

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de L'enseignement Supérieur et de La Recherche Scientifique

المدرسة الوطنية العليا لعلوم البحر وتهيئة الساحل

École Nationale Supérieure des Sciences de la Mer et de l'Aménagement du Littoral



**MEMOIRE DE FIN D'ETUDES EN VUE DE L'OBTENTION DU
DIPLOME D'INGENIEUR EN SCIENCES DE LA MER
OPTION : ENVIRONNEMENT MARIN**

Etude écophysiological de *Posidonia oceanica* (L.) Delile : mise en relation entre les contenus élémentaires en carbone et en azote et leurs rapports isotopiques, la photosynthèse et la biométrie.

Présenté par :

- **KHELILI Ayoub**

Soutenu le 30/10/2018 devant le jury composé de :

Mme. Louanchi Ferial	Professeur	ENSSMAL	Présidente
M. Semroud Rachid	Professeur	ENNSMAL	Examineur
M. Kabrane Amine	MAB	ENSSMAL	Examineur
Mme. BOUMAZA Salima	MCB	ENSSMAL	Promotrice

Promotion 2018

Etude écophysiological de *Posidonia oceanica* (L.) Delile : mise en relation entre les contenus élémentaires en carbone et en azote et leurs rapports isotopiques, la photosynthèse et la biométrie.

**Mémoire réalisé par Ayoub KHELILI en vue de l'obtention du
DIPLOME D'INGENIEUR EN SCIENCES DE LA MER
OPTION : ENVIRONNEMENT MARIN**

Laboratoire d'accueil

1- Laboratoire d'océanographie chimique

Université de Liège-ULg

4000 Liège, Belgique

2- Laboratoire d'océanologie

Université de Liège-ULg

4000 Liège, Belgique

Stage réalisé sous la direction de :

Dr Jonathan RHICHIR, tuteur professionnel

+32-43.66.36.48

Jonathan.Rhichir@uliege.be

Pr Sylvie GOBERT, cotutrice professionnelle

Directrice du laboratoire d'océanologie-Liège

+32-43.66.33.29

Sylvie.Gobert@ulg.ac.be

Remerciements

Je tiens à remercier sincèrement en premier lieu mon maitre de stage, le Dr Jonathan Richir, pour sa disponibilité, son encadrement, ses conseils, ainsi que la correction de mon écrit. Merci JOJO.

Ensuite, je remercie ma Co-promotrice, le Professeur Sylvie Gobert de m'avoir accueilli dans son laboratoire afin de réaliser mon mémoire et pour ses orientations.

Je remercie également le Docteur, Gilles Lepoint, pour ses conseils, ses orientations surtout dans la discussion de mon mémoire et grâce à lui, j'ai réussi à faire le dosage des contenus élémentaires et les isotopes stables.

Je remercie le Docteur Alberto Borges, le chef du service d'océanographie chimique, de m'avoir accueilli au sein de son laboratoire.

Je remercie aussi Nicolas Sturaro, Renzo, Baptiste, Laurence, Soumia, Ouafa, Pièrre, Nicolas et tout le groupe de laboratoire d'Océanologie. Je remercie Nawal, leila, Imile, Youcef, khaled.

J'adresse mes sincères remerciements à Mme Christine Pergent –Martini et à M Gérard Pergent, pour ses orientations et ses conseils et de m'avoir accepté dans ce master.

J'adresse mes profonds remerciements à mes enseignants de l'ENSSMAL particulièrement Mme Salima Boumaza qui m'a donné des conseils et des orientations et m'a permis de trouver ce stage. Sans oublier Mme Souhila Alouache le responsable des relations extérieures à l'ENSSMAL qui m'a aidé pas mal de fois durant cette année.

Sans oublier, je remercie Mme. Louanchi qui m'a fait l'honneur d'accepter la présidence de ce jury. Je remercie aussi M. Semroud et M. Kabrane qui ont accepté d'examiner mon travail.

J'adresse mes sincères remerciements à ma famille en particulier ma mère et mon père qui m'ont supporté durant mon cursus scolaire. Mes frères et mes sœurs mes oncles et mes tantes et mes grandes mères.

Je remercie mes frères Hamid (Docteur), Samir, Mahfoudh (Cetauh), Redha. Et mes sœurs, Mariem, Basma, Wahiba (alpha), Nadjet et Siham.

Je remercie Morad, Khaled, Islam, lakhdar, Youcef, omar, Tazi (nini), abdo, hamid, mouhamed, aissa et benhaoua.

Je remercie mes amis, Mokhtar, ouahab, Fodil, belkhacem, imad, lounes, azouaou, amine, malek, mustapha et houssam, said. Sans les oublier, je remercie mes amis de l'ENSSMAL (le groupe de 5^{ème} et 4^{ème} année).

Sommaire

I-INTRODUCTION	1
1- <i>Posidonia oceanica</i> (L.) Delile	1
1-1-Production primaire et les éléments nutritifs	2
2-Les isotopes stables	3
3-Les objectifs	4
II-MATERIELS ET METHODES	5
1-Description du site d'étude	5
2-Echantillonnage	5
2-1-Diving-PAM	7
3-Paramètres environnementaux	8
4-La biométrie	8
5-Dosage des C, N et isotopes stables	9
5-1-Le broyage	9
5-2-La préparation des cupules d'analyse	10
5-3- L'analyse	10
6-Les analyses et les traitements statistiques	10
III-RESULTATS	11
1-Paramètres environnementaux à 10 m de profondeur	11
2-Paramètres physiologiques	12
3-Paramètres biométriques	13
3-1- A 10 m de profondeur	13
3-2-Le long du profil bathymétrique	14
4-Les contenus élémentaires et les isotopes stables	13
4-1- A 10 m de profondeur	14
4-2-Le long du profil bathymétrique	15
IV-DISCUSSION	16
1-Les paramètres environnementaux à 10 m de profondeur	16
2-Les paramètres physiologiques	16
3-Les paramètres biométriques	17
3-1-A 10 m de profondeur	17
3-2-Le long de profil bathymétrique	17
4-Les contenus élémentaires et les rapports isotopiques	18
4-1-A 10 m de profondeur	18
4-2-Le long du profil bathymétrique	20
V-CONCLUSION	21
VI-REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	22

VII-ANNEXES.....	28
-------------------------	-----------

Liste des figures

Figure 1: localisation de la station des recherches sous-marine et océanographiques STARESO dans la baie de Calvi (Corse).....	4
Figure 2: Evolution de la température à 10 m à l'interface eau-sédiment dans l'herbier <i>P. oceanica</i>	9
Figure 3: Evolution de l'intensité lumineuse dans l'herbier <i>P. oceanica</i> , à 10 m à l'interface eau-sédiment en noir) et à 8 m au-dessus de la canopée	9
Figure 4 : Evolution du PAR à 10 m au-dessus de la canopée de l'herbier à <i>P. oceanica</i>	10
Figure 5: variations hebdomadaire à bimensuelle de taux de transport d'électrons relatif (rETR) moyen (n=6) mesuré à 10 m sur la partie convexe du milieu de la 3ème feuille de <i>P. oceanica</i> (feuilles juvéniles exclues).....	10
Figure 6: Evolution hebdomadaire à bimensuelle des paramètres biométriques des faisceaux de <i>P. oceanica</i> à 10 m (n= 6, moyenne ± écart-type).....	12
Figure 7: Paramètres biométriques des faisceaux de <i>P. oceanica</i> à 3, 10, 20, 29 et 36 m de profondeur en juin –juillet (n=6, moyenne ± écart-type).....	13
Figure 8: Evolution hebdomadaire à bimensuelle des contenus élémentaires (C et N) et les rapports isotopiques (^{13}C et ^{15}N) dans les feuilles de <i>P. oceanica</i> à 10 m (n=6, moyenne ± écart-type). Le rapport C/N et les relations entre rapport isotopiques et rapport C/N sont également présentées.	14
Figure 9: les variations des contenus élémentaires (C et N) et rapports isotopiques (^{13}C et ^{15}N) en fonction de la profondeur (3, 10, 20, 29 et 36 m) dans les faisceaux de <i>P. oceanica</i> récoltés en face de station STARESO.....	15

Liste des tableaux

Tableau 1: Les dates et les profondeurs de l'échantillonnage.....	5
Tableau 1: Evolution de rETR moyen (n=6), ainsi que la lumière et la température en fonction de la profondeur dans l'herbier à <i>P. oceanica</i> . Lumière et température sont les moyennes au zénith (entre 11h et 14h GMT) les jours de mesures de l'activité photosynthétique aux différentes profondeurs respectives	11
Tableau 3: tableau de comparaison entre les valeurs de $\delta^{13}\text{C}$ et $\delta^{15}\text{N}$	20

I-INTRODUCTION

La mer Méditerranée est une mer oligotrophe mais qui est caractérisée par une diversité biologique très développée : grâce à son histoire géologique et sa communication avec l’océan Atlantique (Boudouresque., 2004). Afin d’étudier l’état des écosystèmes méditerranéens et de déterminer l’influence des pressions anthropiques en mer Méditerranée, les scientifiques utilisent des indicateurs biologiques de qualité du milieu. La morphologie de *Posidonia oceanica* est utilisée comme une empreinte pour évaluer les variations des nutriments et les conditions environnementales dans le milieu (Gobert et *al.*, 2016).

1- *Posidonia oceanica* (L.) Delile

P. oceanica (L.) Delile est une magnoliophyte marine endémique, dominante en Méditerranée. Avec un large profil bathymétrique allant de 0 à 40 m, elle occupe une superficie comprise entre 25 000 et 50 000 km² (Pasqualini et *al.*, 1998). La répartition de l’herbier est pratiquement continue sur tout le pourtour du littoral méditerranéen, sauf pour les régions des embouchures des grands fleuves (Nil et Rhône) (Boudouresque et *al.*, 2006a; Gobert et *al.*, 2006). Le faisceau de *P. oceanica* est formé de feuilles (partie épigée), avec une moyenne de 6 à 7 feuilles ainsi que des rhizomes et de racines (partie endogée) (Jeudy de Grissac et Boudouresque., 1985). Il y a deux formes de rhizomes: l’un qui assure la croissance verticale (orthotrope : pour l’accès à la lumière) et l’autre qui assure la croissance horizontale (plagiotrope : croissance pour l’espace) (Gobert et *al.*, 2006). Les feuilles de *P. oceanica* atteignent leur longueur maximale en été avec une longueur minimale en hiver (Caye et Rossignol., 1983).

Cet habitat constitue un pôle de biodiversité (Boudouresque et Meinesz., 1982) et l’écosystème de *P. oceanica* est le plus riche et productif en Méditerranée (Pergent et *al.*, 1994). Cet herbier abrite de nombreux poissons et organismes et il est considéré comme une zone de frayères et de nurseries pour de nombreuses espèces. Il libère une quantité importante d’oxygène dans le milieu et produit et exporte de la biomasse soit dans les écosystèmes limitotrophes, soit en profondeur. En plus, *P. oceanica* participant à empêcher le transport de sédiment dû aux courants et les piéger dans les fonds marins pour former la matre qui est utilisée comme un indicateur de trace de l’herbier lorsqu’il a disparu (Boudouresque et Meinesz., 1982). Cet habitat agit en tant que barrière par leurs banquettes pour protéger les côtes en limitant l’érosion (Boudouresque et *al.*, 2006a). Elle semble intéressante pour la surveillance de la qualité de l’eau comme un bioindicateur (la pollution de l’eau, taux de sédimentation) (Pergent et *al.*, 1995). En raison de sa production de matière végétale, l’herbier à *P. oceanica* est à la base de réseau alimentaire et il est capable de fournir plusieurs services écosystémiques (Nordlund et *al.*, 2016). Enfin, le maintien et la protection de l’écosystème de *P. oceanica* peuvent garder l’essor touristique et la gestion des ressources vivantes comme un intérêt économique (Boudouresque et *al.*, 2006a).

1-1-Production primaire et les éléments nutritifs

La photosynthèse est la transformation de l'énergie solaire en énergie chimique par les êtres vivants photosynthétiques. Elle comporte deux phases: une phase photochimique et une phase non photochimique. Ces deux phases sont complémentaires et interviennent toutes les deux au sein des chloroplastes.

La production primaire de *P. oceanica* dépend directement de l'ensoleillement et des paramètres physicochimiques du milieu (température, turbidité, nutriments) (Marba et al., 1996) et elle varie avec la profondeur et en fonction de la saison (Pergent-Martini et al., 1994). Dans tous les milieux aquatiques, les surfaces disponibles sont rapidement colonisées par une variété d'organismes. Si ces organismes se développent sur les plantes, ils sont appelés épiphytes. Les posidonies fournissent un excellent substrat pour les organismes épiphytes qui font partie intégrante de leur écosystème. Les feuilles de la *P. oceanica* constituent un substrat pour l'installation et la croissance des épiphytes (Borowitzka., 2006). Ces épiphytes (des Chromobiontes et Rhodobiontes) participent à la production primaire de l'herbier car ils peuvent représenter 20 à 30 % de la biomasse des feuilles (Elkalay et al., 2003), pour une contribution de 40% de la production primaire de l'herbier. La production primaire de plante varie entre 400 et 2500 gPS/m²/an avec une production entre 500 et 900 gPS/m²/an pour les seuls épiphytes (Boudouresque et al., 2006a). La fixation du carbone inorganique (CO₂ et HCO₃⁻) lors de la photosynthèse permet la production de matières organiques. Pour éviter une limitation de leur croissance par un manque de CO₂ dissous, les magnoliophytes marines peuvent mettre en place différentes stratégies comme: 1) le pompage actif de CO₂ ou de HCO₃⁻ vers la cellule (HCO₃⁻ bien que beaucoup plus abondant que CO₂ diffuse difficilement de façon passive à travers les membranes cellulaires hydrophobes à cause de sa charge négative), 2) la catalyse enzymatique de la conversion de HCO₃⁻ en CO₂ par l'anhydrase carbonique qui agit dans ou autour de la cellule sans que la concentration globale en CO₂ de l'eau de mer ne soit affectée ou 3) la réduction de HCO₃⁻ par des mécanismes ressemblant à ceux des plantes en C₄ (mais qui peuvent donner lieu à des fractionnements importants). Les feuilles mortes ou dégradées enfouies vers les profondeurs ou sous forme des banquettes au niveau du littoral (Boudouresque et al., 2006b), ce processus conduit à une grande perte de carbone organique. Cependant, il y a une translocation de carbone produit au niveau des feuilles vers les rhizomes (stockage) et les racines (dégradation bactérienne). En plus, la présence d'un recyclage interne chez la *P. oceanica* assure l'absorption d'une grande partie de nutriments organiques dans les feuilles sénescentes (Alcoverro et al., 2000).

P. oceanica a besoin, pour sa croissance, de nutriments inorganiques parmi lesquels l'azote le phosphore et le fer. Les éléments nutritifs sont absorbés par *P. oceanica* soit par les racines au niveau des sédiments soit par les feuilles au niveau de la colonne d'eau (Lepoint et al., 2002a). La

teneur des éléments nutritifs de l'herbier est variable selon la région. La baie de Calvi présente une teneur faible en nutriment avec $0.4 \mu\text{mol.L}^{-1}$ d'azote (Gobert., 2002). L'absorption de l'azote par les racines est supérieure à celle des feuilles (10 fois pour le NH_4^+ et 2 fois pour NO_3^-) (Gobert., 2002). Le NH_4^+ est la forme principale de l'azote assimilée par les herbiers avec une concentration moyenne dans l'eau interstitielle qui varie entre 1 et $180 \mu\text{mol.L}^{-1}$ (Touchette et Burkholder., 2000). Il est produit à partir de la dégradation de l'azote organique par les microorganismes. Les nitrates et les nitrites sont aussi assimilables par *P. oceanica*, soit directement soit après oxydation par des bactéries aérobies (Gobert , 2002).

Le rapport C/N sert à déterminer la proportion des teneurs du carbone assimilée par rapport à celle de l'azote dans les feuilles ou les rhizomes de l'herbier. Selon Di Leonardo et al (2009), le rapport C/N permet de donner une estimation sur les origines des nutriments (anthropiques ou naturelles). Ce rapport dépend de la région, de la saison et de la profondeur (Peirano et al., 2001).

1- Les isotopes stables

Les isotopes d'un même élément chimique existent sous des formes atomiques différentes. Ils présentent le même nombre de protons (Z) mais diffèrent par le nombre de neutrons (N). On dit qu'un isotope est stable lorsque le nombre de protons et le nombre de neutrons sont assez similaires ($\text{N}=\text{Z}$ ou $\text{Z}<\text{N}$ quand l'excès de neutrons est limité), et/ou instable (radioactif) lorsque ($\text{N}<\text{Z}$ ou $\text{N}>\text{Z}$) (Lepoint., 2008). On peut aussi dire qu'un isotope stable correspond à l'équilibre entre les protons et les neutrons à l'intérieur de noyau. Par contre, un isotope instable correspond à l'état de déséquilibre interne du noyau entre les protons et les neutrons. Les isotopes comme ^{13}C et ^{15}N sont appelés des isotopes lourds, car ils présentent un faibles excès de neutrons. Ils sont moins important que les isotopes légers qui eux ont un nombre égal de neutrons et de protons comme ^{12}C et ^{14}N . Les isotopes légers ont une abondance importante dans la nature. Les isotopes stables sont des isotopes non radiogéniques qui existent avec des différents abondances dans la nature. Ils ont le même comportement chimique mais leurs masses différentes les amènent à ont des propriétés physiques différentes. Cette petite différence peut être perceptible au cours d'une période de réaction chimique ou procédé physique au cours duquel les rapports isotopiques varient sous forme de fractionnement isotopique. La composition isotopiques et l'intégration des isotopes par *P. oceanica* sont variables; elles sont dépendantes de la physiologie de la plante et des facteurs environnementaux et saisonniers comme la température et la lumière (Vizzini et al., 2003).

L'analyse des isotopes stables (C et N) permet de mieux comprendre l'écologie des organismes marins. Les isotopes stables du carbone et de l'azote sont de plus en plus utilisés dans les écosystèmes marins et les études environnementaux. Ils permettent notamment d'étudier les réseaux trophiques des herbiers, la physiologie des plantes (chaque producteur primaire peut avoir son propre signature isotopique) (Lepoint et al., 2004) et les cycles du C et du N (Lepoint et al., 2008). En plus, les isotopes stables sont utilisés comme traceurs de la pollution anthropique du

milieu marin (Lassauque et *al.*, 2010). Ainsi, l'utilisation des signatures isotopiques permet de distinguer les sources d'azote inorganique présent dans le milieu (Lepoint et *al.*, 2004). Les rapports d'isotopes stables δ du C et du N sont des valeurs sans dimension (‰). Elles expriment la déviation de composition en isotopes stables de l'échantillon par rapport à un standard. Ces valeurs sont données par la formule suivante (Muccio et Jackson., 2008) :

$$\delta X = (R_{\text{échantillon}} / R_{\text{standard}} - 1) \times 1000.$$

Avec X le ^{13}C ou ^{15}N ; et R le rapport $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ ou $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$.

3-Les objectifs

Les herbiers à *P. oceanica* ont déjà fait l'objet de nombreux travaux sur les contenus élémentaires et les rapports isotopiques du C et du N : les rapport isotopiques (Lepoint et *al.*, 2000; Vizzini et Mazzola., 2003), contenus élémentaires (C, N, P) des faisceaux de *P. oceanica* (Gobert et *al.*, 2005), variations des rapports isotopiques du C et du N chez la *P. oceanica* avec la profondeur (Lepoint et *al.*, 2003). Cependant, aucune étude ne s'est intéressée, à notre connaissance, à l'évolution saisonnière naturelle des contenus en C, N et de leurs rapports isotopiques au fil d'une année à fréquence de mesure hebdomadaire à bimensuelle. Cette étude a pour but de suivre les variations des contenus en C et N (contenus élémentaires) et de leurs rapports isotopiques chez *P. oceanica* au cours du temps en baie de Calvi (Corse). Ces mesures s'inscrivent dans le cadre plus large d'un programme de recherche sur la production primaire de *P. oceanica* des équipes des Profs Borges et Gobert. Les variations observées seront mises en relation avec la photosynthèse, la biométrie et les paramètres environnementaux (lumière, température).

II-MATÉRIELS ET MÉTHODES

1-Description du site d'étude

Cette étude a été réalisée au niveau de la baie de Calvi près de la station de recherches sous-marines et océanographiques STARESO, au Nord-Ouest de Corse (42.580°N 8.725°E).

Cette baie est caractérisée par la présence d'un herbier de *P. oceanica* fort productif qui s'étend de la surface jusqu'à 38 m de profondeur. Cet herbier, pauvre en nutriments (Gobert et al., 2016), est un système LNHC (low nutrient high chlorophyll) (Gobert et al., 2002).



Figure 1: localisation de la station des recherches sous-marine et océanographiques STARESO dans la baie de Calvi (Corse) (Gobert et al., 2002).

2-Échantillonnage

La collecte des échantillons a été réalisée entre le 15 avril 2015 et le 12 juillet 2016, à une profondeur de 10 m. Deux cent cinquante-deux faisceaux de feuilles de posidonie ont été prélevés avec une fréquence hebdomadaire à bimensuelle. L'échantillonnage a été effectué selon la méthode peu invasive de De los Santos et al (2015) qui consiste à couper le faisceau de feuilles 2 cm au-dessus du méristème. L'utilisation de pince et collier de serrage en plastique lors de la collecte et de la conservation des faisceaux permet de maintenir l'ordre d'insertion des feuilles. La troisième feuille (juvénile exclue) de chaque faisceau, mesurée in situ pour son activité photosynthétique et analysée ultérieurement en laboratoire a été marquée selon la méthode de Zieman (Zieman., 1974).

Tableau 1: Les dates et les profondeurs de l'échantillonnage

Profondeur	Date	Nombre de faisceaux
10 m	15/04/2015	6
10 m	22/04/2015	6
10 m	30/04/2015	6
10 m	06/05/2015	6
10 m	12/05/2015	6
10 m	17/05/2015	6
10 m	25/05/2015	6
10 m	05/06/2015	6
10 m	10/06/2015	6
10 m	17/06/2015	6
10 m	23/06/2015	6
10 m	01/07/2015	6
10 m	06/07/2015	6
10 m	13/07/2015	6
10 m	21/07/2015	6
10 m	28/07/2015	6
10 m	04/08/2015	6
10 m	12/08/2015	6
10 m	25/08/2015	6
10 m	03/09/2015	6
10 m	10/09/2015	6
10 m	25/09/2015	6
10 m	19/10/2015	6
10 m	26/10/2015	6
10 m	06/11/2015	6
10 m	10/12/2015	6
10 m	08/01/2016	6
10 m	22/01/2016	6
10 m	05/02/2016	6
10 m	29/02/2016	6
10 m	14/03/2016	6
10 m	29/03/2016	6
10 m	06/04/2016	6
10 m	14/04/2016	6
10 m	26/04/2016	6
10 m	10/05/2016	6
10 m	07/07/2016	6
10 m	12/07/2016	6
3 m	25/06/2015	6
20 m	05/07/2015	6
29 m	02/07/2015	6
36 m	07/07/2015	6

De plus, des échantillonnages le long d'un profil bathymétriques ont été réalisés à des profondeurs de 3, 10, 20, 29 et 36 mètres entre fin juin et début juillet 2015, selon la même méthode.

Les paramètres environnementaux: lumière, température ont été enregistrés en continu in situ.

Les échantillons ont été conservés dans des sachets en plastique au congélateur à une température de -28°C en vue de leur traitement ultérieur au laboratoire d'Océanologie à l'Université de Liège.

2-1-Diving-PAM

L'activité photosynthétique de la *P. oceanica* a été mesurée in situ sur le milieu de la 3ème feuille à la profondeur de 10 mètres (hebdomadaire à bimensuelle) et le long du profil bathymétrique par fluorimétrie avec modulation d'impulsions en amplitude (PAM, Pulse Amplitude Modulation fluorometry) au moyen d'un diving-PAM (Walz Inc.).

Cette technique permet de mesurer l'activité photosynthétique à partir de la fluorescence émise par la chlorophylle a des membranes thylakoïdes des chloroplastes. Lors de la photosynthèse, la chlorophylle a au centre de l'antenne pigmentaire du photosystème PS II capture l'énergie lumineuse.

Cette énergie lumineuse peut soit être transmise sous forme d'électrons énergisés à la chaîne de transport des électrons de la membrane thylacoïdal, soit être dissipée sous forme de chaleur ou de fluorescence (Farineau et Morot-Gaudry., 2006).

Ces trois processus : photochimie, dissipation sous forme de chaleur, émission de fluorescence se déroulent conjointement (Murchie et Lawson., 2013). La technique du diving-PAM consiste à quantifier la photosynthèse à partir de la mesure de la fluorescence réémise par la chlorophylle a, tel qu'expliqué ci-dessous.

L'excitation de la chlorophylle a avec une lumière de faible intensité n'induisant pas de transport d'électrons est appelée F_0 . La réémission de fluorescence après excitation par une impulsion de lumière saturante est appelée F_m . Le rendement de fluorescence (Yield, Y) peut alors être déterminé par l'équation suivante :

$$Y = (F_m - F_0) / F_0 \text{ (Harbinson. et al., 1989 ; Ralph et Gademann., 2005).}$$

F_v est défini comme la différence entre la fluorescence maximale et la fluorescence minimale ($F_v = F_m - F_0$) (Lassauque, 2009).

Le rapport F_v / F_m exprime le rendement quantique photochimique maximal du PS II (Farineau et Morot-Gaudry., 2006).

La relation ci-dessous fournit le rendement photosynthétique effectif :

$$Y = (F'_m - F_t) / F'_m$$

F'_m est plus faible que F_m fournie par une plante adaptée au noir.

A partir du Y, le taux de transport d'électrons au niveau de la membrane thylacoïdal (Electron Transport Rate, ETR) lors de la photosynthèse peut être calculé d'après l'équation suivante :

$$\text{ETR} = \text{PAR} * \text{Y} * 0,5 * \text{AF} \text{ (Ralph et Gademann., 2005)}$$

0,5 est une constante qui représente la distribution des photons entre les deux photosystèmes I et II et AF, le facteur d'absorption de la lumière (pour *P. oceanica* : 0,7 en période estivale et 0,9 dans des conditions de faible luminosité). PAR est défini comme le rayonnement photosynthétique actif. Le PAR, de même que l'ETR sont exprimés en $\mu\text{mol photons.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$. Le PAR est mesuré soit par l'utilisation d'un quantamètre accolé à la fibre optique mesurant la fluorescence, soit par le déploiement d'un quantamètre in situ qui l'enregistre en continu.

Il existe, pour les magnoliophytes marines, une certaine marge d'erreur concernant la constante 0.5 et la valeur d'AF. D'aucun préfèrent donc utiliser le taux de transport d'électrons relatif lorsqu'ils étudient un herbier monospécifique en un même zone d'étude. L'équation simplifiée est la suivante :

$$\text{rETR} = \text{PAR} * \text{Y} \text{ (Ralph et Gademann., 2005).}$$

La photosynthèse dépendant du statut physiologique de la fraction de feuilles analysée, le protocole de mesure in situ de l'activité photosynthétique a été standardisé. Les mesures sont réalisées sur au milieu de la partie convexe de la 3^{ème} feuille (juvéniles exclues), par temps ensoleillé et mer calme.

3-Paramètres environnementaux

La température et la lumière ont été mesurées et enregistrés en continu in situ. Les mesures ont été effectuées à 10 m de profondeur par l'utilisation de deux sondes HOBO Pendant Temperature/Light (Onset Computer Corporation, MA, USA). La première était placée au niveau de l'interface eau-sédiment (pied de l'herbier, à 10 m de profondeur); la seconde était placée au-dessus de la canopée (à 2 m au-dessus de l'interface eau-sédiment, soit à 8 m de profondeur). La température est exprimée en °C et la lumière en Lux (flux lumineux par unité de surface). Des sondes HOBO ont été disposées le long du transect bathymétrique (3, 10, 20, 29 et 36 m) selon cette même configuration. Le PAR a été aussi mesuré à l'aide d'un quantamètre Odyssey (Dataflow System Ltd, New Zealand) qui a été placé à 10 m de profondeur au-dessus de la canopée (soit sur un fond de 12 m). Les mesures de paramètres ont été enregistrées chaque 10 minute.

4- La biométrie

L'analyse biométrique consiste à mesurer les feuilles des faisceaux de *P. oceanica* selon le protocole de Giraud (1979). Les feuilles sont divisées en 3 catégories : les feuilles adultes d'une longueur de plus de 5 cm avec la présence d'un pétiole d'une longueur supérieure à 2 mm; les

feuilles intermédiaires, d'une longueur de plus de 5 cm, dépourvues de pétiole ou avec un pétiole d'une longueur inférieure à 2 mm; les feuilles juvéniles, sans pétiole, d'une longueur ne dépassant pas 5 cm. La méthode d'échantillonnage peut être invasive consistant à couper le faisceau de feuilles au-dessus du méristème, cette distinction entre types de feuilles ne peut être réalisée. De même, le calcul de certains indices selon Giraud (1979) nécessite quelques adaptations. Les résultats obtenus par les deux méthodes d'échantillonnages donnent des résultats biométriques équivalents.

Au laboratoire, une fois le faisceau de feuilles décongelé, les feuilles sont organisées selon leur ordre d'insertion. Ensuite, la longueur et la largeur de chaque feuille sont mesurées, ainsi que l'état de l'apex. Puis, les épiphytes sont grattés à l'aide d'une lame de rasoir (Dauby et Poulicek., 1995). Pour chaque feuille zémanée destinée à l'analyse des contenus en C et N et des isotopes stables, les 20 cm du milieu de la feuille (ou la feuille entière si elle mesure moins de 20 cm) ont été disséqués puis coupés en deux parties égales sur la longueur du fragment (une moitié pour l'analyse des C, N, isotopes stables, l'autre moitié pour les pigments – sujet d'un autre travail de mémoire). L'ensemble des échantillons : faisceaux, fragments destinés aux analyses, épiphytes ont été pesés (poids frais), puis mis à l'étuve pendant 48h à 60°C pour mesurer le poids sec.

Les paramètres biométriques calculés sont:

- Le coefficient A: le pourcentage de feuilles avec un apex brisé ou abimé. Cette dégradation est due à la consommation par les herbivores ou à l'hydrodynamisme et les actions mécaniques (Zupo et Frezi., 1984).

-Surface foliaire par faisceaux: la surface des feuilles par faisceaux en cm². Elle est calculée, selon Giraud (1979) par la formule:

SFtotal = (somme des longueurs des feuilles intermédiaires x moyenne des largeurs des feuilles intermédiaires) + (somme des longueurs des feuilles adultes x moyenne des largeurs des feuilles adultes). Dans ce travail, il est très impossible de distinguer les feuilles adultes des intermédiaires (la méthode utilisée consiste à couper les faisceaux 2 cm au-dessus de méristème) donc la formule suivante a été utilisée:

$$SF_{total} = (\text{somme des longueurs des feuilles} \times \text{moyenne des largeurs des feuilles}).$$

-L'indice foliaire = surface foliaire x la densité de faisceaux de *P. océanica* (tableau de densité; annexe3).

5-Dosage des C, N et isotopes stables

Les demi-longueurs des 20 cm centraux de la 3ème feuille zémanée ont été préparées et analysées selon les étapes détaillées ci-dessous.

5-1-Le broyage

Le broyage des échantillons en une fine poudre homogène a été réalisé au moyen d'une vibro-broyeuse MM 301. Le fonctionnement de la vibro-broyeuse consiste à mettre l'échantillon à l'intérieur d'un bol de broyage en oxyde de zirconium avec une bille de la même matière. Il faut

que le bol soit rempli en suffisance pour assurer le broyage efficace de l'échantillon mais pas en excès pour assurer le mouvement libre de la bille. Le broyage s'effectue en 2 minutes à la fréquence de 23 Hz. Après chaque broyage, le bol et la bille sont nettoyés et séchés.

5-2-La préparation des cupules d'analyse

Les échantillons en poudre et les standards certifiés (IAEA, Vienna, Autria) (sulfate d'ammonium (IAEA-N2, $\delta^{15}\text{N} = 20.3 \pm 0,2\text{‰}$ et sucrose (IAEA-C6, $\delta^{13}\text{C} = -10,8 \pm 0.5\text{‰}$) pour le N et le C, respectivement) sont pesés et déposés dans des cupules en étain selon un protocole qui détermine les masses à peser et l'emplacement des cupules dans les batchs (plaque multi-puits de 12 par 6) d'analyse. Les batchs sont conservés à l'étuve à 52°C jusqu'à analyse.

5-3- L'analyse

Les mesures des rapports isotopiques se font par IRMS (IsoPrime 100, Isoprime, UK) couplé à un analyseur élémentaire (vario MICRO cube, Elementar, Germany) pour les contenus en C et N.

Dans l'analyseur élémentaire, les échantillons sont introduits de manière automatisée par un carrousel d'échantillonneur automatique dans la chambre de combustion dont la température est d'environ 1050°C et l'atmosphère riche en oxygène. Les gaz de cette combustion sont mis en contact avec des catalyseurs d'oxydation pour éviter la formation d'oxydes d'azote (NO_x).

Un flux d'hélium dans la colonne de combustion permet de transporter les CO_2 , NO_2 , NO_x (oxyde d'azote) et H_2O vers la colonne de réduction. Cette colonne contient du cuivre métallique (filament de cuivre) chauffé à 850°C qui permet d'éliminer l'oxygène en excès et réduire les oxydes d'azote (NO_x) en azote moléculaire. Les composés formés dans la colonne de réduction (CO_2 , N_2 et vapeur d'eau) traversent un filtre contenant du perchlorate de magnésium qui permet de piéger la vapeur d'eau. La colonne de chromatographie en phase gazeuse chauffée à 40°C assure la séparation des gaz CO_2 et N_2 (40°C pour N_2 et 120°C pour CO_2). Leur détection est assurée par une sonde à conductivité thermique qui libère un courant proportionnel à la concentration en N_2 et CO_2 . La quantification de contenu en azote et en carbone des échantillons est réalisée à l'aide de l'analyse de standards élémentaires. Après, les gaz produits (CO_2 et N_2) sont envoyés vers l'IRMS par des canaux capillaires. L'IRMS est constitué de plusieurs sections. La source qui ionise les gaz introduits par des électrons. Ensuite, un analyseur de secteur magnétique qui permet de dévier les composés ionisés par leurs masses. Après le collecteur/détecteur de Farady, cette partie est mise en place pour collecter les différents composés et transformer le signal physique en signal numérique qui est affiché dans un ordinateur pour l'acquisition des données.

6-Les analyses et les traitements statistiques

Les logiciels utilisés dans ce travail sont Excel 2013 et R studio. Le logiciel R studio permet de réaliser des corrélations entre les différents paramètres à 10 m. L'ensemble des représentations graphiques ont été réalisé avec Excel 2013. Le test statique de Spearman a été utilisé pour faire les corrélations (tableau de corrélation, annexe 2). Une analyse non paramétrique a été faite par l'utilisation de test de Kruskal-Wallis. Ce test permet de déterminer la significativité des différences entre les paramètres (variation significative lorsque $p < 0.05$).

III- RÉSULTATS

1- Paramètres environnementaux à 10 m de profondeur

La figure 2 représente les variations de température à 10 m de profondeur à l'interface eau-sédiment dans l'herbier à *P. oceanica*. La figure 3 représente l'intensité lumineuse (lux) à l'interface eau-sédiment et à 2 m au-dessus de la canopée de l'herbier. Les valeurs présentées graphiquement sont les moyennes journalières entre 11h et 14h GMT.

Les variations de température montrent un cycle classique caractérisé par des valeurs maximales en été et des valeurs minimales en hiver (Figure 2). La valeur maximale est atteinte le 24 juillet 2015 ($27,97^{\circ}\text{C}$) et la valeur minimale le 14 mars 2015 ($13,60^{\circ}\text{C}$), soit un écart de 14 degrés. Les variations de l'intensité lumineuse à 10 m à l'interface eau-sédiment présentent une saisonnalité très marquée mais différente de celle de la température (Figure 3). Le maximum est enregistré le 24 septembre 2015 (2635 lux) et le minimum le 16 mars 2016 (19 lux). Au 2 m au-dessus de la canopée, les valeurs de l'intensité lumineuse sont systématiquement plus élevées qu'à l'interface eau-sédiment, avec un maximum le 05 juin 2015 (18523 lux) et un minimum le 14 janvier 2016 (430 lux).

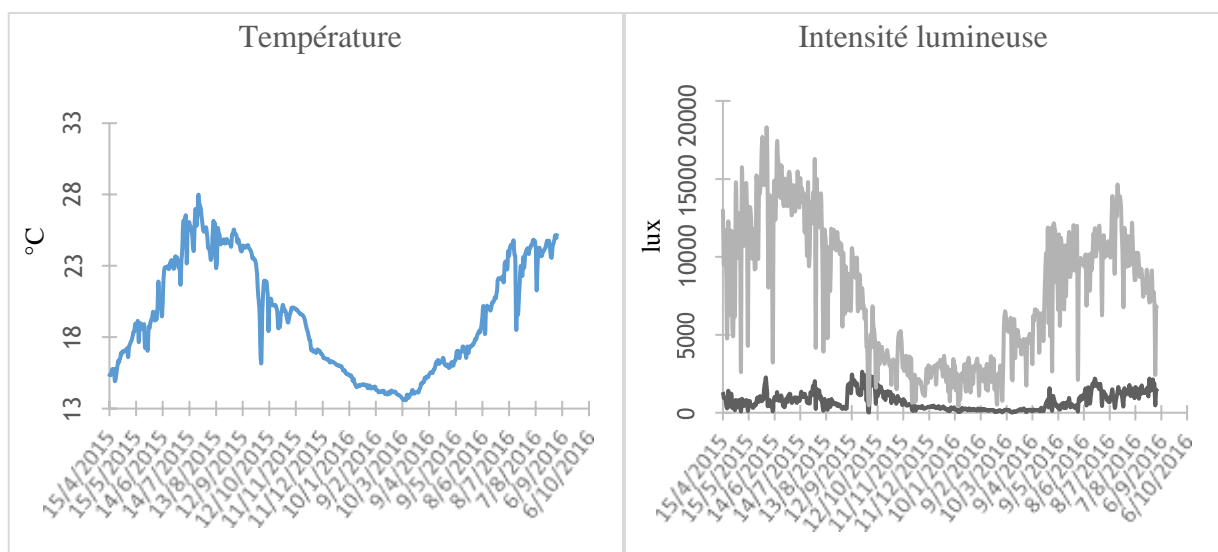


Figure 2 : Evolution de la température à 10 m à l'interface eau-sédiment dans l'herbier *P. oceanica* entre avril 2015 et octobre 2016.

Figure 3 : Evolution de l'intensité lumineuse à 10 m à l'interface eau-sédiment en noir et à 2 m au- dessus de la canopée dans l'herbier *P. oceanica* entre avril 2015 et octobre 2016.

Les variations de PAR mesurées par le quantamètre odyssey à 10 m profondeur au-dessus de la canopée sont présentées dans la figure 4. Tout comme le cycle des lux, l'évolution du PAR montre un cycle avec les maxima en période estivale et les minima dans la période hivernale. La valeur maximale est atteinte le 16 mai 2015 avec $333 \mu\text{mol.photon.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ et la valeur minimale est atteinte le 16 janvier 2016 avec $26,20 \mu\text{mol. photon.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$. Les valeurs présentées graphiquement sont les moyennes journalières entre 11h et 14h GMT. Les variations de l'intensité lumineuse et de la température à 10 m sont décalées l'une par rapport à l'autres d'environ 50 jours pour les maxima et 2 mois entre les minima.

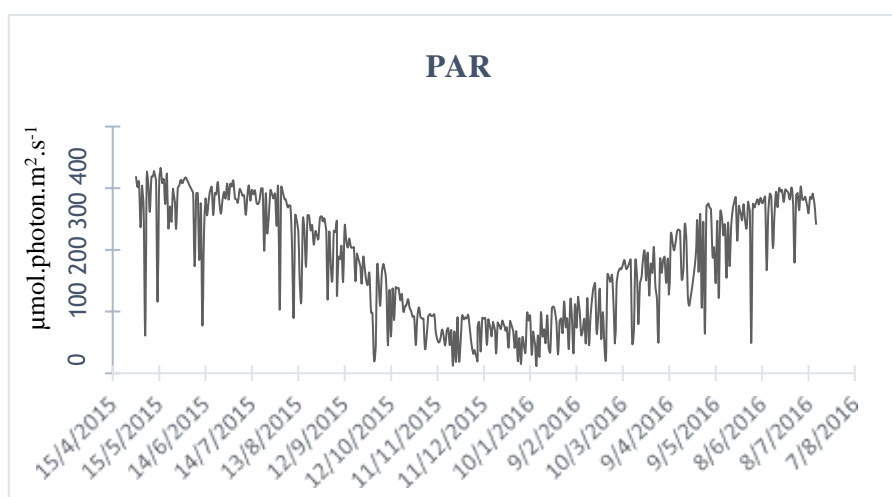


Figure 4 : Evolution du PAR à 10 m au-dessus de la canopée de l'herbier à *P. oceanica*.

2-Paramètres physiologiques

Le taux de transport d'électrons relatif (rETR) est une mesure du taux de transport linéaire des électrons à travers le photosystème II (figure 5). Il correspond à l'efficacité photochimique effective multipliée par l'intensité lumineuse moyenne (au zénith, entre 11h et 14h GMT) le jour des prises de mesures. Le rETR montre un cycle saisonnier avec des maxima en été, des minima en hiver.

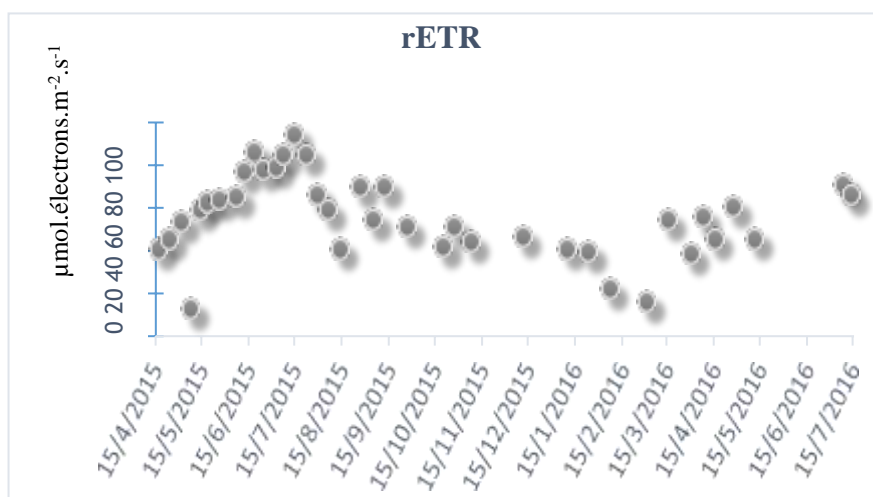


Figure 5: variations hebdomadaire à bimensuelle de taux de transport d'électrons relatif (rETR) moyen (n=6) mesuré à 10 m sur la partie convexe du milieu de la 3ème feuille de *P. oceanica* (feuilles juvéniles exclues).

La variation du taux de transport d'électrons relatif, de la température et de la lumière en fonction de la profondeur entre le 26 juin et 07 juillet 2015 est présentée dans le tableau 1. Les trois paramètres présentent globalement une diminution nette avec la profondeur ($p < 0,05$)

Tableau 2: Evolution de rETR moyen (n=6), ainsi que la lumière et la température en fonction de la profondeur dans l'herbier à *P.oceanica*. Lumière et température sont les moyennes au zénith (entre 11h et 14h GMT) les jours de mesures de l'activité photosynthétique aux différentes profondeurs respectives.

Profondeur (m)	rETR ($\mu\text{mol. électrons.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$)	Lumière (lux)	Température ($^{\circ}\text{C}$)
3	89,60	34227	23,92
10	70,00	15428	23,78
20	50,80	9354	20,86
29	30,30	4487	18,27
36	39,00	2479	16,56

3-Paramètres biométriques

3-1- A 10 m de profondeur

La figure 6 présente les différents paramètres mesurés sur les faisceaux de *P. oceanica*.

Les biomasses sèches des épiphytes et des faisceaux des feuilles varient de manière cyclique et similaire. Les valeurs maximales sont mesurées en été 2016 (12 juillet 2016 avec $0,32 \pm 0,06 \text{ g}_{\text{ps}} \cdot \text{faisceau}^{-1}$ pour les épiphytes et le 07 juillet 2016 avec $1,72 \pm 0,65 \text{ g}_{\text{ps}} \cdot \text{faisceau}^{-1}$ pour la biomasse foliaire). Les valeurs minimales sont mesurées en automne. En octobre, les épiphytes sont pratiquement inexistantes et la biomasse foliaire est de $0,37 \pm 0,11 \text{ g}_{\text{ps}} \cdot \text{faisceau}^{-1}$. Le rapport E/F entre les épiphytes et la biomasse foliaire atteint un maxima de 32% le 22 avril 2015. La longueur maximale des feuilles est de $101,37 \pm 5,89 \text{ cm}$ est mesurée le 10 juin 2015 et le minimum de $31,17 \pm 12,40 \text{ cm}$ le 06 novembre 2015.

Le coefficient A qui est la résultante de broutage et des altérations de l'apex des feuilles (altérations mécaniques par des courants) montre aussi une variation cyclique. Il présente un maximum le 12 août 2015 ($80,55 \pm 12,72\%$) et un minimum le 10 décembre 2015 ($8,92 \pm 7,10\%$). La surface foliaire des faisceaux de *P. oceanica* est maximale en été tandis que minimale en hiver. Le maximum est atteint le 06 juillet 2015 ($374,6 \pm 33,64 \text{ cm}^2$) et le minimum est mesuré le 26 novembre 2015 ($99,25 \pm 20,22 \text{ cm}^2$).

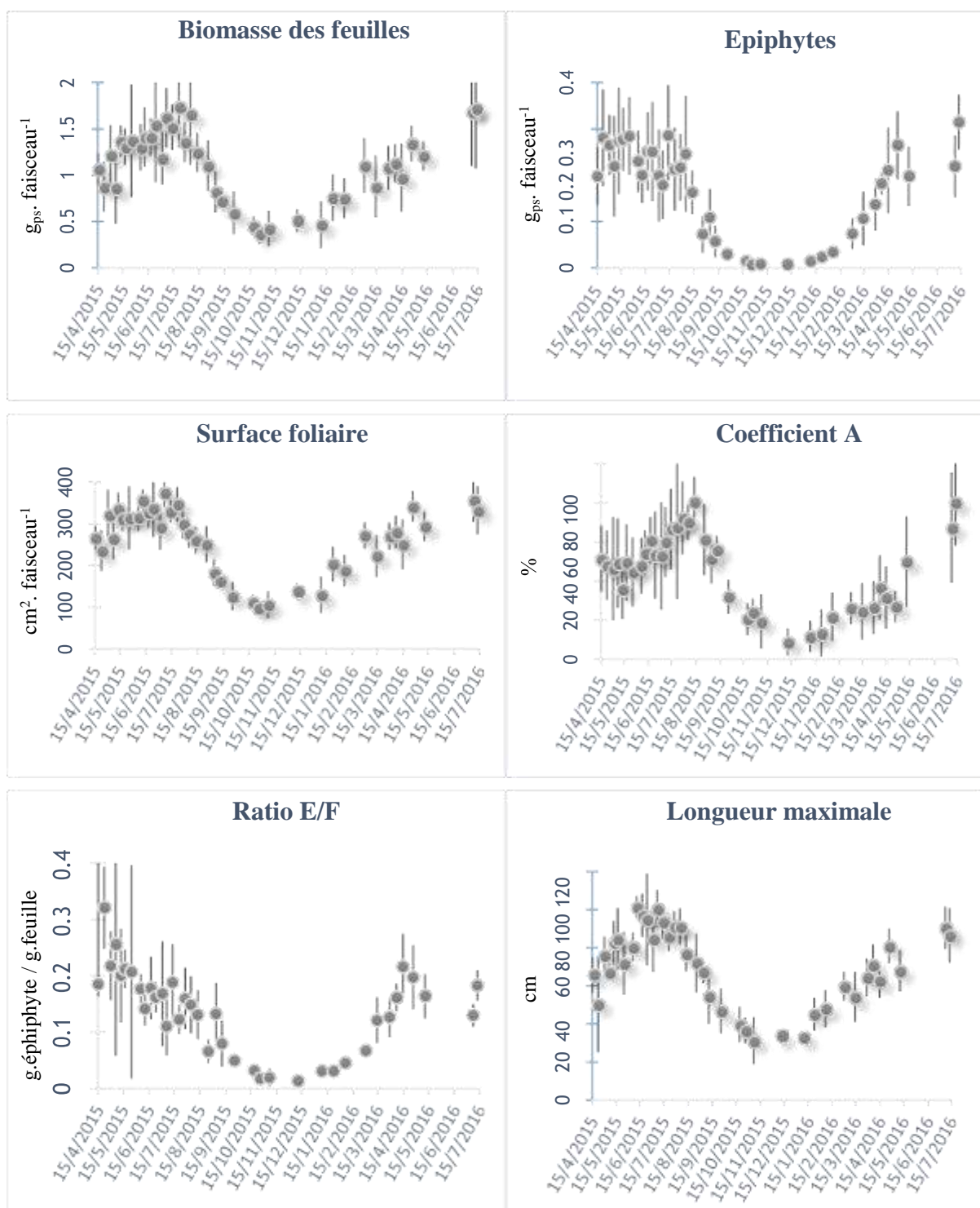


Figure 6 : Evolution hebdomadaire à bimensuelle des paramètres biométriques des faisceaux de *P. oceanica* à 10 m (n= 6, moyenne \pm écart-type) en face de la station de STARESO.

3-2-Le long du profil bathymétrique

Les variations des paramètres biométriques le long du profil bathymétrique dans la baie de Calvi (3, 10, 20, 29 et 36 m de profondeur) sont représentées à la figure 7. De manière générale, l'ensemble des paramètres biométriques diminue avec la profondeur. Sauf pour la surface foliaire où le maximum est observé à 20 m de profondeur ($p < 0.05$).

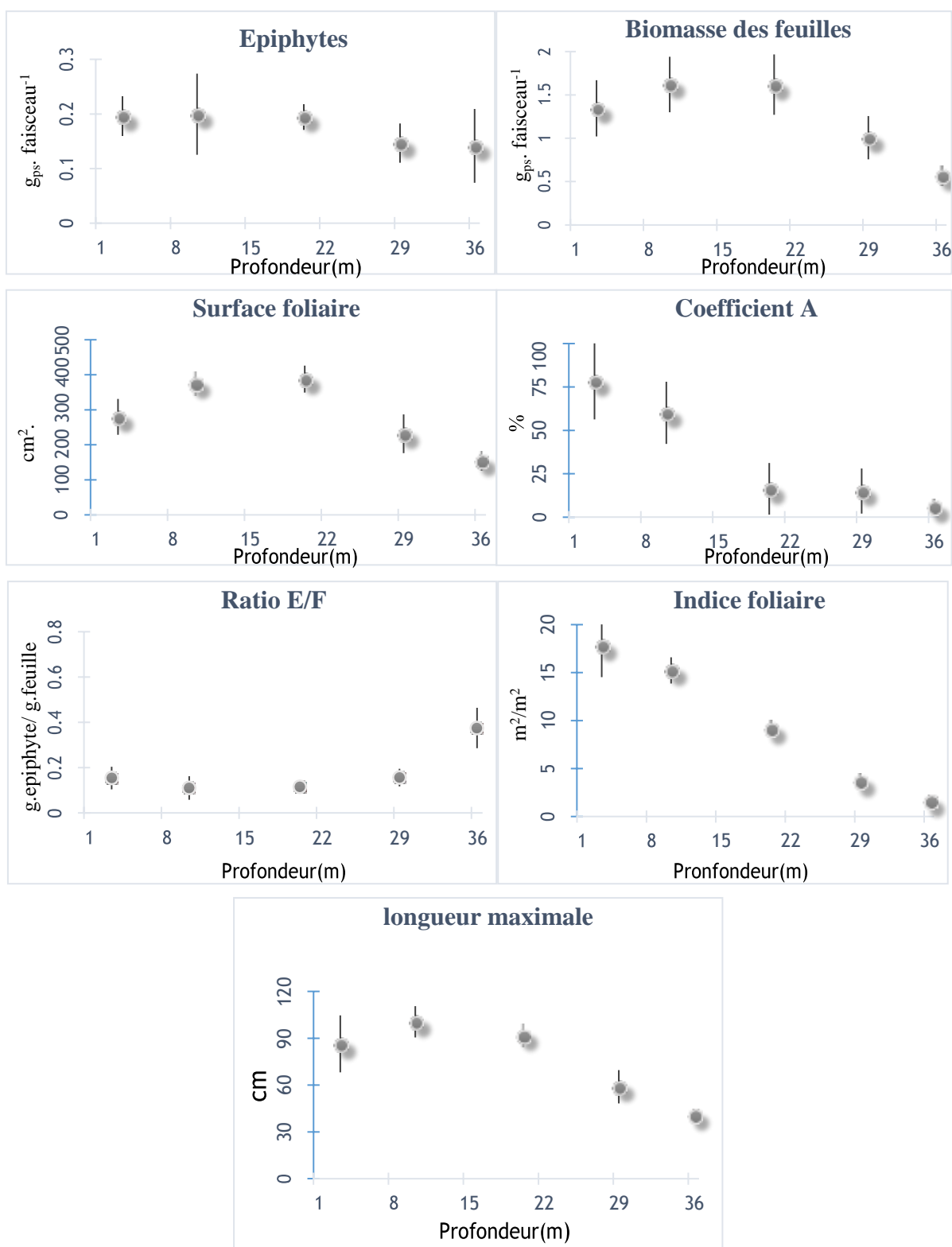


Figure 7 : Paramètres biométriques des faisceaux de *P. oceanica* à 3, 10, 20, 29 et 36 m de profondeur en juin –juillet (n=6, moyenne \pm écart-type) en face de la station de STARESO.

4-Les contenus élémentaires et les isotopes stables

Les contenus de l'échantillon dosé (moitié longitudinale des 20 cm du milieu de la 3^{ème} feuille intermédiaire) sont considérés comme un proxy de l'ensemble du faisceau de feuilles. La quantité en C et en N est calculée à partir de pourcentage de ces derniers dans les échantillons (annexe 1)

4-1- A 10 m de profondeur

La figure 8 présente les variations des contenus élémentaires (C et N) et les rapports isotopiques (^{13}C et ^{15}N) mesurés dans les feuilles de *P. oceanica*.

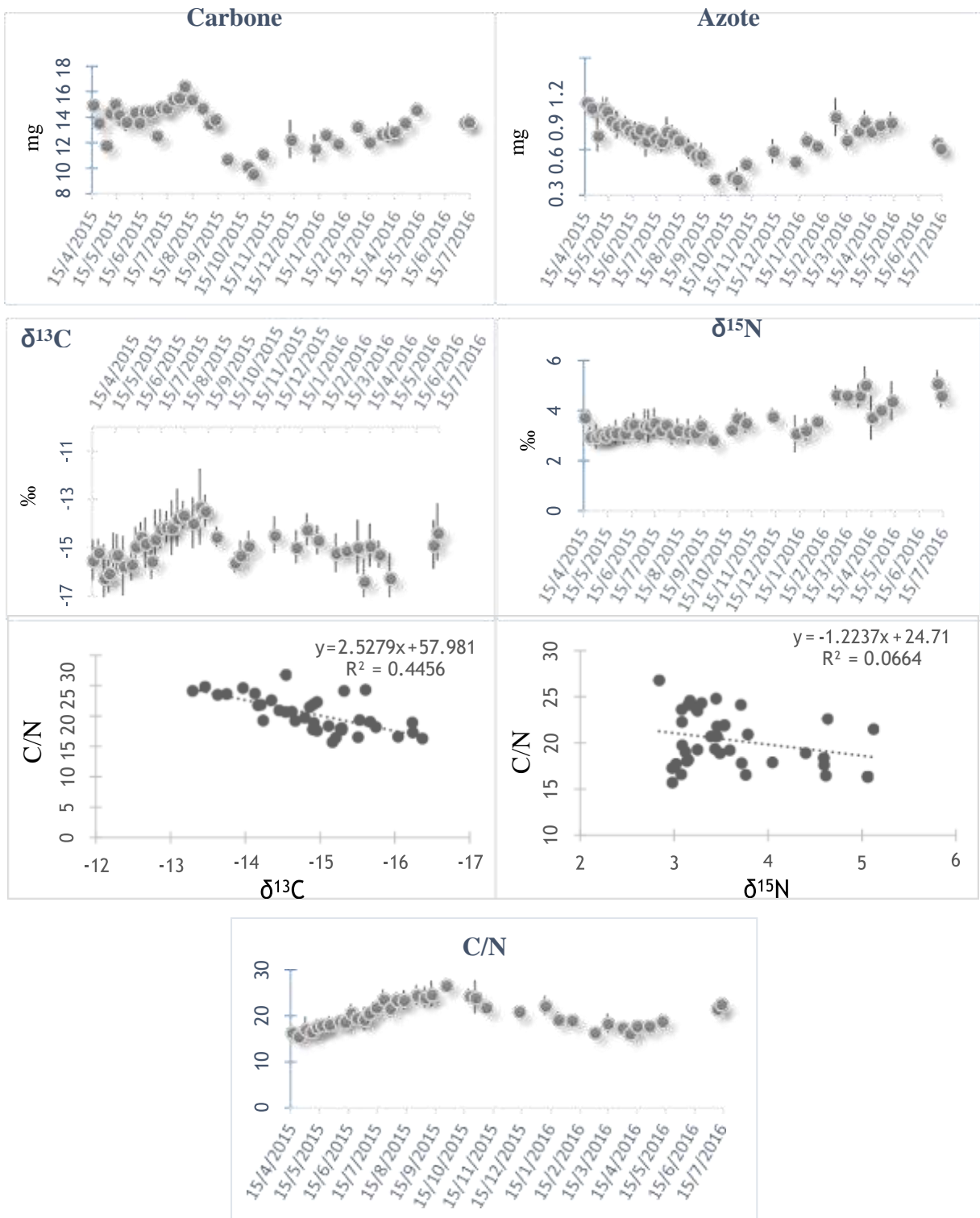


Figure 8 : Evolution hebdomadaire à bimensuelle des contenus élémentaires (C et N) et les rapports isotopiques (^{13}C et ^{15}N) dans les feuilles de *P. oceanica* à 10 m (n=6, moyenne \pm écart-type). Le rapport C/N et les relations entre rapport isotopiques et rapport C/N sont également présentées.

La variation de la quantité du carbone suit un cycle saisonnier, avec des valeurs maximales en été et des valeurs minimales en automne. Le maximum est atteint le 04 août 2015 avec $16,48 \pm 0,70$ mg et le minimum est mesuré le 26 octobre 2015 avec $9,65 \pm 0,41$ mg. Pour l'azote, la variation saisonnière présente des valeurs maximales au printemps et des valeurs minimales au début d'automne. Le maximum est atteint le 15 avril 2015 avec $0,91 \pm 0,04$ mg et le minimum le 26 octobre 2015 avec $0,40 \pm 0,037$ mg. Pour les rapports isotopiques, le $\delta^{13}\text{C}$ montre une augmentation entre le printemps et l'été 2015 suivie d'une diminution à partir l'automne jusqu'en printemps 2016 et d'une nouvelle augmentation au début de l'été 2016. Le maximum est calculé le 03 septembre 2015 ($-13,30 \pm 1,58\%$) et le minimum le 06 avril 2016 ($-16,37 \pm 0,91\%$). Le $\delta^{15}\text{N}$ ne montre pas de variation jusqu'en octobre 2015 et reste stable à environ 3 ‰. Il augmente ensuite jusqu'à atteindre la valeur maximale le 07 juillet 2016 ($5.12 \pm 0.50\%$). Le rapport C/N présente aussi un cycle saisonnier avec des valeurs maximales en automne et des valeurs minimales au printemps. Le $\delta^{13}\text{C}$ diminue avec la diminution de rapport C/N tandis que $\delta^{15}\text{N}$ augmente faiblement avec la diminution de rapport C/N.

4-2-Le long du profil bathymétrique

La figure 9 représente les variations des contenus élémentaires (C et N) et les rapports isotopiques ($\delta^{13}\text{C}$ et $\delta^{15}\text{N}$) mesurés dans les feuilles de *P. oceanica* le long du profil bathymétrique. L'ensemble de des paramètres diminue de manière générale avec la profondeur ($p < 0.05$).

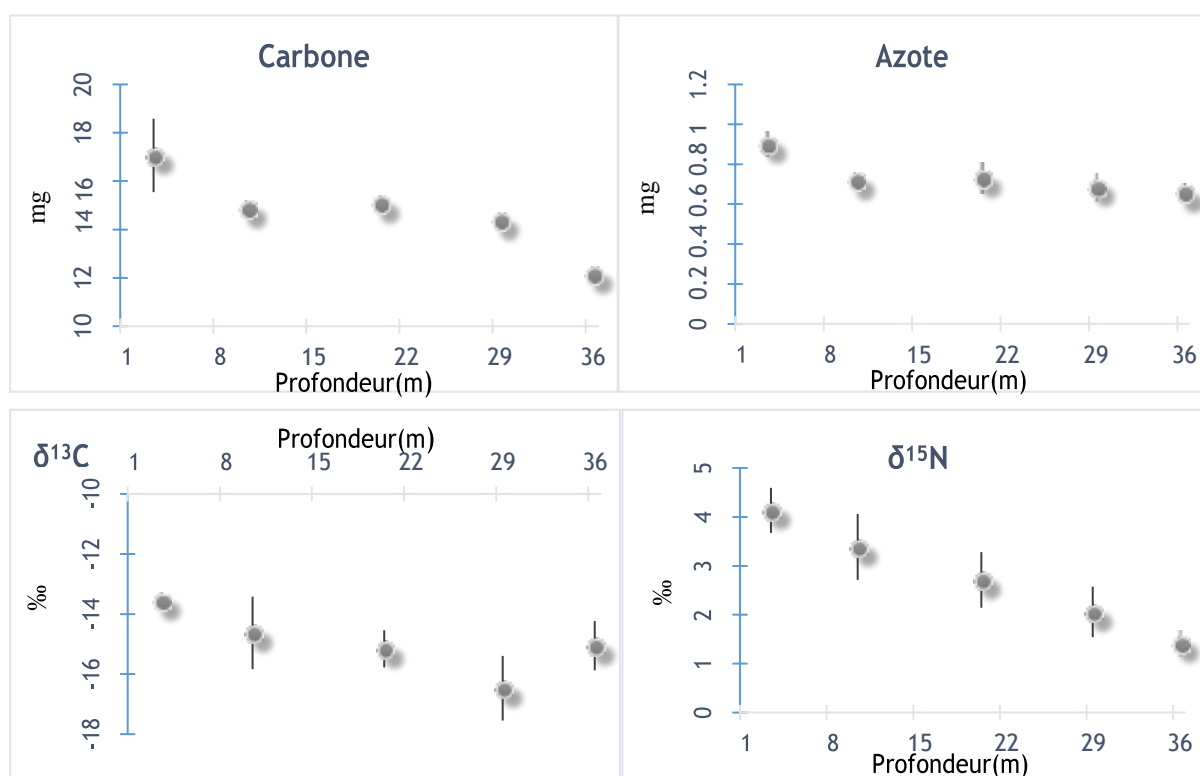


Figure 9 : les variations des contenus élémentaires (C et N) et rapports isotopiques ($\delta^{13}\text{C}$ et $\delta^{15}\text{N}$) en fonction de la profondeur (3, 10, 20, 29 et 36 m) dans les faisceaux de *P. oceanica* récoltés en face de la station de STARESO.

IV- DISCUSSION

1-Les paramètres environnementaux à 10 m de profondeur

Les variations de température et de lumière (Lux et PAR) dépendent directement de l'ensoleillement et des conditions météorologiques. Ils atteignent leurs maxima en été et leurs minima en hiver. En hiver, les journées courtes et la réfraction élevée de la lumière réduisent l'ensoleillement. Tandis que, les journées sont longues et la réfraction de la lumière est faible en été. De plus, la turbidité élevée influencée par la remise en suspension des particules (Dauby et *al.*, 1995) pendant les tempêtes hivernales réduit la quantité de lumière qui pénètre dans l'eau. Selon Gobert (2002), la lumière qui atteint *P. oceanica* à 10 m de profondeur représente 15% de la lumière en surface pendant l'hiver et de 30% en été.

Le décalage entre les maxima et les minima de lumière et de température de l'eau est dû à l'inertie thermique des masses d'eau. Cela conduit à une diminution plus tardive dans l'année de la température de l'eau par rapport à l'ensoleillement. Ainsi que le réchauffement et la stratification progressive de la colonne d'eau sous l'action de soleil.

L'intensité lumineuse au-dessus de la canopée est plus importante que celle enregistrée à l'interface eau-sédiment. Cela peut être dû à l'effet d'ombrage de l'herbier. De plus, l'écart vertical de 2 m entre les deux niveaux de mesures: à l'interface sédiment et au-dessus de la canopée participe mais dans une moindre mesure à cette différence d'intensité enregistrée. L'écart entre le maximum de l'intensité lumineuse mesuré au niveau de l'interface eau-sédiment (en septembre 2015) et celui qui a mesuré au-dessus de la canopée (en juin 2015) s'explique par la chute des feuilles sénescentes à la fin de mois d'août (diminution de l'effet de l'ombrage).

2-Les paramètres physiologiques

L'activité photosynthétique exprimée en terme de taux de transfert d'électrons relatif dépend des paramètres environnementaux (lumière et température). Elle est positivement corrélée à l'intensité lumineuse ($r=0,75$) et à la température ($r=0,65$). Lee et *al* (2007) montre l'importance de la température et la lumière sur l'activité photosynthétique des magnoliophytes marines. D'après Laussauque (2009), le rendement de l'activité photosynthétique diminue lorsque la température diminue (puisque les basses températures diminuent la capacité de l'absorption de la lumière). il y a parfois le phénomène de photo-inhibition qui se met en place lors d'exposition lumineuse intense (diminution de rendement photosynthétique) (Larkun et *al.*, 2006).

L'activité photosynthétique est réduite en fonction de la profondeur. Cette réduction est en corrélation avec la diminution de la lumière et de la température ($r=0,90$ et $r=0,88$, respectivement) (Tableau 1).

3-Les paramètres biométriques

3-1-A 10 m de profondeur

Les biomasses sèches des épiphytes et des feuilles montrent des variations cycliques saisonnières similaires. La corrélation entre ces deux paramètres est très forte ($r=0,81$) et s'explique par le fait que les feuilles servent de substrat pour l'installation des épiphytes. Le maximum de biomasse foliaire est mesuré en période estivale qui coïncide avec la longueur maximale des feuilles; ces résultats sont en accord avec les observations de Gobert (2002). Les minima de biomasse foliaire sont mesurés en hiver et s'expliquent par la chute des feuilles sénescentes et le renouvellement des faisceaux à la fin août (Gobert., 2002). Une fois tombées, les feuilles sénescentes (plus âgées) et fort épiphytées laissent place à des feuilles jeunes peu épiphytées.

La surface foliaire est de même très corrélée avec la biomasse des épiphytes ($r=0,80$) puisque l'installation de ces derniers dépend directement de la surface de colonisation disponible. La diminution de la surface foliaire à la fin de la période estivale suite à la chute des feuilles et au renouvellement des faisceaux s'exprime par la forte corrélation entre ces deux paramètres ($r=0,92$).

L'altération physique des feuilles exprimée par le coefficient A est due au broutage des herbivores et à l'hydrodynamisme. Les valeurs maximales sont calculées en été. Ce résultat est en accord avec celui des observations de Jadot et al (2002) qui montre que les maxima de coefficient A coïncident avec une occurrence du poisson *Sarpa salpa* à 10 m de profondeur en été au niveau de la baie de Calvi. En hiver, les adultes de *Sarpa salpa* se déplacent et migrent vers les grandes profondeurs (Peirano et al., 2001). La pression de broutage par *Sarpa salpa* sur les feuilles de *P. oceanica* est importante. En effet, cette espèce peut consommer 15% de la biomasse foliaire de l'herbier (Havelange et al., 1997). L'altération des feuilles en hiver est principalement due aux tempêtes (Gobert, 2002).

La biomasse foliaire est très corrélée avec l'intensité lumineuse (lux et PAR avec $r=0,72$; $r=0,75$; respectivement). Elle présente une faible corrélation avec la température ($r=0,45$). La surface foliaire est également corrélée au PAR ($r=0,71$).

3-2-Le long de profil bathymétrique:

En général, les paramètres biométriques diminuent avec la profondeur ($p<0,05$) (Figure 7). Cette diminution est liée à la diminution de la lumière et de la température avec la profondeur. La croissance de l'herbier est influencée en premier temps par la lumière (Pirc., 1986). Dans la baie de Calvi, les maxima de l'ensemble des paramètres biométriques se mesurent à 10 m de profondeur. Ce résultat est en accord avec de celui de Soullard et al (1994).

La diminution de la biomasse des feuilles est plus rapide entre 20 m et 36 m qu'entre 0 m et 20 m. Ce résultat est similaire avec celui de Gobert et *al* (2003).

4- Les contenus élémentaires et les rapports isotopiques

4-1-A 10 m de profondeur

Les variations de la quantité d'azote montrent une saisonnalité marquée avec des valeurs maximales au printemps et des valeurs minimales au début de l'automne. Ces résultats sont en accord avec les observations de Fourqurean et *al.* (2007) sur *P. oceanica* et Pedersen et Borum (1993) sur *Zostera marina*. La quantité d'azote est faiblement corrélée avec l'intensité lumineuse ($r=0,27$) et la température ($r=-0,31$). Les valeurs d'azote commencent à diminuer au printemps jusqu'au début de l'automne à cause de sa dilution et de son utilisation pour le métabolisme de la plante (Lepoint et *al.*, 2002b) et de la diminution de l'azote disponible dans le milieu environnant. Ainsi, la demande de la plante en N pour sa croissance dépasse la disponibilité en azote dans l'environnement. L'augmentation de l'azote à partir de l'automne traduit la formation de réserves par la plante. Ces résultats sont en accord avec ceux de Vizzini et *al* (2003). La *P. oceanica* stocke l'azote sous forme de protéines solubles et d'acides aminés (Invers et *al.*, 2002). Le système de recyclage de l'azote permet de le transférer des feuilles adultes vers les feuilles juvéniles et ainsi assurer les besoins en azote des feuilles. Ainsi, la quantité d'azote diminue avec l'âge des feuilles. Les sources d'azote pendant la période hivernale sont plus importantes suite au brassage des masses d'eaux et à la diffusion des nutriments des sédiments (Gobert et *al.*, 2002). Selon Lepoint et *al* (2002a), l'assimilation de l'azote inorganique de la colonne d'eau par les feuilles représente jusqu'à 40% des besoins annuels de l'herbier. L'absorption de l'azote est très importante en hiver et au début de printemps qui coïncide avec des concentrations élevées de nitrate dans la colonne d'eau de la baie de Calvi (Lepoint et *al.*, 2002b). Les rhizomes peuvent jouer un rôle important dans la formation de réserves des nutriments. D'après Invers et *al* (2002), l'azote stocké dans les rhizomes est deux à quatre fois supérieur à celui des feuilles. Les rhizomes sont considérés comme l'organe de stockage des nutriments pendant la période hivernale et permet la remobilisation des éléments nutritifs quand la plante en a besoin pour sa croissance (l'azote stocké dans les feuilles est le premier à être remobilisé avant celui des rhizomes).

On peut ainsi résumer que la variation de la quantité de l'azote dans les feuilles de *P. oceanica* est contrôlée par 3 processus : son acquisition à partir du milieu environnant, sa dilution lors de la croissance de la plante et sa remobilisation interne.

La quantité de carbone montre une saisonnalité bien marquée avec des maxima en été et des minima en automne. Les résultats obtenus sont en accord avec les travaux antérieurs sur les contenus élémentaires chez *P. oceanica* de Fourqurean et *al.* (2007) et Gobert et *al* (2005). Les

sources de carbone dans le milieu sont le dioxyde de carbone (CO_2) dissous et le bicarbonate (HCO_3^-). L'herbier utilise soit le CO_2 soit le HCO_3^- ou un mélange des deux (Fry., 2006). La quantité de carbone fixé dépend directement de l'activité photosynthétique ($r=0,63$). En été, l'intensité lumineuse maximale et la température élevée induisent une activité photosynthétique importante qui résulte en une fixation plus importante de carbone alors qu'en hiver l'activité photosynthétique est réduite (Figure 5). La diminution de la quantité de carbone à partir de la fin d'août correspond à la chute des feuilles sénescentes et au renouvellement des faisceaux. Les jeunes feuilles présentent des valeurs faibles de teneurs en carbone. Le recyclage de carbone des feuilles adultes vers les rhizomes et les racines mais est resté insuffisant pour compenser cette perte. Cependant, grâce à la mobilisation des stocks et de réserves de carbone (carbone stocké à la fin d'été sous forme de carbohydrates), *P. oceanica* est capable de pousser en hiver malgré un bilan négatif en carbone qu'elle utilise pour ses besoins internes. D'autres études montrent que les réserves accumulées pendant l'été permettent à *P. oceanica* d'hiverner (Pirc., 1985 ; Vizzini et al., 2001). La quantité de carbone suit la même variation saisonnière que la biomasse des feuilles, ce qui se traduit par une forte corrélation entre les deux variables ($r=0,76$). Ainsi, le bilan de carbone positif en été résulte de la fixation de ce dernier durant la photosynthèse, tandis que le bilan négatif en hiver traduit son utilisation pour maintenir le métabolisme de la plante non compensé par l'activité photosynthétique (Alcoverro et al., 2001).

Le rapport C/N présente aussi un cycle saisonnier. Les valeurs du rapport C/N sont comprises entre 15 et 27; avec des maxima en été qui reflètent l'augmentation du carbone et la diminution de l'azote. Inversement, les valeurs minimales sont mesurées en hiver suite à l'augmentation de l'azote et la diminution du carbone. Ce résultat est en accord avec celui de Fourqurean et al (2007) mais avec un décalage entre les valeurs de C/N (les valeurs sont comprises entre 17,6 et 31,2).

La variation du $\delta^{13}\text{C}$ est comprise entre -16,24 et -13,29. Ces valeurs correspondent à celles de la littérature (Lepoint et al., 2003 ; Vizzini et al., 2003)(tableau 2). L'augmentation des valeurs de $\delta^{13}\text{C}$ du printemps à l'été est induite par l'activité photosynthétique importante due à l'augmentation de la lumière et de la température. Ces conditions conduisent à une faible discrimination du ^{13}C donc une augmentation de ses valeurs. En fin de période estivale, la diminution de l'activité photosynthétique entraîne une forte discrimination du ^{13}C . Les valeurs de $\delta^{13}\text{C}$ sont alors très négatives par rapport à celles des sources de carbone inorganique. Souvent, la plante fixe le ^{12}C au détriment du ^{13}C durant la photosynthèse. La sélectivité du carbone est produite par l'activité enzymatique de la RUBISCO lors de la carboxylation (Raven et al., 2002).

Les valeurs de $\delta^{15}\text{N}$ ne montrent pas de grandes variations au cours de l'année si ce n'est une augmentation marquée à la fin de l'hiver, début du printemps 2016. Cette augmentation peut être

expliquée par la demande métabolique élevée en azote à cette période qui conduit à une faible discrimination vis-à-vis du ^{15}N (et donc une augmentation des valeurs du $\delta^{15}\text{N}$) (Fourqurean et *al.*, 2007). De plus, la disponibilité importante des nutriments (en particulier les nitrates) au printemps 2016 (Gobert, communication personnelle) a pu influencer les valeurs de $\delta^{15}\text{N}$ en été et selon Michener et Schell (1994), les nitrates sont plus riches en ^{15}N . L'impact de l'activité anthropique joue un rôle important sur l'enrichissement de milieu en nutriments par le port de STARESO (mais avec un effet très localisé) (Vemeulen et *al.*, 2011).

Tableau 3: tableau de comparaison entre les valeurs de $\delta^{13}\text{C}$ et $\delta^{15}\text{N}$

	Espèce		$\delta^{13}\text{C}$ (‰)	$\delta^{15}\text{N}$ (‰)	Le site
Lepoint et <i>al</i> (2003)	<i>P. oceanica</i>	Maximum	-10,8	3,9	Baie de revellata
		Minimum	-19,7	0,3	
Fourqurean et <i>al</i> (2007)	<i>P. oceanica</i>	Maximum	-9,6	7,1	Ile de Baléare
		Minimum	-15,9	1,6	
	<i>Cymodocea</i>	Maximum	-5,3	6,2	
	<i>nodosa</i>	minimum	-9,9	0,4	

La corrélation entre le rapport C/N et le $\delta^{13}\text{C}$ est forte ($r=0,65$). Donc, on peut estimer que la variation de $\delta^{13}\text{C}$ est influencée par la quantité interne de carbone. Le rapport C/N est faiblement corrélé au $\delta^{15}\text{N}$ et dépend donc peu de la quantité d'azote assimilé par plante ($r=0,02$).

4-2-Le long du profil bathymétrique

La quantité du carbone diminue avec la profondeur. Les variations observées ne sont pas significatives ($p>0,05$) (les profondeurs 3 et 36 m diffèrent de 10, 20 et 29 m). Cette diminution est liée à la photosynthèse (qui elle-même dépend des paramètres environnementaux lumière et température). De plus, la physiologie des plantes et le métabolisme lent de l'herbier réduisent la demande en carbone dans les eaux profondes.

De même que pour le carbone, les teneurs maximales et minimales en azote sont mesurées aux profondeurs extrêmes (3 et 36 m). La valeur élevée à 3 m peut être expliquée par le besoin interne élevé de la plante. Tandis que, la valeur minimale à 36 m est induite aussi par la diminution des besoins internes de l'herbier. Aux autres profondeurs, la concentration en azote reste constante.

La variation de la quantité de carbone est en forte corrélation avec celle de l'azote ($r=0,98$). En surface, la fixation importante de carbone coïncide avec une quantité élevée d'azote accumulé par

la plante pour ses besoins. Tandis que pour les eaux profondes, la demande faible en carbone traduit par le métabolisme lent de la plante.

Les valeurs de $\delta^{13}\text{C}$ diminuent avec la profondeur ($p>0,05$). Cette diminution est liée à la réduction de la photosynthèse ($r=0,90$). Ce résultat est en accord avec celui de l'étude de Fourqurean et al (2007) sur *P. oceanica* dans les îles Baléares. Le HCO_3^- présente des valeurs de $\delta^{13}\text{C}$ moins négatives que le CO_2 (Raven et al., 2002). L'augmentation de la valeur de $\delta^{13}\text{C}$ à 36 m coïncide avec la ré-augmentation de l'activité photosynthétique à la limite inférieure de l'herbier. Des travaux expérimentaux ont étudié l'effet de l'ombrage sur le ^{13}C (Serrano et al., 2011). Les résultats obtenus montrent que l'effet de l'ombrage se traduit par une diminution des valeurs de $\delta^{13}\text{C}$ et ce même pendant la période estivale (suivi bathymétrique du présent travail en juin-juillet). Cette diminution expérimentale de la lumière par ombrage reflète la diminution naturelle le long du profil bathymétrique qui donne les valeurs de $\delta^{13}\text{C}$ plus négatives.

Ainsi, Les valeurs de $\delta^{15}\text{N}$ diminuent avec la profondeur ($p>0,05$). Ces résultats ne sont pas en accord avec les observations de Lepoint et al (2003) qui ne montrent pas de diminution du $\delta^{15}\text{N}$ avec la profondeur. La diminution du $\delta^{15}\text{N}$ mesurée en juin-juillet dans le cadre de cette étude peut s'expliquer par la diminution des besoins métaboliques de la plante qui diminue avec la profondeur. En surface, les besoins en azote sont maximaux en réponse à la forte activité photosynthétique ($r=0,88$). Par contre dans les eaux profondes, les besoins métaboliques de l'herbier sont faibles et sa croissance est lente.

V- CONCLUSION

Ce travail a pour but d'évaluer les variations temporelles des contenus en C et N et des rapports isotopiques du C et du N dans la 3ème feuille de *P. oceanica* en relation avec la photosynthèse, la biométrie et les facteurs environnementaux.

A 10 m, les contenus élémentaires montrent un cycle saisonnier avec des maxima en été pour C, des maxima au début de printemps pour N et des minima sont en automne pour les deux éléments. Le cycle du $\delta^{13}\text{C}$ suit la même tendance que celle du C, tandis que le $\delta^{15}\text{N}$ ne présente pas de cycle bien déterminé, si ce n'est une augmentation importante au printemps 2016. Les cycles saisonniers des contenus élémentaires et du $\delta^{13}\text{C}$ dépendent de l'activité photosynthétique qui est elle-même contrôlée par les facteurs environnementaux (lumière et température). La variation de $\delta^{15}\text{N}$ est influencée par les besoins internes de la plante et les concentrations des nutriments au milieu.

Les teneurs en C, en N et les valeurs de leurs rapports isotopiques tendent de manière générale à diminuer avec la profondeur. Cette diminution est en accord avec la diminution avec la profondeur du métabolisme des plantes et des valeurs des facteurs environnementaux (lumière et température).

En général, les rapports isotopiques sont influencés par plusieurs paramètres: l'intensité lumineuse, la température, la variabilité des processus biochimique d'utilisation des isotopes, utilisation différentielle des HCO_3^- et CO_2 (pour le ^{13}C) et la différence entre la discrimination enzymatique.

La variation saisonnière à 10 m et le long du profil bathymétrique de l'activité photosynthétique et des paramètres biométriques montre les mêmes tendances connus dans la littérature scientifique.

Dans le futur, il serait intéressant de réaliser des travaux sur la dynamique bathymétrique des paramètres suivis: photosynthèse, biométrie, contenus élémentaires et rapports isotopiques aux différentes saisons de l'année. De plus, il serait intéressant de pouvoir relier ces paramètres à la productivité de l'herbier. Enfin, les valeurs seuils des rapports C/N et des rapports isotopiques delta $\delta^{15}\text{N}$ et delta $\delta^{13}\text{C}$ définis pour l'herbier sain de Calvi pourront servir de référentiels dans l'étude de sites anthropisés.

VI-RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ALCOVERRO T., MANZANERA M., ROMERO J., 2000. Nutrient mass balance of the seagrass *Posidonia oceanica*: the importance of nutrient retranslocation. Vol. 194 : pp 13-21.

ALCOVERRO T., MANZANERA M., ROMERO J., 2001. Annual metabolic carbon balance of the seagrass *P. oceanica* : the importance of carbohydrate reserves. *Mar Ecol Prog Ser* 211 : pp 105- 116.

BAY D., 1984. A field study of the growth dynamics and productivity of *Posidonia oceanica* (L.) delile in Calvi Bay, Corsica. *Aquatic Botany*. Volume 20, Issues 1-2 : pp 43-64.

BOROWITZKA M.A., LAVERY P.S., KEULEN M.V., 2006. Epiphytes of seagrasses. In :Larkum A.W.D. et al.,eds. *Seagrasses: Biology, Ecology and Conservation*. Dordrecht, the Netherlands: Springer, pp 441– 461.

BOUDOURESQUE C.F., MEINESZ A., 1982. Découverte de l'herbier de posidonie. *Cahier Parc National de Port Cros*, Fr. 4 : pp 1-79.

BOUDOURESQUE C.F., 2004. Marine biodiversity in the Mediterranean: status of species, pollution and communities. *Sci. Rep. Port-Cros natl Park*, 20 : pp 97-146.

- BOUDOURESQUE C.F., BERNARD G., BONHOMME P., CHARBONNEL E., DIVIACCO G., MEINESZ A., PERGENT G., PERGENT-MARTINI C., RUITTON S., TUNESI L., 2006a. Préservation et conservation des herbiers à *Posidonia oceanica*. RAMOGE pub.
- BOUDOURESQUE C.F., MAYOT N., PERGENT G., 2006b. The outstanding traits of the functioning of the *Posidonia oceanica* seagrass ecosystem. *Biol Mar Medit* 13 (4) : pp 109-113.
- CAYE G., ROSSIGNOL M., 1983. Etude des variations saisonnières de la croissance des feuilles et des racines de *Posidonia oceanica*. *Marine Biology* 75 : pp 79-88.
- COOPER L.W., DE NIRO M.J., 1989. Stable carbon isotope variability in the seagrass *Posidonia oceanica*: evidence for light intensity effects. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 50 : pp 225–229.
- DAUBY P., POULICEK M., 1995. Methods for removing epiphytes from seagrasses : SEM observations on treated leaves. *Aquat Bot* 52 (3) : pp 217-228
- DE LOS SANTOS C.B., VICENCIO-RAMMSY B., LEPOINT G., REMY F., BOUMA T.J., GOBERT S., 2015. Ontogenic variation and effect of collection procedure on leaf biomechanical properties of mediterranean seagrass *Posidonia oceanica* (L.) Delile. *Marine Ecology*. ISSN 0173-9565 : pp 1-10.
- DAUBY P., POULICEK M., 1995. Methods for removing epiphytes from seagrasses : SEM observations on treated leaves. *Aquat Bot* 52 (3) : pp 217-228.
- DI LEONARDO R., VIZZINI S., BELLANCA A., MAZZOLA A., 2009. Sedimentary record of anthropogenic contaminants (trace metals and PAHs) and organic matter in a Mediterranean coastal area (Gulf of Palermo, Italy). *Journal of Marine Systems* 78 : pp 136–145.
- ELKALAY K., FRANGOULIS C., SKLIRIS N., GOFFART A., GOBERT S, LEPOINT G, HECQ J., 2003. A model of the seasonal dynamics of biomass and production of the seagrass *Posidonia oceanica* in the Bay of Calvi (Northwestern Mediterranean). Volume 167, Issues 1–2 : pp 1-18.
- FARINEAU J., MOROT-GAUDRY J.F., 2006. La photosynthèse. Processus physiques, moléculaires et physiologiques. Paris : Inra.
- FRY B., 2006. Stable isotope ecology. Springer Science+Business Media, LLC. ISBN-10: pp 0-387.
- FOURQUREAN JW., MARBA N., DUARTE C.M., DIAZ-ALMELA E., RUIZ-HALPERN S., 2007. Spatial and temporal variation in the elemental and stable isotopic content of the seagrasses *Posidonia oceanica* and *Cymodocea nodosa* from the Illes Balears, Spain. *Mar Biol* 151 : pp 219-232.
- GIRAUD G., 1979. Sur une méthode de mesure et de comptage des structures foliaires de *Posidonia oceanica* (L.) Delile. *Bull Mus Hist Nat Marseille Fr* 39 : pp 33-39.

- GOBERT S., 2002. Variations spatiale et temporelle de l'herbier à *Posidonia oceanica* (L.) Delile (Baie de la Revellata-Calvi-Corse). Thèse de doctorat. Univ, Liège.
- GOBERT S., LAUMONT N., BOUQUEGNEAU J.M., 2002. *Posidonia oceanica* meadow: a low nutrient high chlorophyll (LNHC) system? *BMC Ecology*, 2 (9) : pp 1-12.
- GOBERT S., KYRAMARIOS M., LEPOINT G., PERGENT-MARTINI C., BOUQUENEAU J.M., 2003. Variations à différentes échelles spatiales de l'herbier à *Posidonia oceanica* (L.) Delile ; effets sur les paramètres physico-chimiques du sédiment.
- GOBERT S., LEJEUNE P., LEPOINT G., BOUQUEGNEAU J.M., 2005. C, N, P concentration and requirements of flowering *Posidonia oceanica* shoots. *Hydrobiologia* 533 : pp 253-259.
- GOBERT S., CAMBRIDGE M.T., VELIMIROV B., PERGENT G., LEPOINT G., 2006. Biology of *Posidonia*. In : Larkum AWD, Orth RJ, Duarte CM (éds) *Seagrasses : Biology, ecology and conservation*. Springer publ., Dordrecht : pp 387-40.
- GOBERT S., LEPOINT G., PELAPRET C., REMY F., LEJEUNE P., RICHIR J., ABADIE A., 2016. Temporal evolution of sand corridors in a *Posidonia oceanica* seascape: a 15-year study. *Mediterranean Marine Science*. Research Article.
- HAVELANGE S., LEPOINT G, DAUBY P., BOUQUEGNEAU J.M., 1997. Feeding of the spard fish *Sarpa salpa* in a seagrass ecosystem: diet and carbon flux. *PSZNI Mar Ecol*.8: 289-297.
- INVERS O., PEREZ M., ROMERO J., 2002. Seasonal nitrogen speciation in temperate seagrass *P. oceanica* (L.) Delile. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 273 : pp 219-240.
- JADOT C., OVIDIO M., VOSS J., 2002. Diel activity of *Sarpa salpa* by ultrasonic telemetry in a *Posidonia oceanica* meadow of Corsica (Mediterranean Sea). *Aquat Living Resor* 15(6): pp 343-350.
- JEUDY DE GRISSAC A., BOUDOURESQUE C.F., 1985. Rôles des herbiers de phanérogames marines dans les mouvements des sédiments côtiers : les herbiers à *Posidonia oceanica* : pp143-151.
- LARKUM AWD., DREW E.A., RALPH P.J., 2006. Photosynthesis and metabolism in seagrasses at the cellular level. In: Larkum A.W.D., Orth R. J., Duarte C.M. (Eds) *Seagrasses: biology, ecology and conservation*. Springer, Dordrecht : pp 441-461.
- LASSAUQUE J., 2009. Ecophysiological early biomarkers of anthropogenic-induced stress on *Posidonia oceanica* meadows. Thèse de doctorat: Sophia antipolis, Université de Nice (France).
- LASSAUQUE J., LEPOINT G., Thibaut T., Fancour P., Meinesz A., 2010. Tracing sewage and natural freshwater input in a Northwest Mediterranean bay : Evidence obtained from isotopic ratios in marine organisms. *Marine Pollution Bulletin* 60 : 843-851.

- LEPOINT G., NYSSSEN F., GOBERT S., DAUBY P., BOUQUEGNEAU J.M., 2000. Relative impact of a seagrass bed and its adjacent epilithic algal community in consumer diets. *Marine Biology* 136 : 513-518.
- LEE K.S., PARK S.R., KIM Y.K., 2007. Effects of irradiance, temperature, and nutrients on growth dynamics of seagrasses : a review. *J Exp Mar Biol Ecol* 350 (1) : pp 144-175
- LEPOINT G., DEFAWE O., GOBERT S., DAUBY P., BOUQUEGNEAU J.M., 2002a. Experimental evidence for N recycling in the leaves of the seagrass *Posidonia oceanica*. *Journal of Sea Research* 48 : pp 173-179.
- LEPOINT G., MILLET S., DAUBY P., GOBERT S., BOUQUEGNEAU J.M., 2002b. An annual nitrogen budget of the seagrass *Posidonia oceanica* as determined by in situ uptake experiments. *Marine Ecology Progress Series* 237 :pp 87-96.
- LEPOINT G., DAUBY P., FONTAINE M., BOUQUEGNEAU J.M., GOBERT S., 2003. Carbon and Nitrogen Isotopic Ratios of the Seagrass *Posidonia oceanica* : Depth-related Variations. *Botanica Marina* Vol. 46 : pp 555–561.
- LEPOINT G., DAUBY P., GOBERT S., 2004. Applications of C and N stable isotopes to ecological and environmental studies in seagrass ecosystems, *Marine Pollution Bulletin*, 49 : pp 887– 891.
- LEPOINT G., 2008. Etudes des isotopes stables et applications au milieu marin.cours destinées aux étudiants du Master en Océanologie. Université de Liège, p.75.
- LEPOINT G., FREDERICH B., GOBERT S., PARMENTIER E., 2008. Isotopic ratios and elemental contents as indicators of seagrass C processing and sewage influence in a tropical macrotidal ecosystem (Madagascar, Mozambique Channel). *Scientia Marina* 72 (1) : pp 109-117.
- MARBA N., DUARTE C., CEBRIAN J., GALLEGOS M., OLESEN B., SAND-JENSEN K., 1996. Growth and population dynamics of *Posidonia oceanica* on the Spanish Mediterranean coast: elucidating seagrass decline. *Marine Ecology Progress Series.*, Vol. 137 : pp 203-213.
- MICHENER RH., SCHELL D.M., 1994. Stable isotope ratios as tracers in marine aquatic food webs. In : Lajtha K, Michener RH (eds) *Stable isotopes in ecology and environmental sciences*. Blackwell, Oxford : pp 138–157.
- MUCCIO Z., JACKSON G.P., 2008. Isotope ratio mass spectrometry. *Analyst*, 134 : pp 213-222.
- MURCHIE E.H., LAWSON T., 2013. Chlorophyll fluorescence analysis : a guide to good practice and understanding some new applications. *J Exp Bot* 64 (13) : 3983-3998.

- NORDLUND L.M., KOCH E.W., BARBIER E.B, CREED J.C., 2016. Seagrass Ecosystem Services and Their Variability across Genera and Geographical Regions. *PloS one* 11 (10) : 1-23.
- PASQUALINI., PERGENT-MARTINI C., PERGENT., G., 1998. Use of remote sensing for the characterization of the Mediterranean coastal environment – the case of *Posidonia oceanica*. *Journal of Coastal Conservation* 4 : pp 59-66.
- PEDERSEN M.F., BORUM J., 1993. An annual nitrogen budget for a seagrass *Zostera marina* population. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* Vol.101 : pp 169-177.
- PEIRANO A., NICCOLAI I., MAURO R., NIKE-BIANCHI C., 2001. Seasonal grazing and food preference of herbivores in a *Posidonia oceanica* meadow. *SCI.MAR*, 65 (4) : pp 367-374.
- PERGENT-MARTINI C, RICO-RAIMONDINO V., PERGENT G., 1994. Primary production of *Posidonia oceanica* in the Mediterranean Basin. *Mar Biol* 120 : pp 9-15.
- PERGENT G., ROMERO J., PERGENT-MARTINI C., MATEO M.A., BOUDOURESQUE C.F., 1994. Primary production, stocks and fluxes in the Mediterranean seagrass *Posidonia oceanica*. *Mar Ecol Prog Ser* 106 : pp 139-146.
- PERGENT G., PERGENT-MARTINI C., BOUDOURESQUE C.F., 1995. Utilisation de l'herbier à *Posidonia oceanica* comme indicateur biologique de la qualité du milieu littoral en Méditerranée : Etat des connaissances. *Mésogée* (54) : pp 3-29.
- PIRC H., 1985. Growth dynamics in *Posidonia oceanica* (L.) Delile. *Mar Ecol* 6 (2) : 141-165.
- PIRC H., 1986. Seasonal aspects of photosynthesis in *Posidonia oceanica* : influence of depth, temperature and light intensity. *Aquat Bot* 26 : pp 203-212
- PIRC H., WOLLENWEBER B., 1988. Seasonal Changes in Nitrogen, Free Amino Acids, and C/N Ratio in Mediterranean Seagrasses. *Marine Ecology*, 9 (2): pp 167-179.
- RALPH P.J., GADEMAN R., 2005. Rapid light curves: A powerful tool to assess photosynthetic activity. *Aquatic Botany*, 82: pp 222–237.
- RAVEN J.A., JOHNSTON A.M., KUBLER J.E., KORB R., MCINROY S.G., HANDLEY L.L., SCRIMGEOUR C.M., WALKER D.I., BEARDALL J., VANDERKLIFT M., FREDRIKSEN S., DUNTON K.H., 2002. mechanistic interpretation of carbon isotope discrimination by marine macroalgae and seagrasses. *Funct. Plant Biol.*, 29: pp 355-378.
- SERRANO O., MATEO M.A., RENOM P., 2011. Seasonal response of *Posidonia oceanica* to light disturbances. *Mar Ecol Prog Ser.* Vol 423 : pp 29-38.

- SOULLARD M., BOURGE I., FOGEL J., LARDINOIS D., Mathieu T., VEESCHENS C., BAY D., DAUBY P., BOUQUEGNEAU J.M., 1994. Évolution de la densité de l'herbier de Posidonies de la baie de Calvi (Corse). Vie Milieu 44 : pp 199–201.
- TOUCHETTE B.W., BURKHOLDER J.M., 2000. Review of nitrogen and phosphorus metabolism in seagrasses. J Exp Mar Bio Ecol. 2000 Jul 30;250(1-2) : pp 133-167.
- VERMEULEN S., SATURARO N., GOBERT S., BOUQUEGNEAU J.M., LEPOINT G., 2011. Potentiel early indicators of anthropogenically derived nutrients : a multiscale stable isotope analysis. Mar Ecol Prog Ser. Vol 422 : pp 9-22.
- VIZZINI S., SARA G., MICHENER RH., MAZZOLA A., 2001. Mechanistic interpretation of carbon isotope discrimination by marine macroalgae and seagrasses. Acta Oecologica. Volume 23, Issue 4 : pp 277-285.
- VIZZINI S., MAZZOLA A., 2003. Seasonal variations in the stable carbon and nitrogen isotope ratios ($^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ and $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$) of primary producers and consumers in a western Mediterranean coastal lagoon. Marine Biology 142 : pp 1009-1018.
- VIZZINI S., SARA G., MATEO M.A., MAZZOLA A., 2003. $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ variability in *Posidonia oceanica* associated with seasonality and plant fraction. Aquat Bot 76 : pp 195–202.
- ZIEMAN, J.C., 1974. Methods for the study of the growth and production of turtle grass, *Thalassia testudinum* KSnig. Aquaculture, 4: 139-143.
- ZUPO V., FREZI E., 1984. A study of the food web of *Posidonia oceanica* ecosystem : analysis of the gunt contents of echinoderms. In Boudouresque C.F et Jeudy de Grissac A., olivier J., edits.international workshop on *Posidonia oceanica* beds, GIS *Posidonie* publ., Fr.,1 : pp 373-379.

IV-ANNEXES :

Annexe 1 : Les figures 1 et 2 présentent les concentrations de carbone et d'azote (en pourcentage) dans les échantillons.

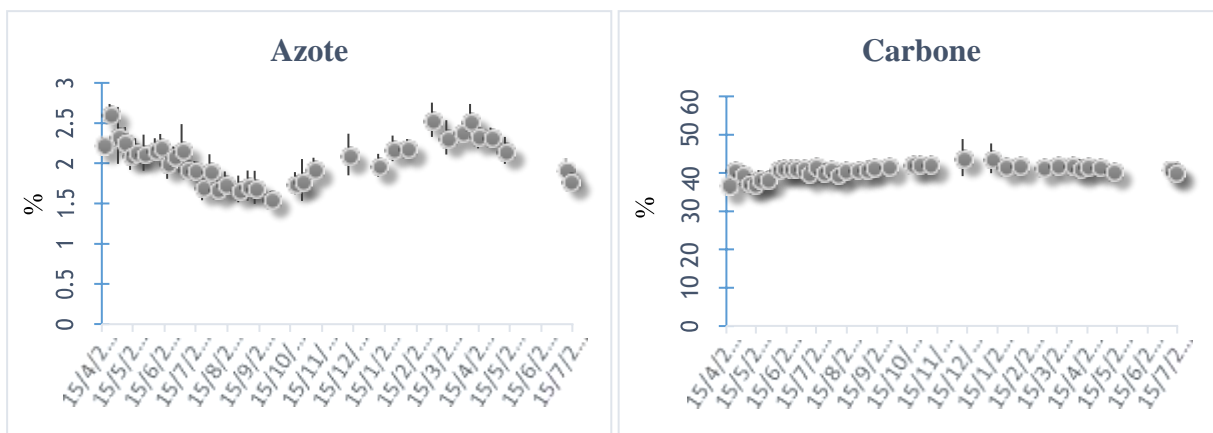


Figure 1 : Evolution hebdomadaire à bimensuelle des contenus élémentaires (C et N) (en %) dans les feuilles de *P. oceanica* à 10 m (n=6, moyenne \pm écart-type).

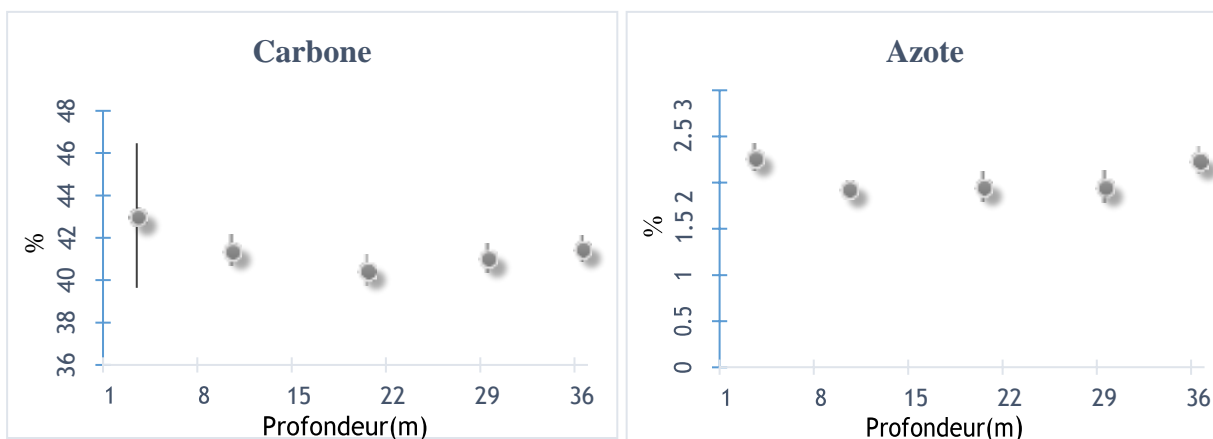


Figure 2 : les variations des contenus élémentaires (C et N) en fonction de la profondeur (3, 10, 20, 29 et 36 m) dans les faisceaux de *P. oceanica* récoltés en face de STARESO.