

Département Océanographie et Dynamique des Ecosystèmes Côtiers
Laboratoire Environnement Ressources Provence Azur Corse

Jean Laurent MASSEY

Août 2015 - RST.ODE/LER-PAC-CO/15-07



Université de Corse - Faculté des Sciences et Techniques
Master Gestion Intégrée du Littoral et des Ecosystèmes

Origine et devenir de la matière organique au sein du micro-estuaire temporaire de Fiume Santu (L'Agriate, Haute-Corse)



Mémoire soutenu le 3 juillet 2015 à l'Université de Corse



Numéro d'identification du rapport : aout 2015 – RST.ODE/LER-PAC-CO/15-07		Date de publication : 26/08/2015
Diffusion : libre : <input checked="" type="checkbox"/> restreinte : <input type="checkbox"/> interdite : <input type="checkbox"/>		Nombre de pages : 25
Validé par : Nathalie Malet		Bibliographie : oui
		Illustrations : oui
		Langue du rapport : F
Titre de l'article : Origine et devenir de la matière organique au sein du micro-estuaire temporaire de Fiume Santu (L'Agriate, Haute-Corse)		
Contrat n° CPER 2015	Rapport intermédiaire <input type="checkbox"/>	Rapport définitif <input checked="" type="checkbox"/>
Auteurs principaux :		
Jean Laurent Massey, Nathalie Malet, Yoann Baldi, Valérie Orsoni, Catherine Paoli		
Collaborateur (s) :		
Marie Garrido (Université de Corse), Vanina Pasqualini (Université de Corse), Patrick Rébillout (Météo France), Béatrice Beck (Marbec), Vincent Ouisse (Ifremer), Annie Fiandrino (Ifremer)		
Résumé :		
<p>Du fait de ses caractéristiques météorologiques, hydrologiques et topographiques particulières, la Corse compte un très grand nombre de micro-estuaires temporaires. L'Agriate en renferme plusieurs, dont le micro-estuaire temporaire de Fiume Santu. Ces écosystèmes sont spécifiques de par leur connexion intermittente avec la mer. Ouvertures et fermetures sont surtout rythmées par le débit du cours d'eau et par la formation de banquettes d'herbiers à <i>Posidonia oceanica</i> (L.) Delile. La caractérisation du fonctionnement global du système a été étudiée grâce à une approche multi-paramètres (descripteurs de la matière particulaire, inorganique dissoute, traçage isotopique naturel du carbone et de l'azote, communautés phytoplanctoniques) permettant de quantifier et de qualifier le pool de matière organique le long d'un gradient estuaire – zone côtière. L'origine des sources de matière organique a été caractérisée, révélant ainsi la contribution détritique issue majoritairement de la dégradation des feuilles d'herbiers à <i>P. oceanica</i>. Cette étude a permis de mettre en évidence quatre périodes de fonctionnement distinctes, marquant ainsi un lien étroit entre les facteurs environnementaux, le fonctionnement physique du système et le fonctionnement biologique. Les transferts de matière entre les différents compartiments (sédiment, détritique, colonne d'eau) et milieux (micro-estuaire, réservoirs, baie, proche côtier) de l'écosystème ont été dégagés.</p>		
Abstract :		
<p>In relation with meteorological, hydrological and topographic characteristics, Corsica has a very large number of temporarily open/closed micro-estuaries. Agriates contains several of them, including the Fiume Santu's temporarily micro-estuary. These ecosystems are specific because of their sporadic connection with the sea. The opening and closure depends on both the river flow and the presence of the <i>Posidonia oceanica</i> (L.) Delile "banquettes". Characterization of the global functioning was based on a multiparameter approach (particulate matter and dissolved inorganic matter descriptors, carbon and nitrogen stable isotope, phytoplankton communities), in order to qualify and quantify the organic matter (OM), along an estuary – coastal zone gradient. The OM sources have been characterized, revealing that the detrital OM is resulting from <i>P. oceanica</i> leaves degradation. This study highlighted four critical periods, with the close link between environmental, physical and biological factors. The matter transfers between different compartments (sediment, detrital, water column) and systems (micro-estuary, ponds, bay, coastal area) by the ecosystem were also demonstrated.</p>		
Mots-clés :		
Corsica, Fiume Santu, micro-estuaire temporaire, matière organique, isotopes stables, nutriments, phytoplancton.		
Keywords :		
Corsica, Fiume Santu, temporarily open/closed micro-estuary, organic matter, stable isotope, nutrients, phytoplankton.		

Sò d'una leva ch'ùn si tace

Incù lu spiritu tenace

È più ch'è mai sò capace

À tesse l'avvene di pace

Sò di quelli...

Ghjuvan Federiccu Terrazzoni – Cirnese

Remerciements

Par ces quelques lignes, il m'est offert la possibilité de remercier les personnes qui ont contribué à faire de ce stage une expérience enrichissante et une découverte au fil des jours passés.

Tout d'abord, je tiens à remercier Vincent Rigaud, Bruno Andral ainsi que toute l'équipe du Laboratoire Environnement Ressources Provence Azur Corse.

Je remercie ensuite François Galgani, océanographe biologiste et directeur de la station corse de l'Ifremer, grâce à ses conseils, son aide et son savoir ayant permis un bon déroulement de ce stage. Je remercie également Françoise Claro, docteur vétérinaire et chef de projet au Muséum National d'Histoire Naturelle de Paris.

Merci à Vanina Pasqualini, professeur en écologie à l'Université de Corse, participant au projet. Merci également à Marie Garrido, docteur en physiologie et biologie des organismes à l'Université de Corse pour son aide et sa réactivité à chaque fois que je l'ai sollicitée.

Merci à Patrick Rébillout de la station Météo-France d'Ajaccio, pour son aide et pour les données météorologiques dont j'avais besoin. J'adresse également mes remerciements à Gaël Guillou de l'Université de La Rochelle et Patrick Raimbault de l'Institut Méditerranéen d'Océanologie de Marseille pour leurs analyses et leur professionnalisme.

Je tiens à remercier Cathy Paoli et Valérie Orsoni pour leur très bon accueil, leur sympathie, leur implication, leur aide et les bons moments passés avec elles ayant contribué au très bon déroulement de ce stage.

Je remercie également Yoann Baldi, pour les bons moments passés au laboratoire et sur le terrain, mais aussi pour son aide précieuse dans certaines analyses ainsi que ce dont j'ai appris grâce à lui tout au long de ce stage.

Particulièrement, je remercie et témoigne toute ma reconnaissance à ma directrice de stage, Nathalie Malet, chercheuse à l'Ifremer. Sa patience, son savoir, son aide, le fait d'être passionnée par son métier, tout ce que j'ai pu apprendre scientifiquement, ont rendu ce stage particulièrement intéressant et enrichissant.

L'occasion m'est donnée ici de remercier également mes camarades de promotion ayant contribué à rendre plaisantes et enrichissantes ces deux années universitaires.

Enfin, je remercie tous les professeurs et intervenants du Master GILE, et plus particulièrement Christine Pergent-Martini et Gérard Pergent, pour tout ce qu'ils ont pu nous transmettre.

Contexte du stage

J'ai réalisé mon stage au sein de la station corse du Laboratoire Environnement Ressources Provence Azur Corse de l'Ifremer. L'Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la Mer a vu le jour le 5 juin 1984 suite à la fusion entre le CNEXO (Centre National pour l'Exploitation des Océans) et l'ISTPM (Institut Scientifique et Technique des Pêches Maritimes). Les grands traits de l'Ifremer sont (i) de connaître, évaluer et mettre en valeur les ressources des océans afin de permettre leur exploitation durable, (ii) d'améliorer les méthodes de surveillance, de protection et de mise en valeur des milieux lagunaire, côtier et marin, (iii) de favoriser le développement économique du monde maritime.

La stratégie de la station corse s'oriente autour des objectifs de l'Ifremer mais également des problématiques spécifiques insulaires. La surveillance, la recherche et la mise en place d'outils d'aide à la gestion en sont les traits principaux. La station compte cinq personnes aux compétences variées permettant de mener à bien les différents projets.

Nathalie Malet, cadre de recherche en écologie fonctionnelle des milieux côtiers et lagunaires, m'a encadré scientifiquement durant ce stage. Chercheuse à l'Ifremer après avoir passé sa thèse en 2005, ses domaines spécifiques sont (i) le transfert de matière (apports azote et phosphore, devenir de la matière organique, transfert trophique), (ii) la problématique de l'eutrophisation et (iii) les communautés phytoplanctoniques et macrophytiques.

Cette étude s'inscrit dans le projet NUTRICA mené par la station corse de l'Ifremer. Il s'agit d'étudier la fonctionnalité des écosystèmes estuariens temporaires de l'Agriate en termes de continuité écologique et plus précisément de continuité trophique. Ces systèmes emblématiques sont présents sur tout le linéaire côtier insulaire et notamment le long de la côte de l'Agriate. Les organismes qui s'y développent ont su s'adapter à la dynamique complexe de ces milieux oligotrophes. Comprendre le fonctionnement et leur contribution à la production primaire est une première étape essentielle en matière de connectivité trophique des habitats. L'Université de Corse ainsi que la structure MARBEC de l'Université de Montpellier collaborent sur ce projet.

Sommaire

1. Introduction	1
2. Matériel et méthodes	3
2.1. Site d'étude	3
2.2. Stratégie d'échantillonnage et du suivi <i>in situ</i>	4
2.2.1. Paramètres physico-chimiques.....	4
2.2.2. Matière particulaire totale en suspension.....	5
2.2.3. Phytoplancton.....	5
2.2.4. Analyse des isotopes stables de l'azote et du carbone.....	5
2.2.5. Analyse statistique	6
3. Résultats	6
3.1. Paramètres environnementaux et hydromorphologie du système	6
3.2. Matière particulaire en suspension	10
3.3. Isotopes stables de l'azote et du carbone, signature de la matière organique	11
3.4. Matière inorganique dissoute	13
3.5. Phytoplancton.....	14
3.6. Périodes de fonctionnement distinctes	15
4. Discussion	16
4.1. Premiers éléments sur l'hydromorphologie du micro-estuaire	16
4.2. Caractérisation des sources de matière organique.....	17
4.3. Variation spatio-temporelle de la matière organique	18
5. Conclusion et perspectives	20
6. Références bibliographiques	22

1. Introduction

En milieu marin, les écosystèmes côtiers et en particulier les baies et les estuaires sont parmi les plus productifs au monde. Ils possèdent des fonctions écologiques remarquables (Gibson, 1994 ; McLusky & Elliot, 2004 ; Basset *et al.*, 2006). A la jonction des milieux terrestre, dulçaquicole et marin, ces zones d'eau de transition et plus particulièrement les estuaires, constituent des écosystèmes importants qui établissent un lien étroit entre ces différents milieux (Schlacher *et al.*, 2009). Ces écosystèmes remplissent ainsi de nombreux services écosystémiques. A l'échelle de la planète, ils sont ceux qui ont la plus grande valeur économique par rapport à leur surface (Costanza *et al.*, 1997 ; Barbier *et al.*, 2011). Ces écosystèmes ont en effet une très forte capacité d'exportation de matières, de ressources nutritives et d'organismes. Ils sont, comme la plupart des écosystèmes, fragiles et sensibles aux diverses pressions anthropiques (urbanisation, pollution, eutrophisation, dégradation des habitats, etc...) (Lotze *et al.*, 2006 ; Halpern *et al.*, 2008), en particulier du fait de la variabilité et de la multiplicité des processus écologiques qui s'y déroulent.

En Méditerranée, les grands estuaires ont fait l'objet d'un grand nombre d'études (hydro-sédimentaire, hydromorphologie, habitats et fonctions écologiques, peuplements halieutiques, niveaux de contamination, etc...) et sont donc bien connus d'un point de vue scientifique (Readman *et al.*, 1993 ; Darnaude *et al.*, 2004 ; Pujo-Pay *et al.*, 2006). Il existe cependant une catégorie d'estuaires méconnus en Méditerranée : les estuaires temporaires qualifiés de Temporarily Open/Closed Estuaries (TOCEs) dans d'autres parties du monde (Chuwen *et al.*, 2009 ; Scharler, 2012).

En Méditerranée occidentale, le long de ses 1 047 km de linéaire côtier, la Corse présente un littoral représenté par une mosaïque d'écosystèmes côtiers (Garrido, 2012). Du fait de ses caractéristiques météorologiques, hydrologiques et topographiques particulières (Bruno *et al.*, 2001), la Corse compte une grande variété de systèmes d'eau de transition. Parmi ceux-ci, on note une extraordinaire densité de micro-estuaires temporaires. Emblématiques du littoral corse, ils drainent un important bassin versant montagneux et débouchent généralement dans de petites baies sableuses grâce à une connexion réduite non permanente. Ouvertures et fermetures sont généralement rythmées par le débit du cours d'eau et par la formation de banquettes d'herbiers à *Posidonia oceanica* (Linnaeus) Delile. Les micro-estuaires temporaires sont constitués de plusieurs milieux (cours d'eau, zones humides, zone côtière) et compartiments (sédiments, herbiers et colonne d'eau) temporairement connectés, qui sont le siège de la production et des transferts de matières qui alimentent les différents maillons du réseau trophique (Herzka, 2005 ;

Connolly *et al.*, 2009). De plus, ces systèmes s'ouvrent le plus souvent sur la zone côtière adjacente oligotrophe, ce qui rend son fonctionnement écologique d'autant plus important.

Au nord-ouest de l'île, le secteur de l'Agriate, propriété du Conservatoire de l'Espace Littoral et des Rivages Lacustres dans sa plus grande partie, constitue l'une des zones littorales les plus préservées de Corse. Cette « zone spéciale de conservation » (ZSC) au titre de la directive habitat Natura 2000 fera également partie du futur parc naturel marin autour du Cap Corse. C'est dans ce secteur que se situe le micro-estuaire temporaire modèle de Fiume Santu, choisi pour cette étude (Fig. 1).



Figure 1 : Micro-estuaire temporaire de Fiume Santu

Il existe très peu d'informations sur ces milieux, notamment concernant leur rôle en termes de transfert trophique vers le milieu marin. Pour répondre à cette problématique, il est d'usage de caractériser dans un premier temps le fonctionnement global du système en envisageant une approche multi-paramètres permettant de quantifier et de qualifier le pool de matière organique. Tracer l'origine et le devenir de la matière organique dans un estuaire est souvent plus difficile que dans tout autre système du fait des interactions complexes entre les différentes composantes de l'écosystème (Peterson *et al.*, 1985 ; Kwak & Zedler, 1997 ; Cloern *et al.*, 2002). En effet, le pool de matière organique provient d'un mélange de différentes sources : (i) apports allochtones, incluant le phytoplancton marin et la matière organique d'origine continentale, (ii) apports autochtones, incluant le phytoplancton produit *in situ* ainsi que la matière organique produite par la décomposition de débris d'algues, de végétaux et de plantes marines (Vizzini *et al.*, 2002, Cardona *et al.*, 2007). L'analyse des isotopes stables de l'azote et du carbone permet de discriminer les différentes sources et de tracer leur contribution au pool de matière organique de façon spatio-temporelle. La matière organique d'origine continentale, fortement appauvrie en ^{13}C , et celle d'origine marine enrichie, ont par exemple des compositions isotopiques distinctes (Simenstad & Wissmar, 1985 ; De Brabandere *et al.*, 2002 ; Malet *et al.*, 2008). Cependant, afin de lever les ambiguïtés relatives à l'origine des sources de la matière organique, il est nécessaire d'associer d'autres indicateurs à l'analyse isotopique, comme les descripteurs de la matière particulaire et

inorganique dissoute et les ratios C/N (Hellings *et al.*, 1999), COP/chl *a* (Cifuentes *et al.*, 1988). Dépendant des conditions nutritives tant quantitatives que qualitatives, le suivi des communautés phytoplanctoniques avec l'abondance des groupes dominants est un indicateur complémentaire indispensable à la compréhension du fonctionnement écologique qui permet également d'aborder le premier maillon de la chaîne trophique (Guarini *et al.*, 2004 ; Loureiro *et al.*, 2009).

Le but de cette étude est de décrire le fonctionnement global du micro-estuaire temporaire et de la baie de Fiume Santu à travers le suivi de l'origine et du devenir du pool de matière organique au sein des différents systèmes interconnectés. Une approche hydromorphologique sera menée en parallèle du suivi de la quantité et de la qualité de la matière organique, selon un gradient bassin versant – milieu côtier. Une approche multi-paramètres alliant les descripteurs de la matière particulaire, inorganique dissoute, de la communauté phytoplanctonique, le traçage isotopique naturel du carbone et de l'azote, grâce à des prélèvements bimensuels sera privilégiée. Il s'agira *in fine* de mettre en évidence des périodes clés de fonctionnement du micro-estuaire et d'évaluer les potentialités de transferts de la matière entre les systèmes connectés et vers le proche côtier.

2. Matériel et méthodes

2.1. Site d'étude

Le micro-estuaire temporaire et la baie de Fiume Santu se situent dans la partie orientale de l'Agriate, à l'ouest du golfe de Saint-Florent et à proximité de la tour de la Mortella (Fig. 2). Le fleuve Santu, d'une longueur de 9,9 km, prend sa source sur la commune de Santu Petru di Tenda, à une altitude de 285 m. Il forme en aval un méandre s'élargissant en se rapprochant de la baie et des zones humides à végétation halophile à dominance de *Salicornia europaea* (Linnaeus) potentiellement recouvertes d'eau à certaines périodes ou lors d'évènements météorologiques. Une petite retenue d'eau (stagnu) est connectée au fleuve. C'est un cours d'eau ayant un rang de Strahler de niveau trois drainant un bassin versant d'une superficie de 47 km². Il se jette dans une baie sableuse d'une superficie de 0,015 km². Le micro-estuaire temporaire de Fiume Santu est qualifié de microtidal du fait de la faible ampleur des marées méditerranéennes. Il est entouré d'un relief montagneux et d'un maquis dense visible jusqu'au bord de l'eau.

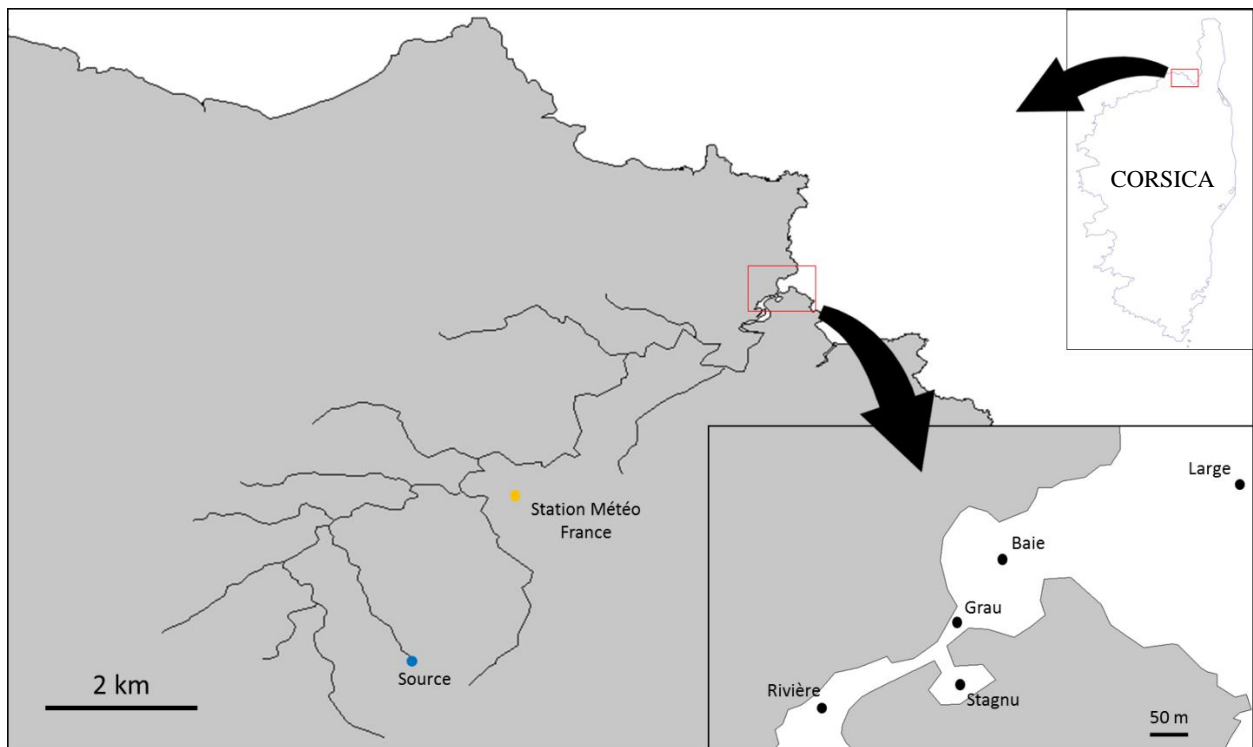


Figure 2 : Situation géographique du micro-estuaire temporaire de Fiume Santu, des stations d'échantillonnage, de la station Météo France, de la source du fleuve et de l'hydrographie du bassin versant (© ArcMap).

2.2. Stratégie d'échantillonnage et du suivi *in situ*

Des prélèvements ont été effectués bimensuellement d'octobre 2014 à mai 2015, systématiquement sur cinq stations en sub-surface (Fig. 2).

Les prélèvements ont été réalisés directement du bateau entre 9h30 et 11h00. Concernant l'analyse de la matière particulaire en suspension et des isotopes stables, les prélèvements d'eau ont été réalisés dans des bidons de 2 L avec une préfiltration à 100 μm dans le but d'écarter les débris supérieurs à cette taille et le mésozooplancton présents dans l'eau.

L'échantillonnage a été réalisé de façon à suivre un gradient allant de la station rivière à la station la plus au large.

2.2.1. Paramètres physico-chimiques

La température, la salinité et la variation de la hauteur d'eau ont été mesurées à une fréquence de 10 mn dans la station rivière par une sonde NKE STPS 10.

Les données météorologiques (précipitations et températures) de la station située sur le bassin versant (42.681820° N 9.219889° E) ont été fournies par Météo France (Fig. 2).

Les prélèvements d'eau pour l'analyse des nutriments ont été effectués en sub-surface dans des flacons de 125 mL (HDPE) et ont été conservés à -20°C un maximum de deux mois avant analyse.

A chaque station ont été réalisés :

- (i) un prélèvement d'eau brute pour l'azote total (NT) et le phosphore total (PT) : oxydation humide et colorimétrie selon la méthodologie décrite par Raimbault *et al.* (1999),
- (ii) un prélèvement d'eau filtrée à 20 µm par un filtre en nylon Millipore pour : les nitrates (NO₃) et phosphates (PO₄) : colorimétrie automatique selon la méthodologie décrite par Aminot & Kérouel (2007), pour l'ammonium (NH₄⁺) : fluorimétrie selon la méthodologie décrite par Holmes *et al.* (1999).

2.2.2. Matière particulaire totale en suspension

Les prélèvements d'eau sont analysés le jour même. Des filtrations ont été réalisées en triplicats pour chaque station sur des filtres Whatman GF/F à 0,7 µm en fibre de verre préalablement calcinés pendant 4h à 500°C. Les filtres sont rincés à l'ammonium formate à 37% afin de dissoudre les sels, rincés trois fois à l'eau déminéralisée puis placés à l'étuve à 60°C et pesés après 24h. On obtient la matière particulaire totale (MPT).

2.2.3. Phytoplancton

La chlorophylle *a* (chl *a*) (µg.L⁻¹) a été utilisée comme indice de biomasse phytoplanctonique. Des filtrations ont été effectuées sur des filtres Whatman GF/F ensuite stockés à -80°C avant analyse. Les concentrations de chl *a* ont été mesurées par spectrofluorimétrie selon la méthode décrite par Neveux & Lantoiné (1993).

Afin de déterminer l'abondance et la diversité phytoplanctonique, des prélèvements ont été réalisés grâce à un filet Hydro-Bios Apstein de 20 µm de vide de maille. 50 L ont été filtrés puis transférés dans un flacon de 100 mL avec 2,5 mL d'une solution de formaldéhyde à 37%. Chaque échantillon a été analysé selon la méthode décrite par Utermöhl (1958) en conformité avec les normes AFNOR (2006).

2.2.4. Analyse des isotopes stables de l'azote et du carbone

Les compositions isotopiques ont été évaluées suivant les références internationales normalisées par l'Agence Internationale de l'Energie Atomique à Vienne et choisies dans le réservoir terrestre le plus abondant de l'élément mesuré (Malet *et al.*, 2007). Pour le carbone, il s'agit du V-PDB (Pee-Dee Belemnite), rostre de bélemnite fossile provenant de la Pee-Dee Formation. Pour l'azote, il s'agit de l'azote atmosphérique. Le ratio isotopique δ est calculé ainsi : $\delta^A X = ((R_{\text{échantillon}} / R_{\text{standard}}) - 1) \times 10^3$, où *A* représente la masse atomique, *X* le symbole chimique et $R = {}^{13}\text{C}/{}^{12}\text{C}$ pour le carbone et ${}^{15}\text{N}/{}^{14}\text{N}$ pour l'azote (résultat exprimé en ‰). Cette analyse est couplée à une analyse élémentaire de l'azote et du carbone (‰) permettant de calculer le carbone organique particulaire (COP).

Analyse isotopique de la matière organique particulaire (MOP) : les prélèvements d'eau ont été analysés le jour même. Des filtrations ont été réalisées en triplicats pour chaque station sur des filtres Whatman GF/F à 0,7 μm en fibre de verre préalablement calcinés pendant 4h à 500°C. Chaque filtre est acidifié à l'HCl 1N afin de dénaturer les carbonates puis rincé trois fois à l'eau déminéralisée. Les filtres sont ensuite placés à l'étuve à 50°C pendant 24h, mis en capsule d'étain et envoyés pour être analysés.

Analyse isotopique des sources de matière organique : les végétaux (herbiers, macro-algues, plantes terrestres) sont acidifiés à l'HCl 1N, rincés trois fois à l'eau déminéralisée, et ensuite placés à l'étuve à 50°C pendant 24h. Le sédiment est retenu sur filtre et suit la même méthode que les végétaux. Les échantillons sont ensuite mis en capsules d'étain et envoyés pour être analysés.

2.2.5. Analyse statistique

L'analyse statistique a été réalisée grâce au logiciel XLSTAT version 2014.3.01. Une analyse en composante principale a été choisie afin de mettre en évidence des périodes contrastées du fonctionnement écologique du micro-estuaire (Annexe IV). La normalité des variables sélectionnées (COP, NT, PT, NO_3 , NH_4^+ , PO_4 , $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$ et chl *a*) a été vérifiée grâce au test de Shapiro-Wilk ($P < 0,05$). Ne respectant pas une distribution normale, le test non paramétrique de Kruskal-Wallis ($P < 0,05$) a donc été utilisé afin de comparer les périodes mises en évidence par l'ACP. Il est suivi du test de comparaison multiple par paire de Conover-Iman.

3. Résultats

3.1. Paramètres environnementaux et hydromorphologie du système

La température de l'eau suit les fluctuations de la température de l'air. Leur évolution montre les différentes variations saisonnières rencontrées durant l'étude (Fig. 3a).

Le régime des précipitations présente deux sortes d'évènements : (i) épisode intense et bref, (ii) épisode régulier et long (Fig. 3b). Cette étude est caractérisée par une crue centennale qui a eu lieu le 28 novembre 2014, représentée par un cumul journalier de 180 mm. Cet évènement majeur a entraîné la réouverture soudaine du grau (prof. 3 m) et par conséquent la connexion entre la baie et la rivière. D'autres évènements pluviométriques de plus faible intensité s'échelonnent sur une plus longue période, de début février à fin mars, avec six épisodes ayant des cumuls journaliers avoisinant les 40 mm. L'évolution des précipitations montre deux périodes significatives : (i) pluies automnales et (ii) pluies de février-mars.

Les variations de salinité suivent l'évolution des précipitations et réagissent aux événements pluviométriques pour parfois atteindre des valeurs égales à 0 (Fig. 3b). Cependant on observe de janvier à mars de fortes dessalures non associées à des précipitations, induites par la fonte des neiges.

L'évolution de la hauteur d'eau de la rivière reflète clairement la différence entre les périodes d'ouverture et de fermeture du grau (Fig. 3c). Bien que le marnage en Méditerranée soit faible, les fluctuations dues à la marée s'interrompent durant les périodes de fermeture matérialisant ainsi le fonctionnement du grau. On note également une forte élévation de la hauteur d'eau de presque 1 m en l'espace de 2 h lors de la crue centennale du 28 novembre 2014.

Les schémas de la figure 4a traduisent les différents aspects morphologiques du système au niveau du grau. Trois scénarios sont apparus au cours de l'étude : (i) grau ouvert, (ii) grau fermé (par du sédiment et des herbiers à *Posidonia oceanica* (*P. oceanica*)), (iii) grau semi-fermé (obstruction par des herbiers à *P. oceanica* imbibés d'eau induisant une percolation entre la rivière et la baie) (Annexe I).

Le stagnu affiche trois scénarios différents : (i) connecté à la rivière et en eau, (ii) non connecté à la rivière et en eau, (iii) à sec (Fig. 4b). La situation du stagnu est fortement liée aux apports hydriques du bassin versant et au rythme des marées. En effet, le stagnu est connecté à la rivière à marée haute. Lorsque le grau est fermé, la marée n'a plus d'influence sur le stagnu et de ce fait, celui-ci s'assèche progressivement.

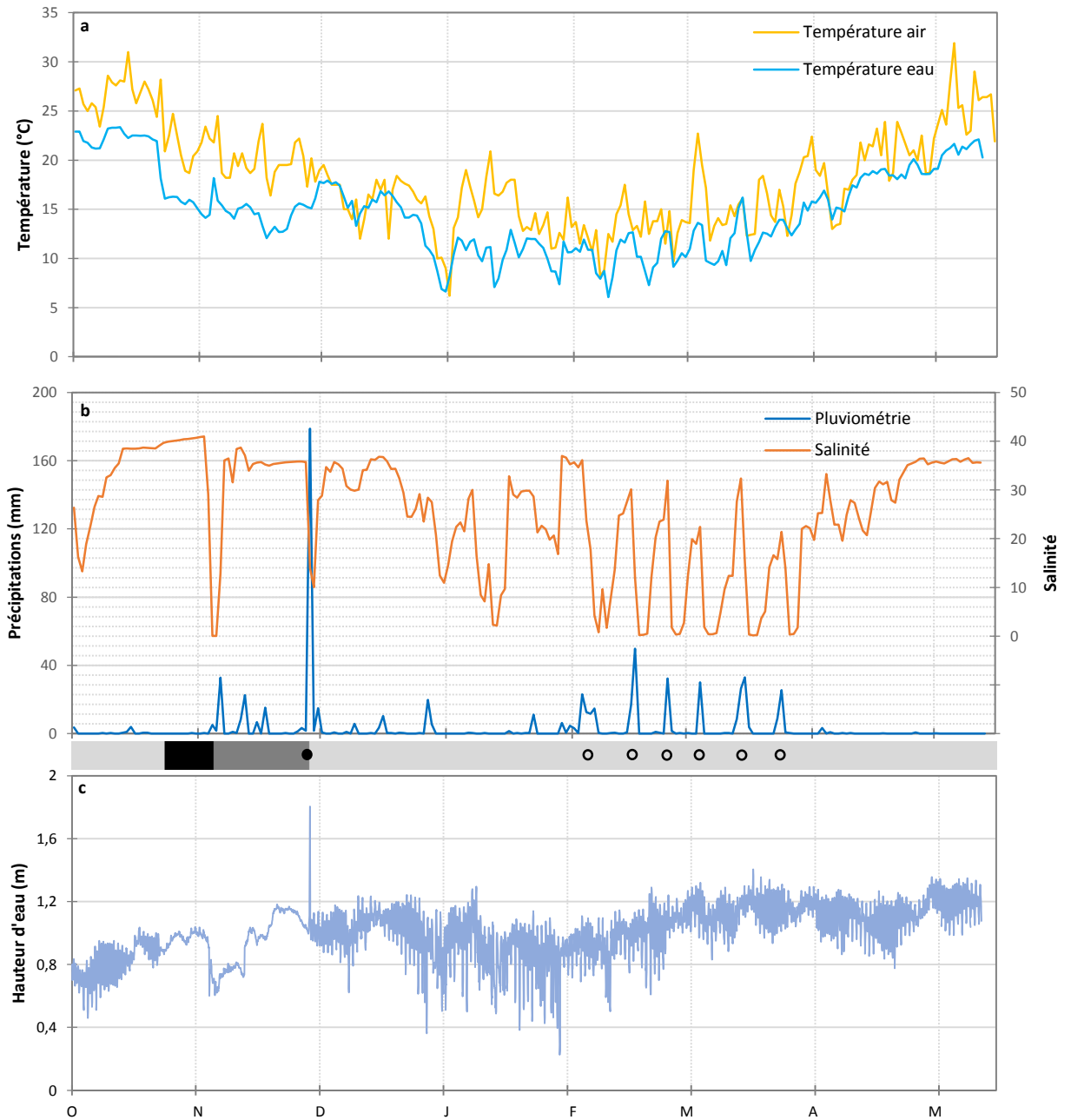


Figure 3 : Variabilité des paramètres environnementaux d'octobre 2014 à mai 2015 (a : Evolution journalière des températures de l'eau de la rivière et de l'air ; b : Evolution journalière de la salinité dans la rivière et des précipitations ; c : Evolution horaire de la hauteur d'eau dans la rivière). L'indicateur situé entre les graphiques b et c renseigne sur le degré de fermeture du grau (noir : fermé ; gris foncé : fermé avec percolations ; gris clair : ouvert) et les évènements pluvieux (cercles).

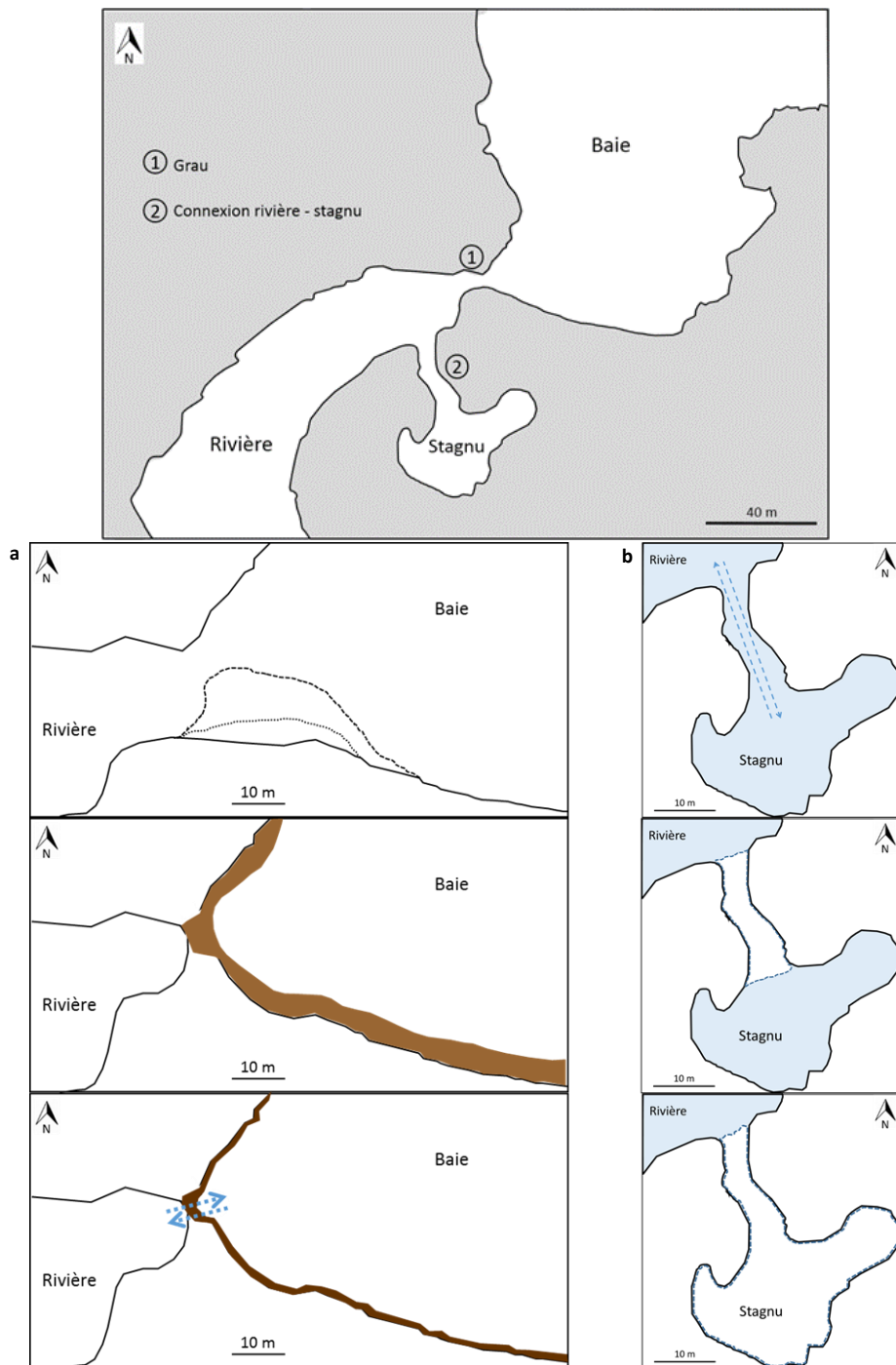


Figure 4 : Différents aspects de la morphologie du système :

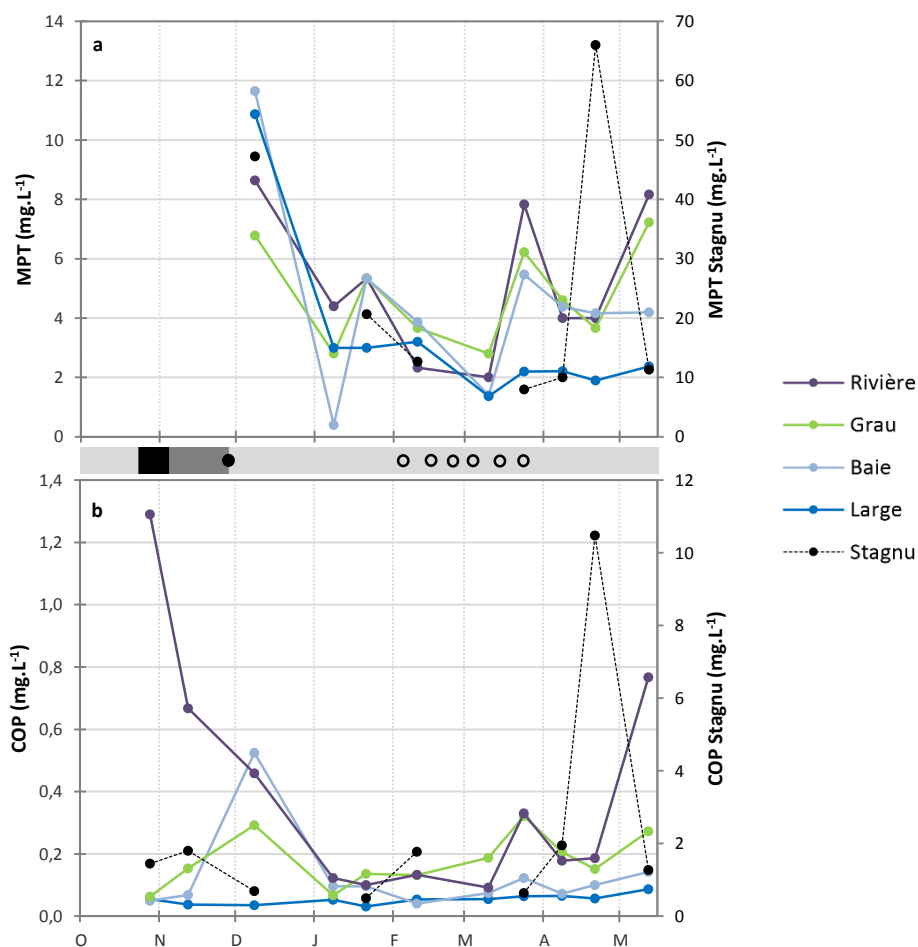
- a : Scénarios rencontrés au niveau du grau (de haut en bas : grau ouvert avec plusieurs possibilités d'ouverture : petite, moyenne ou grande ; grau fermé par une accumulation de sédiment et par la banquette d'herbiers à *P. oceanica* ; grau fermé avec percolations dues à la banquette de *P. oceanica* imbibée)

- b : Scénarios rencontrés au niveau du stagnu (de haut en bas : connecté à la rivière et en eau ; non connecté à la rivière mais en eau, à sec).

3.2. Matière particulaire en suspension

La figure 5a montre une stabilisation progressive de la teneur en matière particulaire totale (MPT) entre janvier et mars. Autour de cette période, on distingue préalablement une élévation des concentrations en MPT de toutes les stations suite à la crue centennale entre 6,8 et 11,5 mg.L⁻¹, respectivement pour les stations baie et rivière. Les concentrations en MPT des stations baie, grau et rivière augmentent à nouveau à partir du mois de mars. La MPT de la station stagnu montre un pic atteignant 66 mg.L⁻¹ en avril, alors que les concentrations des stations rivière et grau augmentent pour atteindre 7,7 ± 0,7 mg.L⁻¹.

Le carbone organique particulaire (COP) montre la même évolution que la MTP (Fig. 5b). Cependant, la concentration en COP de la station rivière atteint 1,3 mg.L⁻¹ lorsque le grau est fermé, pour ensuite diminuer progressivement, alors que le COP des stations baie et grau augmente après la crue. La concentration en COP dans la station stagnu montre un pic fin avril s'élevant 10,5 mg.L⁻¹ puis chute brutalement en mai, alors que le COP des stations rivière, grau et baie augmente, marquant ainsi le gradient station rivière – station large.



3.3. Isotopes stables de l'azote et du carbone, signature de la matière organique

Pendant la période de fermeture du grau, la matière organique des stations grau et rivière atteint des valeurs de $\delta^{13}\text{C}$ de -15 ‰ (Fig. 6a). Suite à la crue, ces valeurs s'appauvrissent en ^{13}C , pour atteindre -25 ‰ début février au début de la période pluvieuse. L'ensemble des stations suivent le même signal, bien qu'atténué, en particulier pour la station large jusqu'en avril où le signal des stations large *vs* baie, grau, rivière et stagnu semble se déconnecter. A cette même période, la station stagnu enregistre à nouveau des valeurs enrichies en $\delta^{13}\text{C}$ supérieures à -18 ‰. La composition en isotopes stables de l'azote montre que la matière organique particulaire (MOP) s'enrichit au cours de l'étude (Fig. 6b). Cet enrichissement en ^{15}N se vérifie notamment pour la station rivière avec des valeurs de $\delta^{15}\text{N}$ passant de -3,3 ‰ en octobre à 5,5 ‰ en avril. Cependant, dès janvier, la station stagnu se distingue avec des valeurs de $\delta^{15}\text{N}$ inférieures aux autres stations.

Le ratio COP/chl *a* s'intercale en moyenne autour de 300 (\pm 200) toutes stations confondues (Fig. 7a). Cependant, avant la crue, la station rivière affiche un ratio de 2 000, chutant brutalement après la crue, alors que la baie montre un ratio élevé juste après la crue, atteignant 1 350.

Le ratio C/N des différentes stations a tendance à diminuer jusqu'à fin avril, hormis pour la station rivière, affichant un ratio faible avant la crue (4,5) (Fig. 7b). Lors des percolations au niveau du grau, celui-ci affiche un pic, de même que la baie juste après la crue.

Le graphique des sources de matière organique permet de dégager trois groupes montrant des signatures isotopiques en $\delta^{13}\text{C}$ distinctes (Fig. 8) : (i) MO d'origine marine, (ii) MO intermédiaire et (iii) MO d'origine terrestre. Le groupe des sources ayant une signature d'origine marine s'échelonne de -12 à -19 ‰ et comprend du sédiment (baie et stagnu) et des herbiers, notamment à *P. oceanica* (fraiche, banquette et décomposition). La signature isotopique des différents états d'herbiers à *P. oceanica* est stable en $\delta^{13}\text{C}$ mais s'échelonne de -1,5 ‰ (banquette) à 1,8 ‰ (décomposition) en $\delta^{15}\text{N}$. Le groupe des sources d'origine continentale s'échelonne entre -26 et -28 ‰ et comprend du sédiment et de la MOP en amont de la rivière, ainsi que *Salicornia europaea* (Linnaeus), dominante dans la rivière. Le groupe s'intercalant entre les sources d'origines continentales et marines s'échelonne en $\delta^{13}\text{C}$ de -20 à -22 ‰ et comprend le sédiment et le périphyton de la rivière. L'écart-type du sédiment de la rivière est élevé en $\delta^{13}\text{C}$ du fait de la variabilité saisonnière.

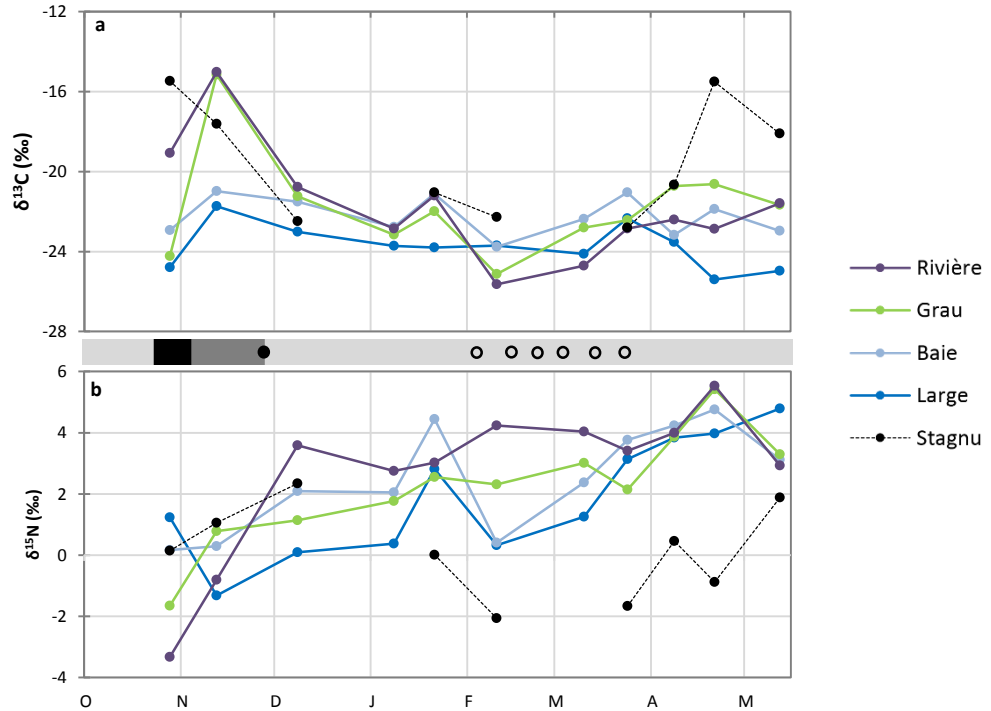


Figure 6 : Evolution par station du $\delta^{13}\text{C}$ (a) et du $\delta^{15}\text{N}$ (b) (‰) d'octobre 2014 à mai 2015. L'indicateur situé entre les graphiques renseigne sur le degré de fermeture du grau (noir : fermé ; gris foncé : fermé avec percolations ; c : ouvert) et les évènements pluvieux (cercles).

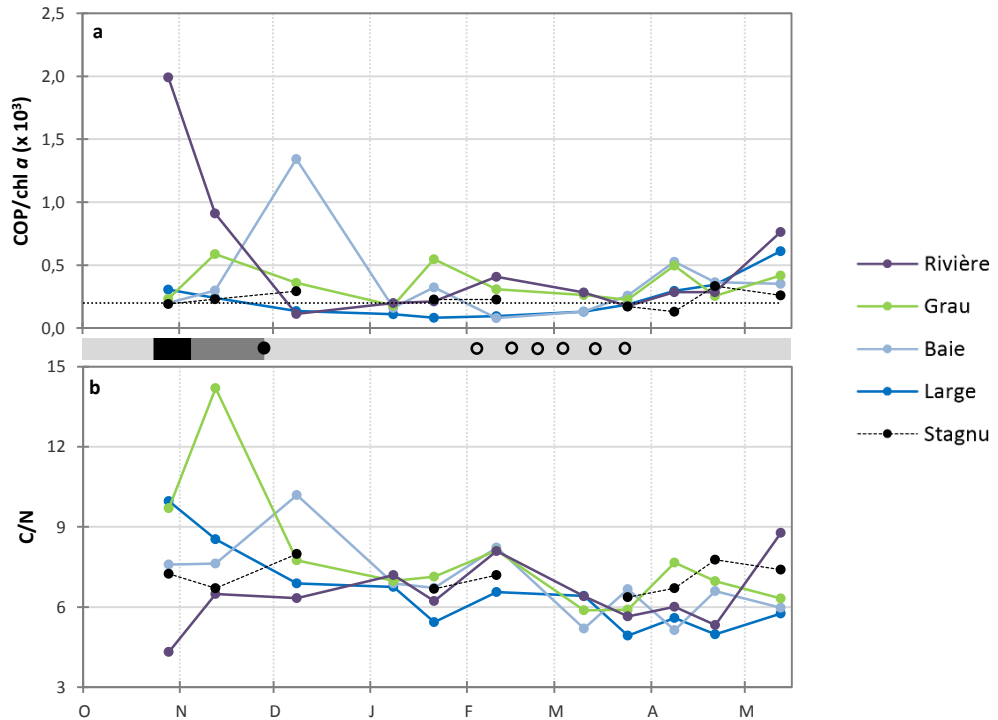


Figure 7 : Evolution par station des ratios COP/chl a (a) et C/N (b) d'octobre 2014 à mai 2015. L'indicateur situé entre les graphiques renseigne sur le degré de fermeture du grau (noir : fermé ; gris foncé : fermé avec percolations ; c : ouvert) et les évènements pluvieux (cercles).

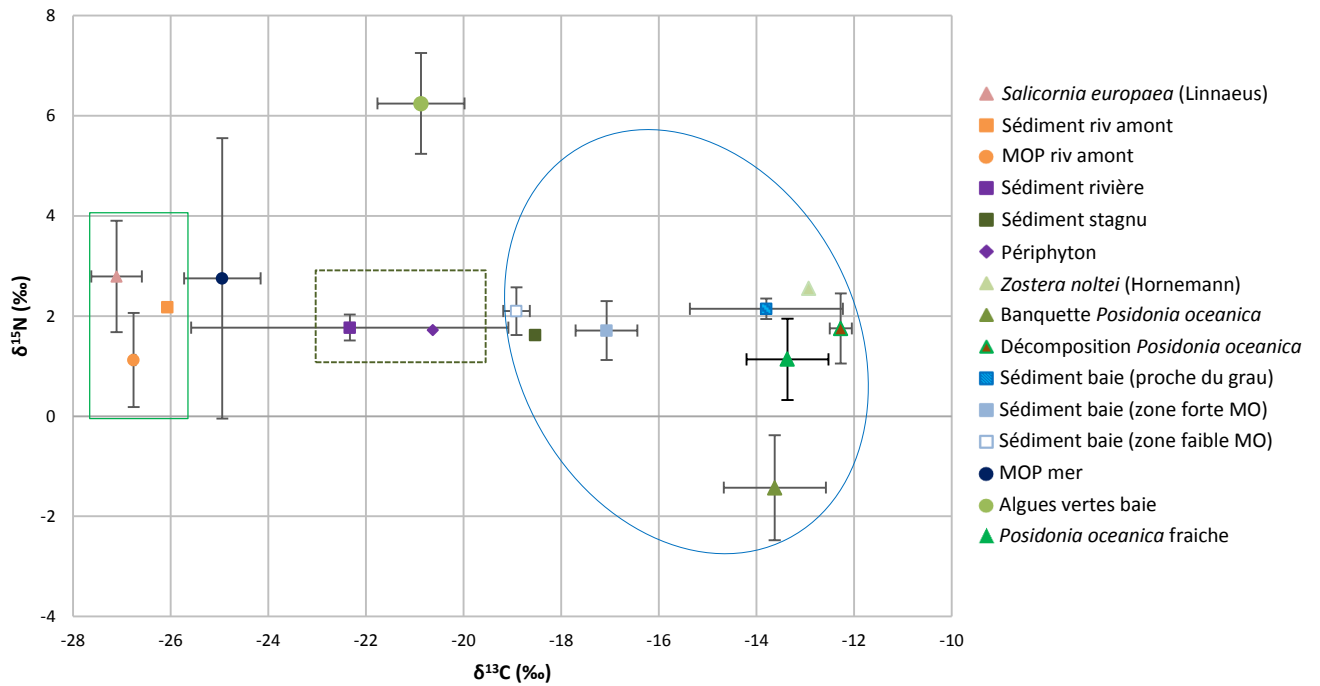


Figure 8 : $\delta^{13}\text{C}$ (‰) et $\delta^{15}\text{N}$ (‰) des sources de matière organique : MOP ; herbiers ; sédiment (Annexe II) ; algues ; périphyton. Rectangle vert : MO d'origine continentale ; rectangle en pointillés : MO intermédiaire ; cercle bleu : MO d'origine marine.

3.4. Matière inorganique dissoute

Avant la crue, alors que le grau est fermé, la concentration en ammonium (NH_4^+) dans la station rivière montre un pic de $44 \mu\text{mol.L}^{-1}$ (Fig. 9a). Après la crue, la teneur en NH_4^+ contenue dans la station rivière chute brutalement, alors qu'elle augmente dans les autres stations, notamment pour la station large. Début février, le stagnu affiche un pic de NH_4^+ atteignant $58 \mu\text{mol.L}^{-1}$, de même que toutes les stations exceptée la rivière qui montre des concentrations élevées en NH_4^+ et ce jusqu'en mars pour la baie.

La concentration en nitrates (NO_3) montre un gradient allant de la station large à la station rivière (Fig. 9b). Les nitrates augmentent dans la station rivière après la crue pour atteindre $17 \mu\text{mol.L}^{-1}$. Début février, la concentration en NO_3 de l'ensemble des stations augmente fortement pendant la période de pluie (en moyenne de $0,8 \mu\text{mol.L}^{-1} \pm 0,2$ à $1,3$; $8,7$; $18,8$ et $42,6 \mu\text{mol.L}^{-1}$ respectivement pour les stations large, baie, grau et rivière) pour ensuite diminuer et atteindre presque $0 \mu\text{mol/L}$ en avril.

La concentration en phosphates (PO_4) montre trois périodes : (i) augmentation après la crue, (ii) augmentation pendant les pluies de mi-février à fin mars et (iii) augmentation après l'arrêt des pluies en concomitance avec les concentrations élevées de PO_4 du stagnu (Fig. 9c).

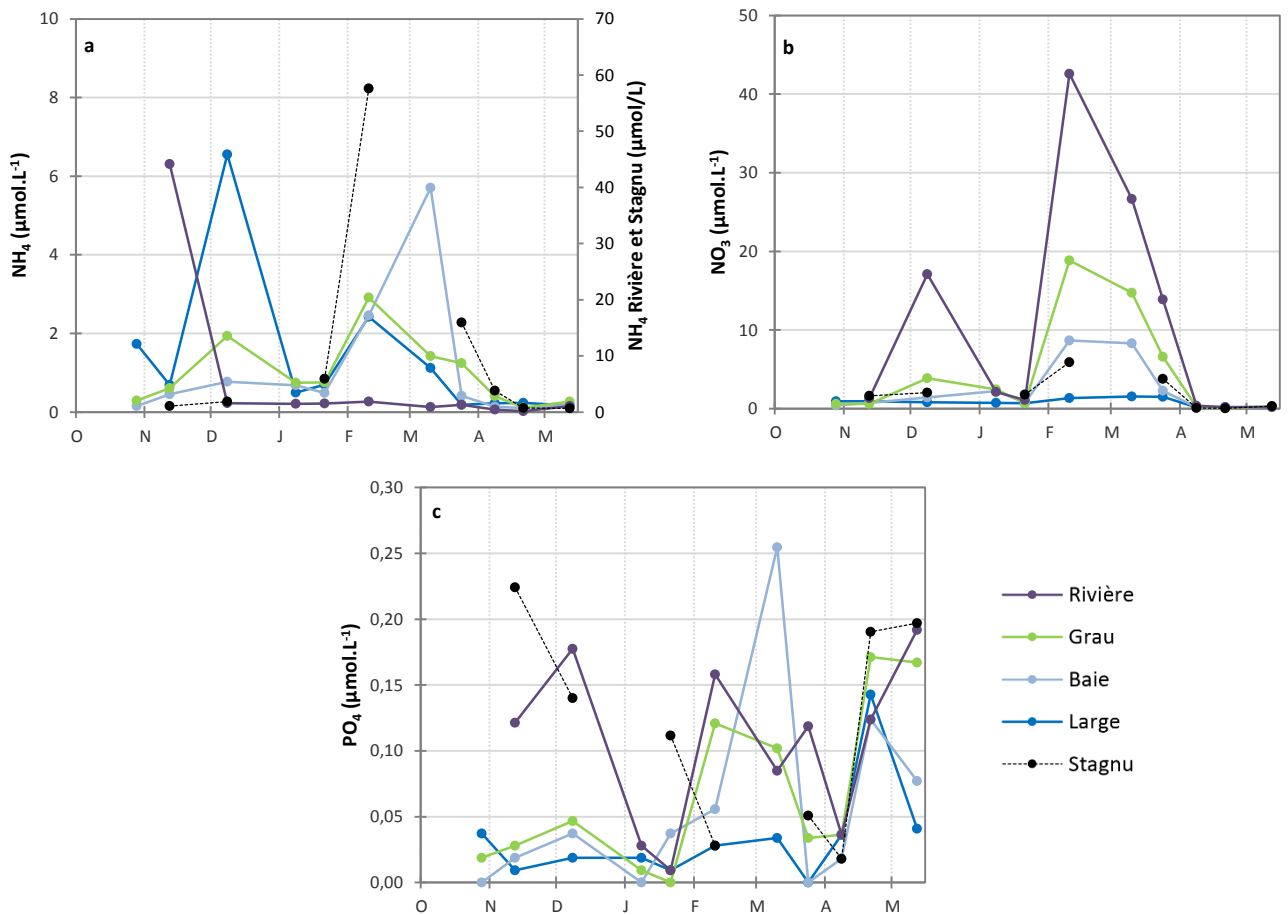


Figure 9 : Evolution par station des compositions en nutriments ($\mu\text{mol.L}^{-1}$) d'octobre 2014 à mai 2015 : a : ammonium (NH_4^+) avec les stations rivière et stagnu en échelle secondaire ; b : nitrates (NO_3) ; c : phosphates (PO_4).

3.5. Phytoplancton

La biomasse phytoplanctonique est dominée par les Diatomophyceae et les Dinophyceae (Annexe III). Les données montrent une évolution similaire entre les stations large et baie et les stations grau et rivière. Avant le mois de mars, les diatomées sont dominantes aux stations large et baie avec une abondance variant de 1 700 à 37 500 cell.L^{-1} (Fig. 10a). Après le mois de mars, elles sont dominantes aux stations grau et rivière, variant de 1 700 à 24 000 cell.L^{-1} . Quatre pics sont observés : (i) début janvier et (ii) début février aux stations large et baie avec une dominance de *Chaetoceros sp.* (Ehrenberg), (iii) fin janvier pour les stations rivière et grau, puis (iv) dans la rivière fin mars dominé par *Navicula sp.* (Bory de Saint-Vincent). Concernant les dinophycées, elles sont largement dominantes dans la rivière jusqu'à fin janvier, avec un bloom après la crue de 92 000 cell.L^{-1} dominé par des *Kryptoperidinium foliaceum* (F.Stein) Lindemann (Fig. 10b). Début mars, malgré une biomasse faible, elles sont également dominantes dans le grau et la rivière et montrent une légère augmentation au mois de mai. Toutefois, il est important de noter une légère

augmentation dominée par des *Prorocentrum micans* (Ehrenberg) aux stations large et baie début janvier.

La concentration de la chlorophylle *a* (chl *a*) se situe en moyenne autour de 0,5 $\mu\text{g.L}^{-1}$ (Fig. 11). Cependant, on relève début décembre dans la station rivière un pic de 4 $\mu\text{g.L}^{-1}$, qui suit le bloom de dinophycées à la même période ainsi qu'un second pic moindre fin mars suivant le pic de diatomées à la même date. Toutefois, la concentration en chl *a* ne marque pas les abondances de phytoplancton entre janvier et mars.

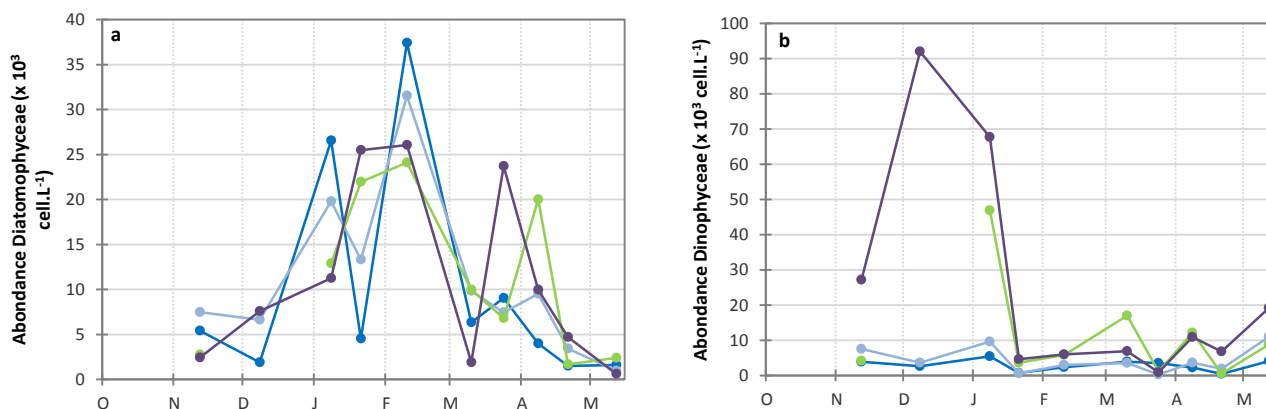


Figure 10 : Evolution par station des communautés phytoplanctoniques dominantes (cell.L⁻¹) d'octobre 2014 à mai 2015 : a : Diatomophyceae ; b : Dinophyceae.

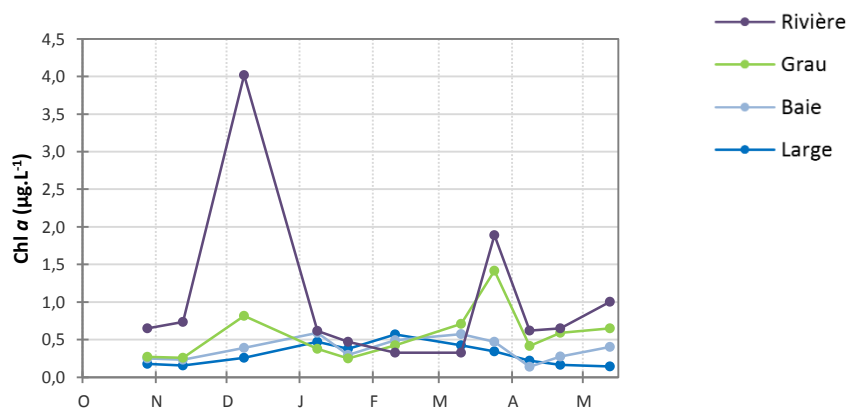


Figure 11 : Evolution par station de la chlorophylle *a* ($\mu\text{g.L}^{-1}$)

3.6. Périodes de fonctionnement distinctes

Le tableau I montre quatre périodes de fonctionnement :

- (i) octobre-novembre : grau fermé,
- (ii) décembre-janvier : ouverture du grau après la crue,
- (iii) février-mars : période des pluies,
- (iv) avril-mai : arrêt des pluies

Tableau I : Périodes saisonnières de fonctionnement du micro-estuaire, mises en évidences par une analyse en composantes principales (Annexe IV) (moyenne sur l'ensemble des stations \pm écart type) et comparées grâce au test de Kruskal-Wallis ($n = 11$; $\alpha = 0,05$; ns : non significatif ; * : significatif ; ** : très significatif ; * : hautement significatif) suivi d'un test de comparaison multiple par paire de Conover-Iman (des lettres différentes indiquent des groupes différents).**

	Octobre - Novembre		Décembre - Janvier		Février - Mars		Avril - Mai		P-Value	Significativité			
<i>Formes totales</i>													
NT	7,7	\pm 2,1	A	7,3	\pm 1,7	A	25,2	\pm 13,8	A	0,172	ns		
PT	0,23	\pm 0,04	A	0,31	\pm 0,04	A	0,22	\pm 0,05	A	0,334	ns		
<i>Matière inorganique dissoute</i>													
NO ₃	0,8	\pm 0,3	AB	1,2	\pm 0,8	AB	11,4	\pm 9,3	B	0,000	***		
NH ₄	6,9	\pm 16,5	AB	0,8	\pm 0,4	AB	2,4	\pm 1,6	B	0,004	**		
PO ₄	0,03	\pm 0,04	AB	0,01	\pm 0,01	A	0,03	\pm 0,03	A	0,001	***		
<i>Isotopes stables</i>													
$\delta^{13}C$	-20,5	\pm 3,8	A	-22,6	\pm 1,0	A	-24,0	\pm 1,1	A	0,062	ns		
$\delta^{15}N$	-0,6	\pm 1,5	A	2,5	\pm 1,2	AB	2,2	\pm 1,5	AB	0,003	**		
<i>Matière organique particulaire</i>													
COP	298,0	\pm 453,4	AB	87,7	\pm 35,2	A	95,8	\pm 50,8	A	220,5 \pm 230,9	B	0,005	**

4. Discussion

4.1. Premiers éléments sur l'hydromorphologie du micro-estuaire

L'approche de l'ensemble des paramètres environnementaux d'un estuaire est une étape essentielle à la compréhension de son fonctionnement écologique global (Harrison, 2004 ; Scharler ; 2012). Généralement, le comportement hydrodynamique d'un estuaire dépend de deux facteurs : le régime du bassin versant et la marée (Romaña, 1994). Ces facteurs génèrent des mouvements de masses d'eau dans l'estuaire et rythment ainsi majoritairement les processus biologiques qui s'y déroulent. Ce constat se vérifie également dans le cas des estuaires temporaires. Plusieurs auteurs ont en effet montré des différences significatives des paramètres biologiques suivant les phases d'ouverture/fermeture, rythmées en grande partie par le régime du bassin versant (Nozais *et al.*, 2001 ; Christopher *et al.*, 2005).

Dans le cadre du micro-estuaire temporaire de Fiume Santu, l'approche des paramètres environnementaux est d'autant plus essentielle qu'il n'a jamais été étudié. Il est connecté à la mer de façon intermittente. Bien que restreintes, les périodes de fermeture dépendent des apports marins et en particulier de l'accumulation de sédiment et de la formation de banquettes d'herbiers à *P. oceanica*. Elles surviennent à partir de l'automne, lorsque les herbiers perdent leurs feuilles (Boudouresque *et al.*, 2006). A l'inverse, les périodes d'ouverture sont principalement influencées par le débit du cours d'eau, lui-même conditionné par les caractéristiques du bassin versant et le régime des précipitations. La superficie du bassin versant de Fiume Santu est colossale (47 km²) par rapport à celle de la baie (0,015 km²). Les pentes du bassin versant moyennes à fortes, une

perméabilité des sols limitée (Rouzeau *et al.*, 1998), ainsi que la courte longueur du fleuve Santu (9,9 km) induisent une réponse rapide aux fortes précipitations, aboutissant à des crues dites « éclair ». Au cours de cette étude, une crue centennale a modifié la morphologie du micro-estuaire. Bien que cet événement ait été exceptionnel, la survenue de crues automnales et même printanières d'intensités moindres chaque année est classique. De plus, le bassin versant étant montagneux, une partie des précipitations est accumulée sous forme de neige, contribuant ainsi au débit du cours d'eau (période février-mars). Ainsi ces apports d'eau douce sont mesurables jusque dans la baie. Ils contribuent à maintenir le grau ouvert et influent directement la dynamique du système tant du point de vue hydromorphologique que biologique.

Le micro-estuaire de Fiume Santu est de type microtidal. Cependant, la marée a une influence primordiale sur le système. La connexion du stagnu à la rivière dépend du régime du bassin versant mais également du rythme et de l'amplitude des marées. Lorsque les pluies cessent, la connexion du stagnu est uniquement influencée par la marée et il est intéressant de souligner qu'à chaque marée haute importante, le stagnu est connecté à la rivière. La matière et les nutriments présents dans la colonne d'eau, le sédiment remis en suspension provenant du fleuve ainsi que des réservoirs d'eau adjacents sont ainsi déversés dans le micro-estuaire.

Le régime du bassin versant et les marées favorisent ainsi une dynamique des masses d'eau constante, induisant des flux d'eau d'intensité et de fréquence différentes et génèrent ainsi des transferts de matière entre les différents milieux et compartiments interconnectés de l'écosystème.

4.2. Caractérisation des sources de matière organique

Les résultats obtenus permettent de distinguer deux sortes d'apports de matière organique : (i) apports allochtones regroupant principalement les apports du bassin versant (origine continentale) et d'origine marine, et (ii) apports autochtones incluant le phytoplancton produit *in situ*, l'ensemble des végétaux terrestres et aquatiques (algues, herbiers, plantes) ainsi que la matière organique d'origine sédimentaire.

Les apports continentaux provenant du bassin versant constituent la première source allochtone. Les eaux du bassin versant drainent débris de végétaux, sédiments et matière en décomposition jusque dans le micro-estuaire et la baie. Les compositions isotopiques des différents contributeurs analysés permettent de discriminer les apports d'origine continentale des autres apports. Le graphique des sources révèle cette distinction avec des valeurs de $\delta^{13}\text{C}$ inférieures à -26 ‰ pour le sédiment et la MOP en amont de la rivière, marquant bien une signature isotopique d'origine terrestre (Middelburg & Nieuwenhuize, 1998 ; Helling *et al.*, 1999). A l'inverse, les valeurs isotopiques des sources d'origine marine montrent une matière organique enrichie en ^{13}C , affichant

des $\delta^{13}\text{C}$ s'échelonnant de -12 à -19 ‰. Les apports d'origine marine constituent la seconde source des apports allochtones. Ces valeurs très enrichies en ^{13}C résultent des composants qui constituent les apports marins, étant essentiellement des débris d'algues, d'herbiers et de sédiment. En effet, les valeurs isotopiques des feuilles en décomposition de *P. oceanica* obtenues sont similaires à celles obtenues par Cardona *et al.* (2007). Il est généralement admis que la signature isotopique d'origine marine au large des côtes insulaires méditerranéennes est comprise entre -20 ‰ et -22 ‰ sur le carbone (Dauby, 1989). Celle caractérisée dans cette étude est légèrement appauvrie, s'orientant autour de -25 ‰. Elle reflète très certainement la signature « golfe », encore sous influence des apports continentaux (Carlier *et al.*, 2007 ; Harmelin-Vivien *et al.*, 2008).

Les sources autochtones sont caractérisées par plusieurs contributeurs et apparaissent sous trois formes : matière organique (i) fraîche, (ii) d'origine sédimentaire et (iii) détritique. Le phytoplancton produit *in situ* constitue une source dite fraîche. Sa signature isotopique reflètera les ressources nutritives disponibles et assimilées. Le bloom de *Kryptoperidinium foliaceum* (*K. foliaceum*) observé dans la rivière après la crue en est un exemple et résulte probablement de la forte concentration en NH_4^+ s'étant accumulée dans la rivière. Cet ammonium provient des processus sédimentaires et/ou détritiques (Nedwell & Raffaelli, 1998) mis en jeu au moment de la fermeture du micro-estuaire. La biomasse phytoplanctonique produite reflètera ainsi la signature appauvrie de cette source d'ammonium, alors que celle produite sur des apports en nitrates, principalement la biomasse des diatomées, sera enrichie en $\delta^{15}\text{N}$ (2 à 4 ‰).

L'ensemble du pool de matière organique détritique constitue également une source majeure du système. Il est important de préciser que les herbiers à *P. oceanica* contribuent largement au pool de matière organique de l'ensemble du micro-estuaire et de la baie. A certaines périodes, de grandes quantités de feuilles d'herbiers s'accumulent dans la rivière et dans le stagnu puis se décomposent (Mateo & Romero, 1997), affichant une MOP très enrichie en ^{13}C avec des $\delta^{13}\text{C}$ avoisinant -15 ‰. De plus, avant la crue, le COP ainsi que le ratio COP/Chl *a* très élevés observés à la station rivière, en plus d'un ratio C/N faible, indiquent bien une importante source de matière organique d'origine détritique (Cifuentes *et al.*, 1988). Il est également important de préciser que le même processus s'observe dans le stagnu. Celui-ci étant connecté à la rivière à chaque marée haute importante, de la matière se déverse dans celle-ci. Ce réservoir est donc une source majeure dans la composition du pool de matière organique du micro-estuaire.

4.3. Variation temporelle de la matière organique

La composition isotopique de la matière organique résulte de la contribution des différentes sources (allochtone ou autochtone) et de leur qualité (fraîche, détritique et sédimentaire). Les

différentes périodes de fonctionnement écologique du micro-estuaire temporaire de Fiume Santu ont été mises en évidence (Tableau I).

La période octobre-novembre marque la phase de fermeture du grau. Bien que courte, cette période présente des caractéristiques importantes dans le cadre de l'évaluation de la qualité de la matière organique. Les fortes concentrations en NH_4^+ et PO_4 respectivement aux stations rivière et stagnu, associées aux ratios COP/chl *a* élevé et C/N faible, indiquent clairement une matière organique d'origine détritique et/ou issue du relargage sédimentaire. Les valeurs élevées en $\delta^{13}\text{C}$ (-15 ‰) indiquent une matière organique enrichie, résultant largement de la dégradation des feuilles d'herbiers à *P. oceanica* (Cardona *et al.*, 2007).

La période décembre-janvier est marquée par l'ouverture du grau suite à la crue centennale. Un bloom de *K. foliaceum* vraisemblablement lié à l'apport de NH_4^+ ainsi que des conditions favorables pour cette espèce (salinité, température) est observé à la station rivière et manifeste une matière organique fraîche. Ce bloom contribue à un enrichissement en ^{15}N , matérialisant ainsi un gradient rivière – large pour le $\delta^{15}\text{N}$. Suite aux pluies, des nitrates sont apportés par le bassin versant, induisant une croissance des dinophycées en janvier aux stations large et baie, et plus particulièrement de l'espèce *Prorocentrum micans*, marquant ainsi le transfert de matière du milieu continental vers le milieu côtier. La biomasse de cette espèce contribue à l'appauvrissement en ^{13}C de la matière organique, et donc révèle une contribution détritique moindre. Cependant, il est possible que la contribution de la source phytoplanctonique masque la contribution détritique des feuilles d'herbiers.

La période février-mars est caractérisée par la reprise des précipitations et par conséquent une reprise des apports du bassin versant, notamment en nitrates, affichant un gradient allant du milieu terrestre vers le proche côtier. Cet apport en NO_3 induit une croissance des diatomées, confortant à nouveau l'idée d'un transfert entre les différents compartiments de l'écosystème. Ces compositions phytoplanctoniques caractérisent une matière organique fraîche, marquée par un appauvrissement en ^{13}C et un enrichissement en ^{15}N .

La période avril-mai marque l'arrêt des pluies et l'augmentation des températures. Le ratio COP/chl *a* augmente ainsi que le $\delta^{13}\text{C}$ dans les stations grau, rivière et stagnu. Les valeurs en $\delta^{15}\text{N}$ augmentent également, exposant un enrichissement de la matière suite à la récente dégradation de la matière organique. L'ensemble de ces indicateurs renvoient à caractériser une matière organique d'origine détritique.

La qualité de la matière est rythmée par les facteurs environnementaux : les périodes pluvieuses induisent une matière organique fraîche, largement dominée par les espèces phytoplanctoniques

qui se développent suite aux apports du bassin versant. A l'inverse, lors des périodes sans précipitations, la matière organique est caractérisée d'origine détritique, résultant du recyclage de la matière majoritairement contribué par la décomposition des feuilles d'herbiers à *P. oceanica* (Mateo & Romero, 1997) (période d'ouverture et de fermeture) et du relargage sédimentaire (période de fermeture).

5. Conclusion et perspectives

Cette étude a permis de mettre en évidence quatre périodes clefs de fonctionnement distinctes, dévoilant ainsi le lien étroit entre les facteurs environnementaux, le fonctionnement physique du système et le fonctionnement biologique. Les transferts de matière entre les différents compartiments (sédimentaire, détritique et colonne d'eau) et milieux (micro-estuaire, réservoirs, baie, proche côtier) de l'écosystème ont été dégagés.

Les sources contribuant au pool de matière organique transférées au sein du micro-estuaire et de la baie sont variées. Elles sont largement dépendantes des apports du bassin versant et du recyclage de la matière et/ou du relargage sédimentaire d'origine marine ou autochtone. Ainsi, nous avons pu mettre en évidence l'importance des apports diffus du bassin versant en nitrates lors des précipitations, des « pulses » (apports sporadiques) de nutriments dont du NH_4^+ de la rivière suite à la fermeture du grau, du NH_4^+ et du PO_4 issus des réservoirs adjacents à la rivière. Un des résultats marquant et inattendu a été la mise en évidence de la contribution majeure des herbiers à *P. oceanica* au pool de matière organique en suspension dans la colonne d'eau.

Afin de conforter les résultats concernant les transferts de matière et en particulier : bassin versant, sédiment/détritique, apports marins (notamment herbiers), une étude focalisée sur les stocks et flux de matière entre les différents compartiments et milieux est une étape essentielle. Il s'agirait en particulier d'étudier plus précisément les apports du bassin versant, les flux liés à la marée (rivière, réservoirs) et les entrées de feuilles d'herbiers à *P. oceanica* dans le système en se basant sur les périodes clefs définies lors de cette étude.

Les ressources nutritives inorganiques sont assimilées par le phytoplancton autotrophe avec clairement deux communautés phytoplanctoniques dominantes qui évoluent entre la rivière et la baie et entre le proche côtier et la baie : les diatomées et dinophycées. De plus, il est à noter que les abondances de certaines espèces dépendent des conditions nutritives et environnementales très spécifiques. De plus, les capacités de mixotrophie des dinophycées leur permettent de subsister lorsque les concentrations en nutriments diminuent, en particulier en milieu oligotrophe.

Considérant que les apports nutritifs au sein du micro-estuaire, de la baie et du proche côtier sont de nature variée de par leurs concentrations, fréquence et origine, la poursuite de cette étude à plus long terme est à envisager afin de conforter les résultats. De plus, en milieu oligotrophe, largement approvisionné par le recyclage de la matière détritique et considérant les abondances en dinophycées potentiellement mixotrophes, le suivi de la matière organique dissoute serait également essentiel à prendre en compte.

Cette étude a mis en avant les potentialités en termes d'exportation de matière et de nutriments vers le proche côtier mais également la part du recyclage de la matière au sein du micro-estuaire gouvernant ainsi les premiers maillons trophiques. Ces éléments suggèrent des capacités de productivité importante et de transfert de la matière vers les échelons trophiques supérieurs (zooplancton, macrofaune benthique, téléostéens). Les micro-estuaires temporaires pourraient ainsi constituer un habitat clef notamment concernant leur rôle de nurserie.

6. Références bibliographiques

AFNOR, 2006. Norme guide pour le dénombrement du phytoplancton par microscopie inversée. Méthode Utermöhl. NF EN 15204 : 1-39.

Aminot A., Kérouel R., 2007. Dosage automatique des nutriments dans les eaux marines. *MEDD, Quae, Ifremer* : 1-188.

Barbier E.B., Hacker S.D., Kennedy C., Koch E.W., Stier A.C., Silliman B.R., 2011. The value of estuarine and coastal ecosystem services. *Ecological Monographs* 81 : 169-193.

Basset A., Sabetta L., Fonnesu A., Mouillot D., Do Chi D., Viaroli P., Giordani G., Reizopoulou S., Abbiati M., Carrada G.C., 2006. Typology in Mediterranean transitional waters: new challenges and perspectives. *Aquatic Conservation* 16 : 441-455.

Boudouresque C.F., Bernard G., Bonhomme P., Charbonnel E., Diviacco G., Meinesz A., Pergent G., Pergent-Martini C., Ruitton S. & Tunesi L., 2006. Feuilles mortes de *Posidonia oceanica*, plages et réensablement. chap. 6. In : Préservation et conservation des herbiers à *Posidonia oceanica*. *RAMOGE pub* : 1-202.

Bruno C., Dupré G., Giorgetti G., Giorgetti J.P., Alesandri, 2001. Chì tempu face ? météorologie, climat et microclimats de la Corse. *CRDP de Corse / Météo-France* : 1-118.

Cardona L., Revelles M., Sales M., Aguilar A., Borell A., 2007. Meadows of the seagrass *Posidonia oceanica* are a significant source of organic matter for adjoining ecosystems. *Marine ecology progress series* 335 : 123-131.

Carlier A., Riera P., Amouroux J.M., Bodiou J.Y., Grémare A., 2007. Benthic trophic network in the Bay of Banyuls-sur-Mer (northwest Mediterranean, France): An assessment based on stable carbon and nitrogen isotopes analysis. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 72 : 1-15.

Christopher J.G., Leah A.C., Florian K., Timothy M.H., Jeffrey W.K., 2005. Influence of freshwater flow, ocean exchange, and seasonal cycles on phytoplankton e nutrient dynamics in a temporarily open estuary. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 65 : 275-288.

Chuwen B.M., Hoeksema S.D., Potter I.C., 2009. The divergent environmental characteristics of permanently-open, seasonally-open and normally-closed estuaries of south-western Australia. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 85 : 12-21.

Cifuentes L.A., Sharp J.H., Fogel M.L., 1988. Stable carbon and nitrogen isotope biogeochemistry in the Delaware estuary. *Limnology and Oceanography* 33 : 1102-1115.

Cloern J.E., Canuel E.A., Harris D., 2002. Stable carbon and nitrogen isotope composition of aquatic and terrestrial plants of the San Francisco Bay estuarine system. *Limnology and Oceanography* 47 : 713-729.

- Connoly R.M., Schlacher T.A., Gaston T.F., 2009. Stable isotope evidence for trophic subsidy of coastal benthic fisheries by river discharge plumes off small estuaries. *Marine biology Research* 5 : 164-171.
- Costanza R., D'Arge R., de Groot R., Farber S., Grasso M., Hannon B., Limburg K., Naeem S., O'Neill R.V., Paruelo R., Raskin R.G., Sutton P., van den Belt M., 1997. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature* 387 : 253-260.
- Darnaude A.M., Salen-Picard C., Harmelin-Vivien M.L., 2004. Depth variation in terrestrial particulate organic matter exploitation by marine coastal benthic communities off the Rhone River delta (NW Mediterranean). *Marine Ecology Progress Series* 275 : 47-57.
- Dauby P., 1989. The stable carbon isotope ratios in benthic food webs of the Gulf of Calvi, Corsica. *Continental Shelf Research* 9 : 181-191.
- De Brabandere L., Dehairs F., Van Damme S., Brion N., Meire P., Daro N., 2002. $\delta^{15}\text{N}$ and $\delta^{13}\text{C}$ dynamics of suspended organic matter in freshwater and brackish waters of the Scheldt estuary. *Journal of Sea Research* 48 :1-15.
- Garrido M., 2012. Structure et fonction des communautés phytoplanctoniques en milieux côtiers marin et lagunaire (Méditerranée – Corse) dans une optique de gestion. *Thèse doctorale. Université de Corse Pascal Paoli – Université de Liège* : 1-205.
- Gibson R.N., 1994. Impact of habitat quality and quantity on the recruitment of juvenile flatfishes. *Journal of Sea Research* 32 : 191-206.
- Guarini J.M., Gros, P., Blanchard G.F., Richard P., Fillon A. 2004. Benthic contribution to pelagic microalgal communities in two semi-enclosed, european type littoral ecosystems (Marennes-Oléron Bay and Aiguillon Bay, France). *Journal of Sea Research* 52 : 241-258.
- Halpern B.S., Walbridge S., Selkoe K.A., Kappel C.V., Micheli F., D'Agrosa C., Bruno J.F., Casey K.S., Ebert C., Fox H.E., Fujita R., Heinemann D., Lenihan H.S., Madin E.M.P., Perry M.T., Selig E.R., Spalding M., Steneck R., Watson R., 2008. A global map of human impacts on marine ecosystems. *Science* 319 : 948-952.
- Harmelin-Vivien M., Loizeau V., Mellonc C., Bekerd B., Arlhaca D., Bodiguelb X., Ferratona F., Hermanda R., Philipponb X., Salen-Picarda C., 2008. Comparison of C and N stable isotope ratios between surface particulate organic matter and microphytoplankton in the Gulf of Lions (NW Mediterranean). *Continental Shelf Research* 28 : 1911-1919.
- Harrison T.D., 2004. Physico-chemical characteristics of South African estuaries in relation to the zoogeography of the region

- Hellings L., Dehairs F., Tackx M., Keppens E., Baeyens W., 1999. Origin and fate of organic carbon in the freshwater part of the Scheldt Estuary as traced by stable isotope composition. *Biogeochemistry* 47 : 167-186.
- Herzka S., 2005. Assessing connectivity of estuarine fishes on stable isotopes ratio analysis. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 64 : 58-69.
- Homes R.M., Aminot A., Kérouel R., Hooker B.A., Peterson B.J., 1999. A simple and precise method for measuring ammonium in marine and freshwater ecosystems. *Canadian journal of fisheries and aquatic sciences* 56 : 1801-1808.
- Kwak T.J., Zedler J.B., 1997. Food web analysis of southern California coastal wetlands using multiple stable isotopes. *Oecologia* 110 : 262-277.
- Lotze H.K., Lenihan H.S., Bourque B.J., Bradbury R.H., Cooke R.G., Kay M.C., Kidwell S.M., Kirby M.X., Peterson C.H., Jackson J.B.C., 2006. Depletion, degradation, and recovery potential of estuaries and coastal seas. *Science* 312 : 1806-1809.
- Loureiro S., Garc  s E., Fernández-Tejedor M., Vaqu   D., Camp J., 2009. *Pseudo-nitzschia* spp. (Bacillariophyceae) and dissolved organic matter (DOM) dynamics in the Ebro Delta (Alfacs Bay, NW Mediterranean Sea). *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 83 : 539-549.
- Malet N., Sauriau P.G., Faury N., Soletchnik P., Guillou G., 2007. Effect of seasonal variation in trophic conditions and the gametogenic cycle on $\delta^{13}C$ and $\delta^{15}N$ levels of diploid and triploid Pacific oysters *Crassostrea gigas*. *Marine Ecology Progress Series* 346 : 203-217.
- Malet N., Sauriau P.G., Ryckaert M., Malestroit P., Guillou G., 2008. Dynamics and sources of suspended particulate organic matter in the Marennes-Ol  ron oyster farming bay: Insights from stable isotopes and microalgae ecology. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 78 : 576-586.
- Mateo M.A., Romeo J., 1997. Detritus dynamics in the seagrass *Posidonia oceanica*: elements for an ecosystem carbon and nutrient budget. *Marine Ecology Progress Series* 151 : 43-53.
- McLusky D.S., Elliot M., 2004. The estuarine ecosystem: ecology, threats and management. *Oxford University* : 1-224.
- Middleburg J.J., Nieuwenhuize J., 1998. Carbon and nitrogen stable isotopes in suspended matter and sediments from the Schelde Estuary. *Marine Chemistry* 60 : 217-225.
- Nedwell D.B., Raffaelli D.G., 1999. Advances in Ecological Research. *Estuaries* 1 : 1-320.
- Nozais C., Perissinotto R., Mundree S., 2001. Annual cycle of microalgal biomass in a South African temporarily-open estuary: nutrient versus light limitation. *Marine Ecology Progress Series* 223 : 39-48.

- Peterson B.J., Howarth R.W., Garrit R.H., 1985. Multiple stable isotopes used to trace the flow of organic matter in estuarine food webs. *Science* 227 : 1361-1363.
- Pujo-Pay M., Conan P., Joux F., Oriol L., Naudin J.J., Cauwet G., 2006. Impact of phytoplankton and bacterial production on nutrient and DOM uptake in the Rhône River plume (NW Mediterranean). *Marine Ecology Progress Series* 315 : 43-54.
- Raimbault P., Diaz F., Pouvesle W., Boudjellal B., 1999. Simultaneous determination of particulate organic carbon, nitrogen and phosphorus collected on filters, using a semi-automatic wet-oxidation method. *Marine Ecology-Progress Series* 180 : 289-295.
- Readman J.W., Albanist T.A., Barcelo D., Galassi S., Tronczynski J., Gabrielides G.E., 1993. Herbicide Contamination of Mediterranean Estuarine Waters: Results from a MED POL Pilot Survey. *Marine Pollution Bulletin* 26 : 613-619.
- Romaña L.A., 1994. Les grands estuaires français. *Equinoxe, spécial environnement littoral* 47-48 : 1-6.
- Rouzeau O., Denis L., Maurizot P., Hervé J.Y., 1998. Atlas thématique de la Corse – Saint-Florent 1/50 000. Données multicritères appliquées à l'environnement. *Rapport BRGM R 40* : 1-100.
- Scharler U.M., 2012. Ecosystem development during open and closed phases of temporarily open/closed estuaries on the subtropical east coast of South Africa. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 108 : 119-131.
- Schlacher T.A., Connolly R.M., Skillington A.J., Gaston T.F., 2009. Can export of organic matter support zooplankton in nearshore, marine plumes? *Aquatic Ecology* 43 : 383-393.
- Simenstad C.A., Wissmar R.C., 1985. $\delta^{13}\text{C}$ evidence of the origins and fates of organic carbon in estuarine and nearshore food webs. *Marine Ecology-Progress Series* 22 : 141-152.
- Tournois J., Ferraton F., Velez L., McKenzie D.J., Aliaume C., Mercier L., Darnaude A.M., 2013. Temporal stability of otolith elemental fingerprints discriminates among lagoon nursery habitats. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 131 : 182-193.
- Utermöhl H., 1958. Zur vervollkommnung der quantitativen phytoplanktonmethodik. *Mitteilungen der internationalen Vereinigung für Theoretische and Angewandte Limnologie* 9 : 1-38.
- Vizzini S., Sarà G., Michener R.H., Mazzola A., 2002. The role and contribution of the seagrass *Posidonia oceanica* (L.) Delile organic matter for secondary consumers as revealed by carbon and nitrogen stable isotope analysis. *Acta Oecologica* 23 : 277-285.

ANNEXES

Annexe I : Evolution du système au fil des prélèvements

28 octobre 2014



8 décembre 2014



8 janvier 2015



21 janvier 2015



10 février 2015



10 mars 2015



24 mars 2015



8 avril 2015



21 avril 2015



12 mai 2015

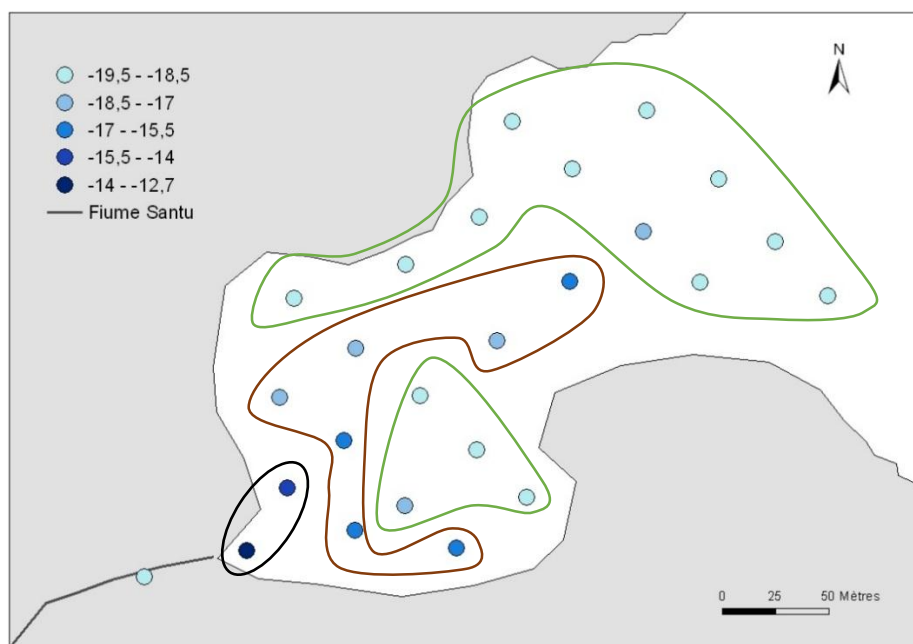


Annexe II : Valeurs isotopiques du sédiment de la baie en $\delta^{13}\text{C}$ et $\delta^{15}\text{N}$

Données acquises dans le cadre de l'étude « Assemblage des foraminifères d'une micro-baie insulaire en conditions oligotrophes, baie de Santu (Corse) ».

Les différentes stations « sédiment » entourées ont été utilisées pour déterminer les valeurs des sources de la matière organique (MO) du sédiment utilisées dans ce rapport (noir : sédiment Baie proche grau ; marron : sédiment baie zone avec accumulation de MO ; vert : sédiment baie zone à faible teneur en MO).

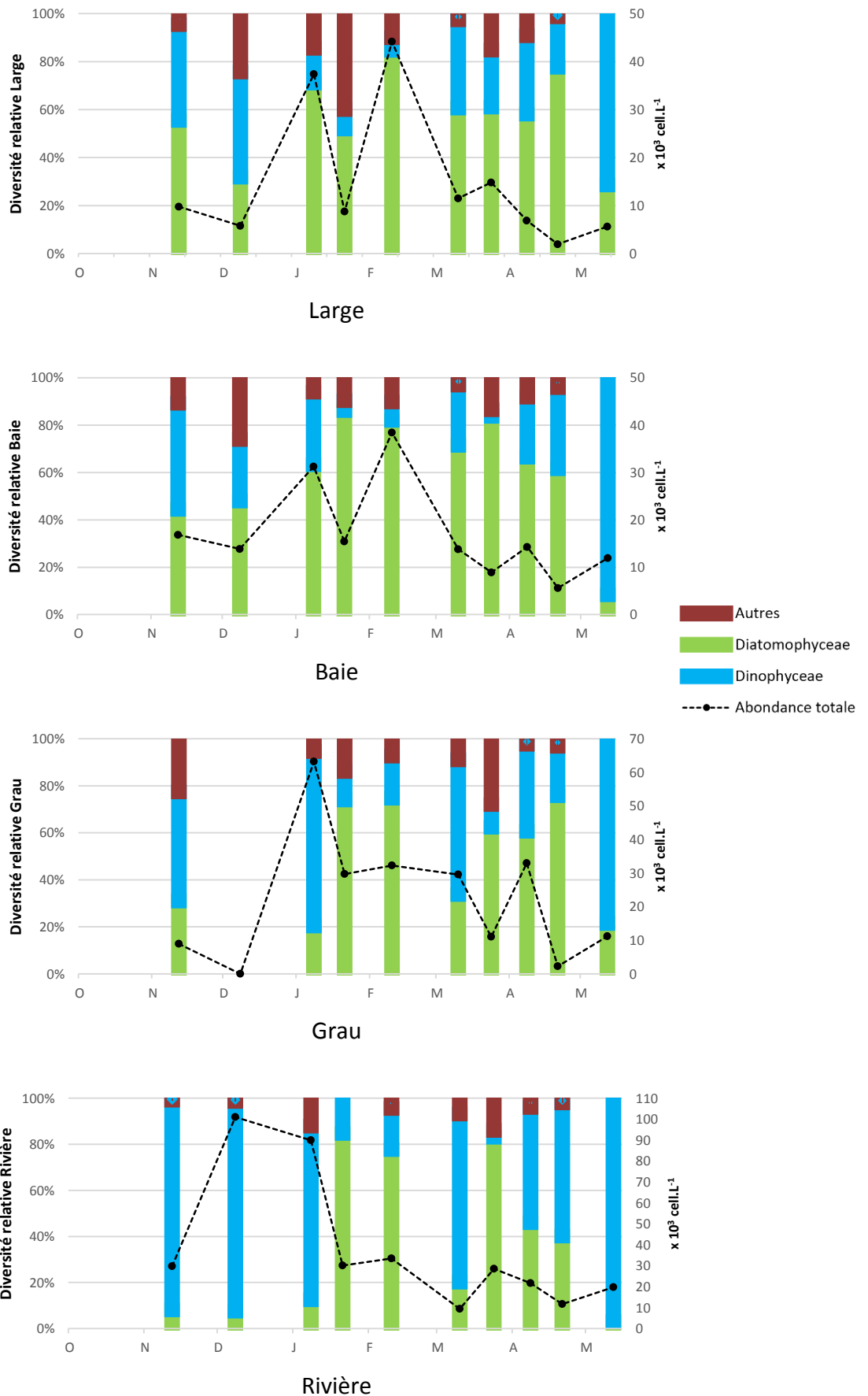
$\delta^{13}\text{C}$ (‰)



$\delta^{15}\text{N}$ (‰)



Annexe III : Abondance relative (%) par station des différentes classes de phytoplancton



Annexe IV : Analyse en composante principale (ACP)

L'analyse en composante principale (ACP) a été réalisée afin de mettre en évidence des périodes contrastées du fonctionnement écologique du micro-estuaire et de la baie. D'après le cercle des corrélations (Fig. 1), l'axe 1 est fortement corrélé aux variables des formes totales de l'azote et du phosphore, l'ammonium et à un degré moindre la signature isotopique sur le carbone. Cet axe représente donc la matière particulaire en suspension dans la colonne d'eau et l'importance du recyclage de la matière et de la fraction détritique (NH_4^+ rivière/stagnu, signature isotopique du carbone enrichi en ^{13}C).

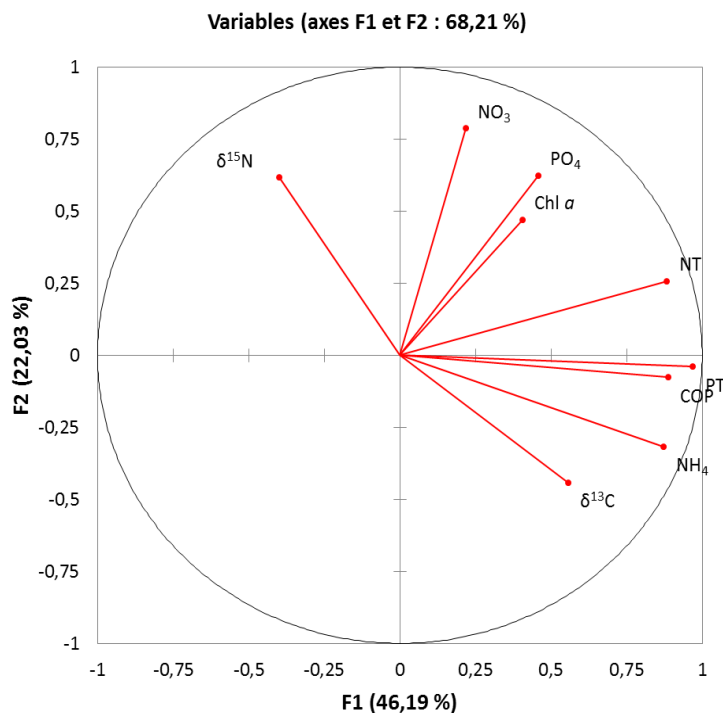


Figure 1 : Cercle des corrélations selon les axes F1 et F2 (68 % de la variabilité représentée).

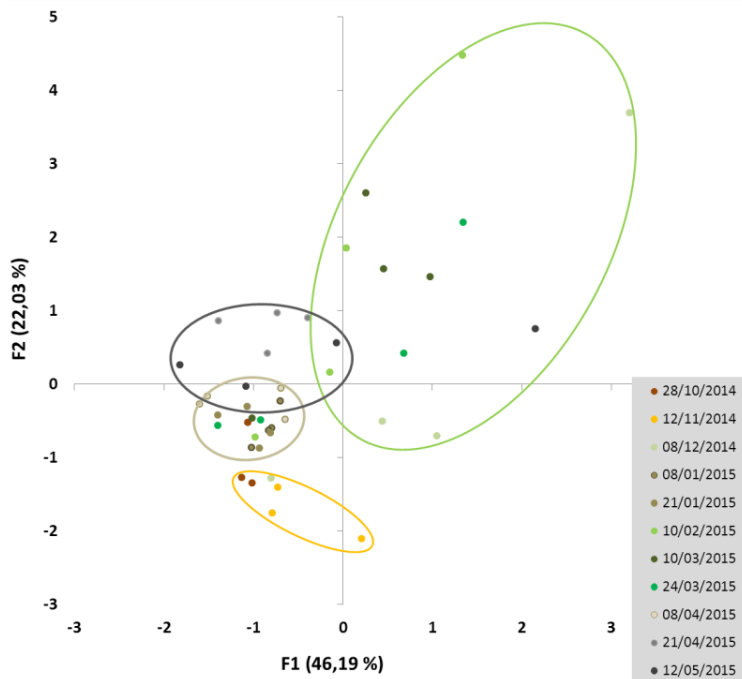


Figure 2 : Projection des données par dates toutes stations confondues selon les axes F1 et F2 (Jaune : Oct-Nov ; Marron : Déc-Jan ; Vert : Fév-Mar ; Noir : Avr-Mai)

à un degré moindre la signature isotopique sur le carbone. Cet axe représente donc la matière particulaire en suspension dans la colonne d'eau et l'importance du recyclage de la matière et de la fraction détritique (NH_4^+ rivière/stagnu, signature isotopique du carbone enrichi en ^{13}C). L'axe 2 est fortement corrélé aux variables NO_3 , PO_4 et à moindre mesure la signature isotopique sur l'azote et la chlorophylle α . Cet axe traduit par conséquent les éléments nutritifs présents dans la colonne d'eau en provenance du bassin versant en lien avec la biomasse phytoplanctonique.

La figure 2 permet de mettre en évidence les différentes périodes de fonctionnement du micro-estuaire : octobre-novembre ; décembre-janvier ; février-mars ; avril-mai. La période février-mars est moins stable que l'ensemble des autres périodes. Cette instabilité résulte des apports allochtones provenant du bassin versant, dont le régime est largement influencé durant cette période.