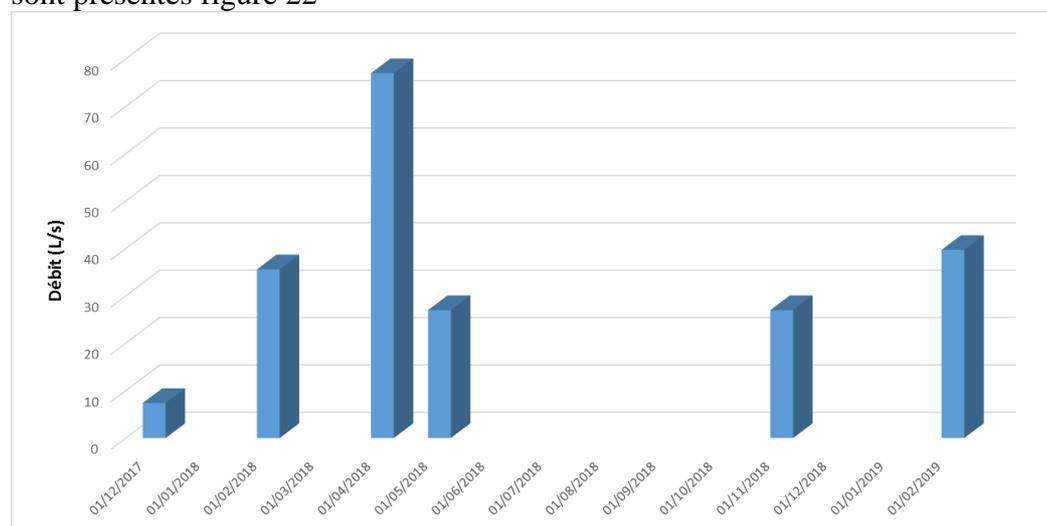
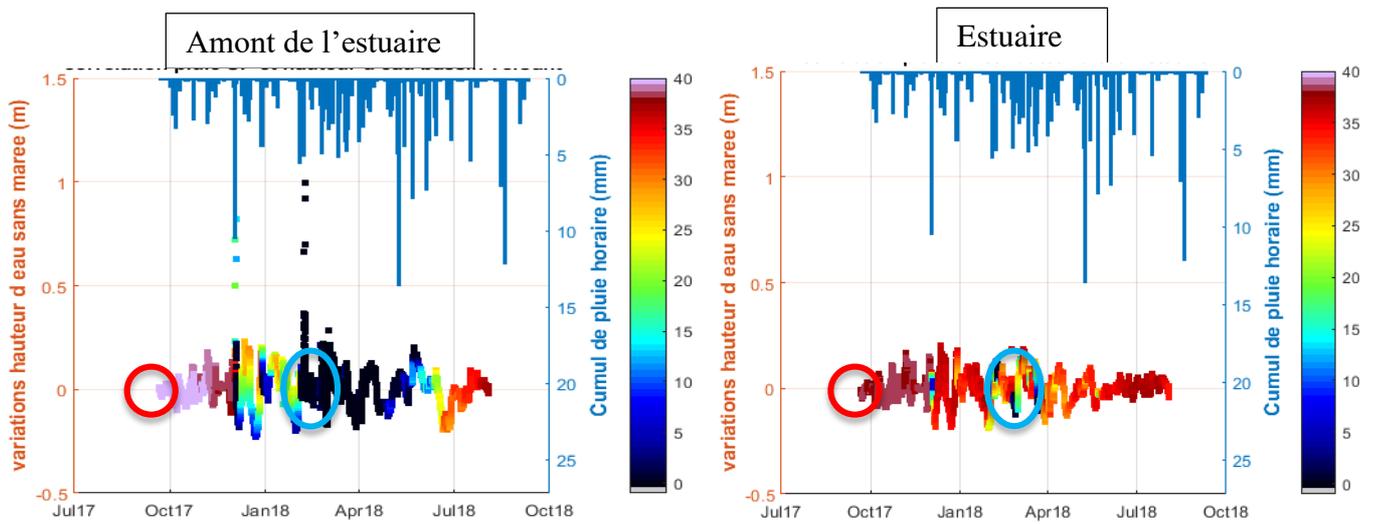


Figure 21: Débits d'eau douce mesurés en amont de l'estuaire de Fiume Santu, sans influence de la marée.

A défaut de n'avoir que 6 mesures de débit, la mesure des hauteurs d'eau, de la salinité et de la température est effective à l'amont de l'estuaire comme à l'estuaire depuis octobre 2016.



○ Campagne septembre 2017    ○ Campagne février 2018

Figure 22: Variations des hauteurs d'eau retranscrite de la marée à l'amont de l'estuaire (gauche) et à l'estuaire (droite)

On remarque que la hauteur d'eau en amont de l'estuaire est plus réactive aux évènements pluvieux, avec notamment 2 épisodes de crue du 02/12/2017 et 07/02/2018 pour des cumuls de précipitation très différents, respectivement 108mm et 32mm, pour un temps de montée égal de 26h.

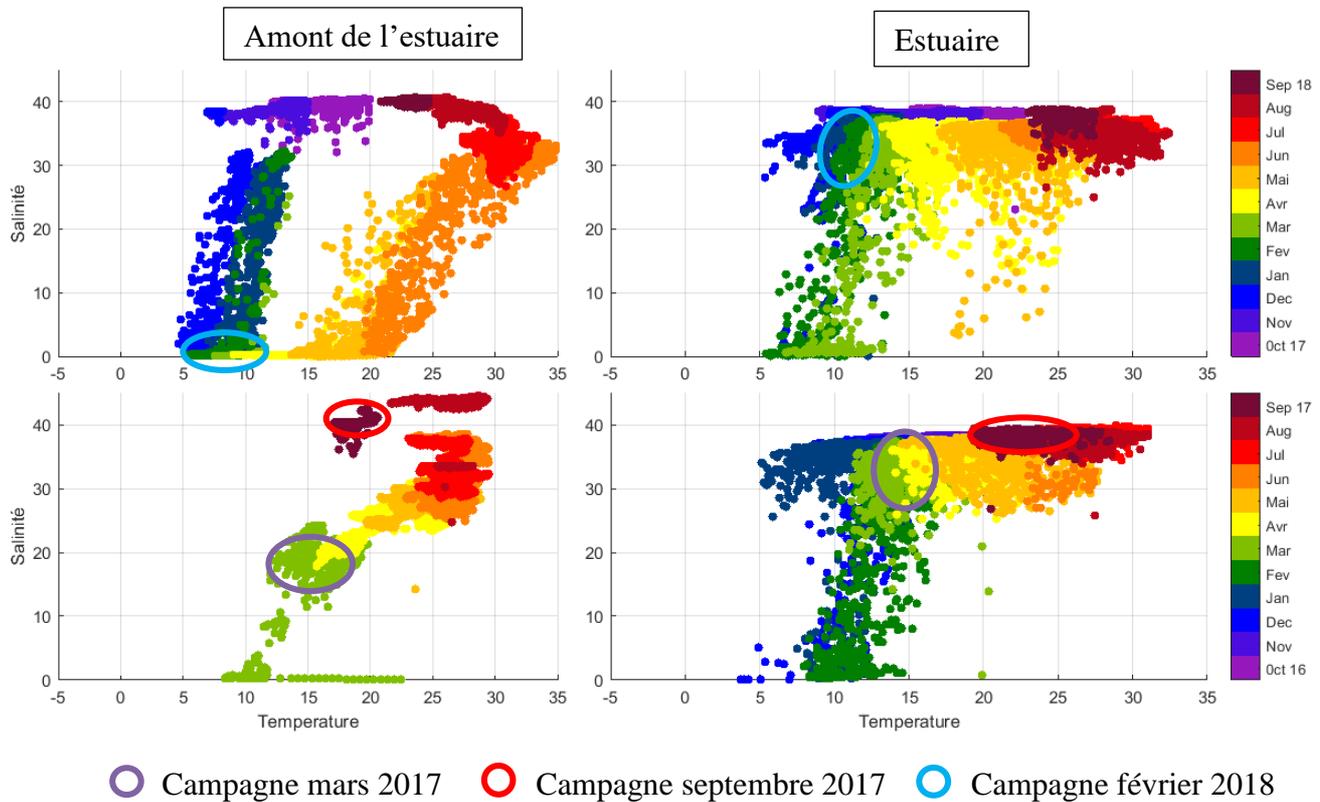


Figure 23: Tracé de la salinité en fonction de la température sur deux années hydrologiques complètes, soit d'octobre 2016 à septembre 2018 à l'amont de l'estuaire (gauche) et à l'estuaire (droite).

Au cours de la première année d'étude 2016-2017 (figure 24), l'augmentation de la salinité au bassin-versant est effective dès mars 2017, et ce continuellement sans dessalures jusqu'en novembre 2017. A l'estuaire la salinité est proche de celle de la mer presque toute l'année, sauf sur la période décembre 2016, janvier et février 2017 où l'on enregistre des dessalures fréquentes. La période salée de la seconde année hydrologique 2017-2018 est plus tardive, avec la salinité au bassin-versant des mois d'avril, mai et juin 2018 qui oscille entre 0 et 35 g/L pour des températures entre 10 et 35°C contre 15 à 30°C sur la période avril, mai, juin 2017. A l'estuaire, on remarque des dessalures fréquentes de janvier à mai 2018 provoqué par des apports d'eau douce fréquents.

### 3.3.3. Les 3 campagnes de prélèvement à l'estuaire

#### a. Débit, salinité et température

Les 3 campagnes de prélèvement ont permis de mesurer le débit, la salinité et la température sur des demi-cycles de marée descendante. Au total, 6 journées de mesures sont exploitées (figure 25) dont 3 en mars 2017, 2 en septembre 2017 et 1 en février 2018.

Les résultats de débit de la campagne de février 2018 sont largement sous-estimés dû au fort vent orienté dans l'axe de l'estuaire diminuant l'écoulement de surface vers la baie. Au vu des faibles températures mesurées (environ 14°C), le débit d'eau douce s'ajoute probablement au débit de marée visible sur les 2 autres campagnes.

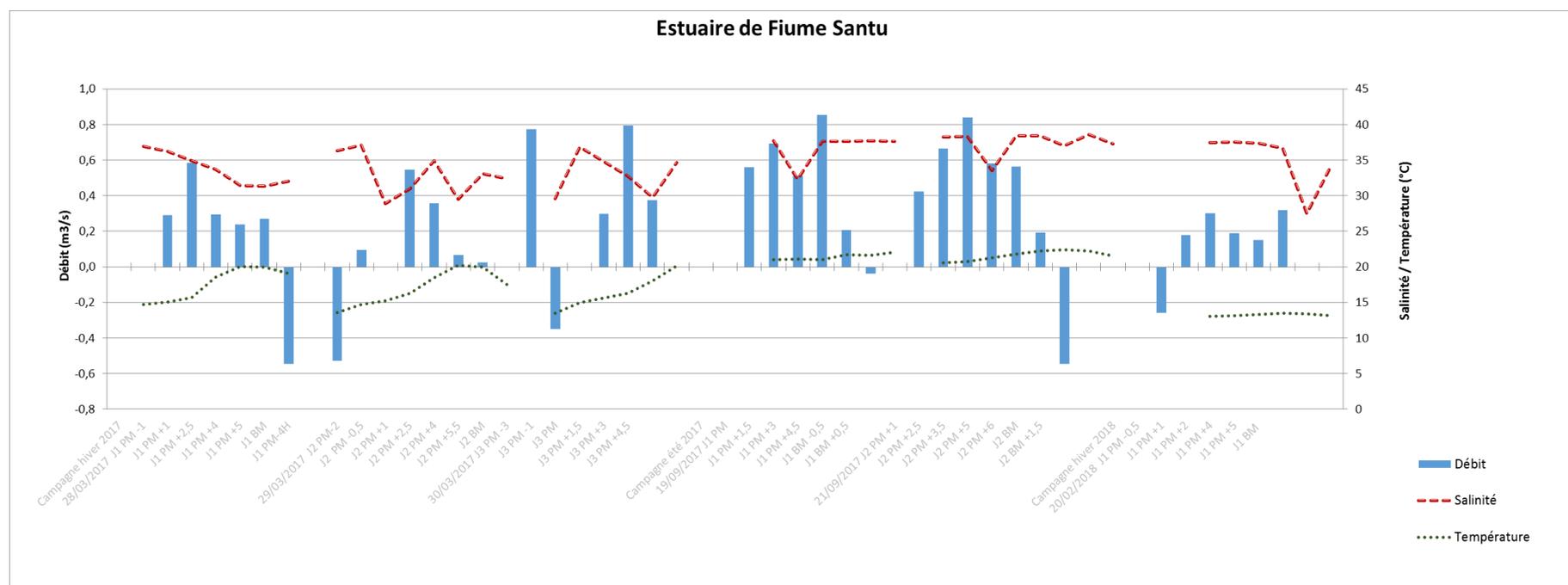


Figure 24: Débits, salinité et température mesurés à l'estuaire de Fiume Santu pendant un cycle de marée descendante pour les 3 campagnes de prélèvement de mars 2017, septembre 2017 et février 2018.

## b. Concentration en nutriments

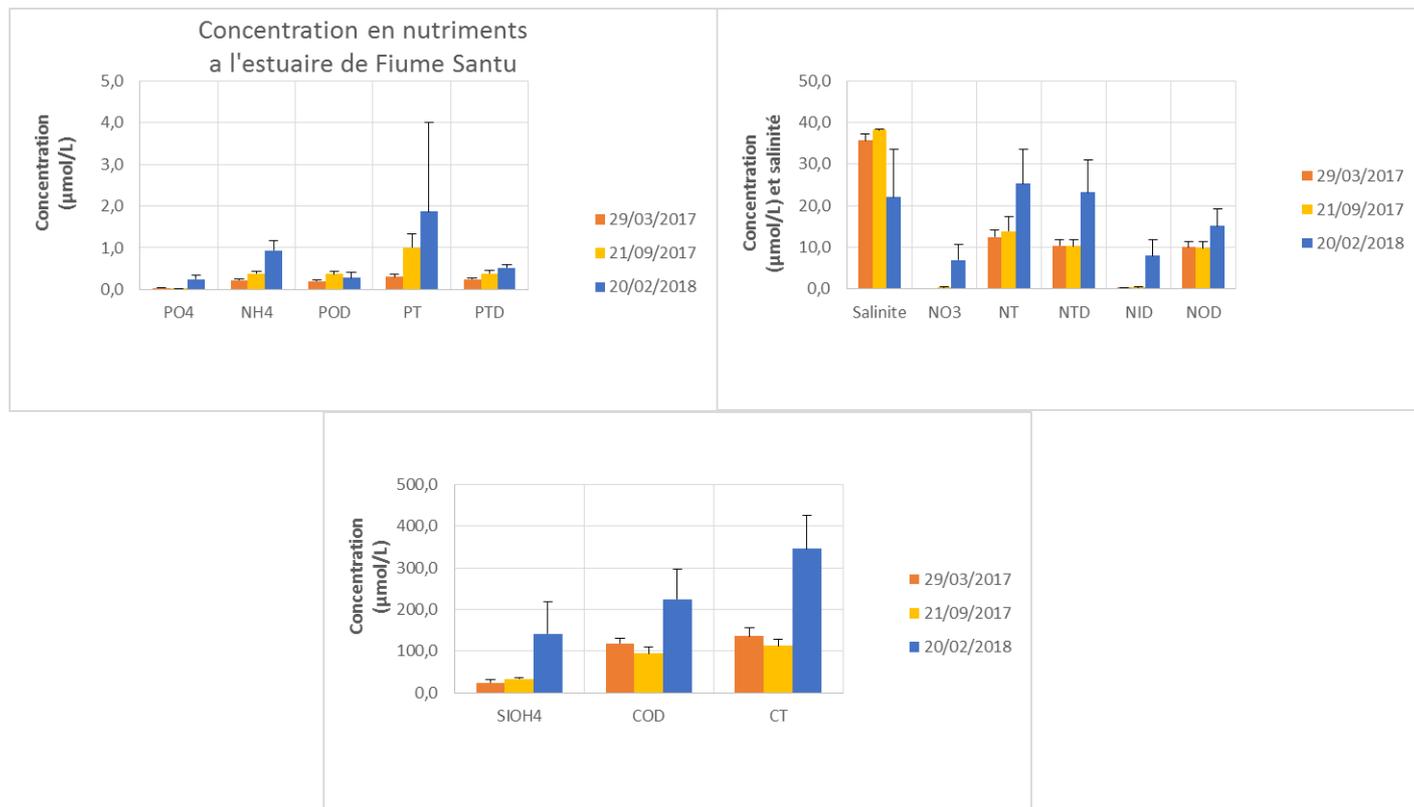


Figure 25: Concentration en nutriments à l'estuaire de Fiume Santu lors des 3 campagnes de prélèvement d'hiver 2017, été 2017 et hiver 2018. Les barres correspondent à l'écart type des différents prélèvements journaliers pour chaque élément.

Les nutriments sont en majorité plus concentrés en février 2018, suite aux fortes pluies de l'hiver 2018, et l'écart type est beaucoup plus important qu'aux autres campagnes.

### 3.3.4. Contexte global des campagnes de prélèvement

Résumé de tous les paramètres énoncés précédemment

- La *Campagne hiver 2017* du 27 au 30 mars 2017.
- La *Campagne été 2017* du 18 au 22 septembre 2017.
- La *Campagne hiver 2018* du 19 au 22 février 2018.

Tableau 8: Contexte hydro-morpho-climatique des 3 campagnes de mesure et de prélèvement à l'estuaire de Fiume Santu

	Campagne hiver 2017	Campagne été 2017	Campagne hiver 2018
Cumul de pluie sur 15 jours précédents (mm)	18	42 (32mm le 18/09)	46
Salinité en amont de l'estuaire sur 15 jours précédents (mm)	20	41	0
Débit d'eau douce du Santu estimé (L/s)	n.d	7	40

Dép

Laboratoire Environnement Ressource Provence Azur Corse

Auteurs : Colmet-Daâge Raphaël • Malet Nathalie

Date : avril 2019

ODE/UL/LER-PAC/19-03

<b>Cumul de pluie pendant campagne (mm)</b>	0,6			32,8		25
<b>Site</b>	Estuaire de Fiume Santu			Estuaire de Fiume Santu		Estuaire de Fiume Santu
<b>Salinité (min - max)</b>	28 - 37			32 - 39		27 - 37
<b>Température (min - max)</b>	14 - 20			21 - 22,5		13 - 13,5
<b>Ouverture/fermeture des Grau</b>	Ouvert			Ouvert		Ouvert
<b>Jour de prélèvement</b>	28/3	29/3	30/3	19/9	21/9	20/2
<b>Débit max journaliers (m3/s)</b>	<b>Sortant</b>					
	0,58	0,55	0,79	0,85	0,84	0,3
<b>Remarques</b>	Période de pré-étiage précoce			Pluie importante en début de campagne humidifie anormalement le site		Vent orienté Nord-Ouest entrant dans l'estuaire sous-estime les mesures de débit

### 3.3.5. Flux de nutriments

Le flux de nutriments a été calculé pour l'ensemble des nutriments inorganiques (NO<sub>2</sub>, NO<sub>3</sub>, NH<sub>4</sub>, PO<sub>4</sub>) de la silice (SiOH<sub>4</sub>) et des nutriments organiques et totaux (NOD, NT, POD, PT, COD, CT).

Les flux ont été calculés uniquement les flux sortants (positifs).

L'ensemble de la méthodologie est expliquée en partie 3.2.5.

- Le calcul des flux horaires instantanés dépend des mesures de débit à l'estuaire grau de Biguglia et au canal du Fossone ainsi que les analyses de concentrations en nutriments prélevées aux mêmes instants (voir partie 3.2.5.a)
- Le calcul des flux de nutriments journaliers est effectué selon la méthode de la moyenne (voir partie 3.2.5.b):
- Le calcul des flux de nutriments annuels est effectué par la méthode de la moyenne, extrapolée aux saisons puis à l'année (voir partie 2.2.5.c)

Le flux de nutriment sortant au Fossone le 26/02/2018 et au grau de Biguglia le 27/02/2018 a été estimé théoriquement car seulement 3 mesures de débit ont été effectuées sans pouvoir apercevoir le début ni la fin du cycle de jusant étudié. Afin de pouvoir obtenir une mesure journalière, la moyenne des mesures a été calculée et ramenée à la journée en faisant l'hypothèse d'un cycle de marée classique de 12h.

#### a. Flux de nutriments horaires

On remarque que le NH<sub>4</sub> est présent en été 2017 comme en hiver 2018, soit le produit de la reminéralisation bactérienne estivale au sein de l'estuaire et en hiver le fruit du ruissellement de la pluie. Le NO<sub>3</sub> est 10 fois plus important en hiver 2018 qu'en 2017, probablement dû à l'important lessivage des sols suite aux fortes pluies précédents la campagne.



Figure 26: Ensemble des nutriments et débit mesuré à l'estuaire de Fiume Santu pour les campagnes d'hiver 2017, été 2017 et hiver 2018.

### b. Flux de nutriments journalier

Il est remarquable que les flux journaliers estivaux soient majoritairement supérieurs aux flux journaliers d'hiver 2018, qui fût particulièrement pluvieux.

Ce résultat étonnant est largement exagéré pour deux raisons :

- La pluie de 32,8mm le 18/09/2017 marqua un important apport d'eau douce et de nutriments juste avant les mesures
- Un fort vent orienté dans l'axe de l'estuaire (Nord-Ouest) a induit des valeurs de débits largement inférieures à celles attendues, au moins égale au flux de marée des campagnes précédentes. Ainsi le flux d'hiver pourrait être multiplié au moins par 3 (voir figure 25)

Le flux de nitrate en février 2018 reste tout de même largement supérieur à l'année 2017 malgré les faibles valeurs de débit mesurées.

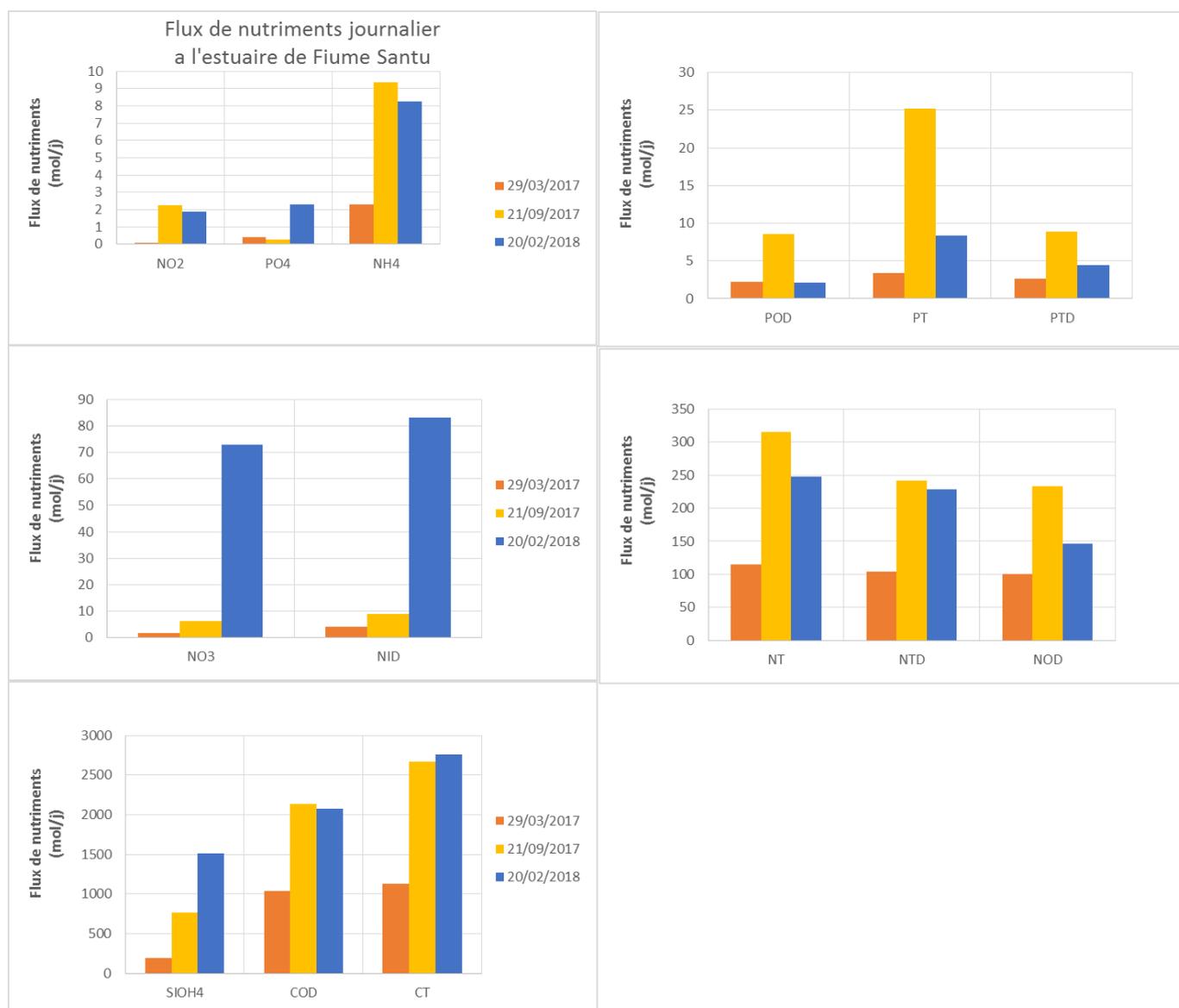


Figure 27: Estimation des flux de nutriments journaliers à l'estuaire de Fiume Santu pour les 3 campagnes d'hiver 2017, été 2017 et hiver 2018.

### c. Flux de nutriments annuel

Pour la suite, nous avons estimé les flux de nutriments annuels et saisonniers par la méthode de la moyenne, en distinguant 3 saisons :

- La saison des pluies correspondant à la campagne d'hiver 2018
- La saison sèche correspondant à la campagne d'été 2017.
- La saison de pré-étiage correspondant à la campagne d'hiver 2017

De part ces 3 saisons définies, nous avons calculés les flux de nutriments annuels et saisonniers pour 2 scénarii différents :

- Une année sèche avec 3 mois pluvieux, 6 mois secs et 3 mois de pré-étiage (scénario 1)
- Une année pluvieuse avec 6 mois pluvieux, 4 mois secs et 2 mois de pré-étiage (scénario 2)



Figure 28: Flux de nutriments saisonniers estimés selon un scénario d'année sèche (Scen.1) et un scénario d'année pluvieuse (Scen.2).

Pour les deux scénarios d'année sèche et pluvieuse, le flux majoritaire est en période pluvieuse sauf pour le PT.

La différence de flux entre le scénario 1 et 2 est marquée pour le NO<sub>3</sub>.

### 3.4. Conclusion

- Contexte hydroclimatique interannuel à l'estuaire de Fiume Santu est très marqué, avec par exemple une année 2017 cumulant 8 mois secs consécutifs contre une année 2018 humide cumulant seulement 4 mois secs avec un été relativement pluvieux.
- Le fleuve Santu est la seule source d'eau douce. C'est un fleuve temporaire dont les débits mesurés oscillent entre 7 et 77L/s. A l'estuaire, c'est la marée qui contrôle les échanges d'eau, avec un débit d'environ 800 L/s au maximum.
- L'amont de l'estuaire est plus réactif que l'aval aux événements pluvieux tant par les variations de hauteur d'eau que la salinité et la température.
- Les 3 campagnes de prélèvement sont représentatives de 3 contextes hydro-climatiques différents. En mars 2017, ce fût une période de pré-étiage précoce. En septembre 2017, en plein cœur de la saison sèche de 8 mois consécutifs, une pluie de 32mm le premier jour des campagnes surestime les mesures de débit et de concentration. En février 2018, pendant la saison pluvieuse, le vent orienté Nord-Ouest fût obstacle au courant de marée sortant sous-estimant ainsi les mesures de débit.
- Les flux de nutriments journaliers sortants ont été calculés. On y perçoit une équivalence entre les flux d'été 2017 et d'hiver 2018, excepté pour le NO<sub>3</sub> présent en très grande quantité en hiver 2018 malgré le faible débit mesuré. Ce résultat est biaisé par des conditions climatiques particulières citées précédemment.
- L'estimation des flux de nutriments saisonniers et annuel sortants selon les 2 scénarios représentant une année sèche (scen.1) et pluvieuse (scen.2) montrent l'importance de la saison des pluies dans le flux annuel de nutriments pour les deux scénarios confondus. A l'exception des phosphores (PT, POD, PTD) et des azotes (NT, NOD, NTD) qui, pour le scénario d'année sèche, sont apportés en quantités égales en période sèche et en période pluvieuse.