



Centre d'Etude et de Valorisation
des Algues
Presqu'île de Pen Lan
BP 3 / 22610 PLEUBIAN
02 96 22 93 50
02 96 22 84 38
e-mail : algue@ceva.fr

Programme d'intervention du CEVA
en faveur de l'action régionale et interdépartementale
pour la maîtrise des phénomènes de marées vertes

CIMAV 2013

RAPPORT SUR LE PROJET 3

COMPLEMENT D'ETUDE SUR LES PROCESSUS BIOLOGIQUES,
HYDROLOGIQUES ET SEDIMENTOLOGIQUES IMPLIQUES DANS LES
BLOOMS MACROALGAUX



ANNEE 2013 - version 2



SOMMAIRE

1	INTRODUCTION	5
2	ACQUISITION DE PARAMETRES ECOPHYSIOLOGIQUES POUR PYLAIELLA LITTORALIS⁶	
2.1	RAPPEL DES OBJECTIFS ET DU PROGRAMME DE TRAVAIL.....	6
2.2	CONSOLIDATION DES VALEURS DE Q_1N ET Q_0N	7
2.2.1	<i>Matériel et méthodes</i>	7
2.2.1.1	Matériel biologique.....	7
2.2.1.2	Amélioration de la méthode de pesée.....	7
2.2.1.3	Conditions de réalisation de l'expérience.....	9
2.2.1.4	Exploitation des données.....	10
2.2.2	<i>Résultats</i>	11
2.2.2.1	Evolution de l'aspect visuel des algues.....	11
2.2.2.2	Evolution des quotas N et P.....	11
2.2.2.3	Evolution de la croissance et des matières sèches.....	15
2.2.3	<i>Discussion</i>	16
2.3	COMPETITION ENTRE PYLAIELLA LITTORALIS ET ULVA ARMORICANA.....	18
2.3.1	<i>Matériel et méthodes</i>	18
2.3.1.1	Calendrier des expériences et origine des algues.....	18
2.3.1.2	Conditions de réalisation de l'expérience.....	18
2.3.2	<i>Résultats</i>	20
2.3.3	<i>Discussion</i>	27
2.4	CONCLUSION DES EXPERIENCES DE L'ANNEE 2013.....	28
3	AMELIORATION DES CONNAISSANCES BIOLOGIQUES.....	29
3.1	RAPPEL DES OBJECTIFS ET DU PROGRAMME DE TRAVAIL.....	29
3.2	ANALYSE SUR SITE DU CYCLE BIOLOGIQUE COMPLET DE PYLAIELLA LITTORALIS DANS LA BAIE DE SAINT-BRIEUC.....	29
3.2.1	<i>Matériel et Méthodes</i>	29
3.2.1.1	Calendrier des missions effectuées.....	29
3.2.1.2	Protocole de mesure des paramètres physico-chimiques et biologiques.....	30
3.2.2	<i>Résultats - Discussion</i>	33
3.2.2.1	Evolution des paramètres physico-chimiques.....	33
3.2.2.2	Evolution annuelle des populations algales.....	37
3.3	ETUDE DE LA DYNAMIQUE DE POPULATION DE L'ALGUE ROUGE SOLIERIA CHORDALIS.....	44
3.3.1	<i>Matériel et Méthodes</i>	44
3.3.1.1	Calendrier des missions effectuées.....	44
3.3.1.2	Protocole de mesure des paramètres physico-chimiques et biologiques.....	45
3.3.2	<i>Résultats-discussion</i>	47
3.3.2.1	Evolution des paramètres physico-chimiques.....	47
3.3.2.2	Evolution de la biomasse de <i>Solieria chordalis</i>	50
3.4	CONCLUSIONS SUR L'AMELIORATION DES CONNAISSANCES BIOLOGIQUES.....	54
4	COMPILATION DES DONNEES ACQUISES DANS LE CADRE DU PROGRAMME CIMAV – PROJET 3 DEPUIS 2008	55
5	BIBLIOGRAPHIE	59
6	ANNEXES	61

1 Introduction

Les actions proposées dans ce programme sont avant tout destinées à l'**opérationnalisation du modèle écologique Mars-ulves**, mais aussi, d'une manière plus large, à la **consolidation, par méthode expérimentale, des connaissances sur le fonctionnement écologique des blooms macroalgaux**, des conditions de développement et des moyens de limitation des marées vertes ou des autres types de blooms macroalgaux. Suite au projet 3 mené au cours de l'année 2012, il apparaît important de poursuivre l'amélioration des connaissances sur les blooms algaux récemment observés induits par l'algue brune *Pylaiella littoralis* et l'algue rouge *Solieria chordalis*.

En 2013, deux actions ont été menées :

- ⇒ La poursuite de l'acquisition de données sur les développements de blooms de *Pylaiella littoralis*. Cette algue, récurrente sur le site de la Fresnaye depuis 2006, semble désormais persister sur le site de Saint-Brieuc. Pour comprendre cette évolution il paraît essentiel de :
 - Préciser *in situ*, notamment au niveau des secteurs de concentrations des biomasses dérivantes d'ulves et de *Pylaiella*, les valeurs de paramètres pouvant influencer l'une ou l'autre des espèces
 - Poursuivre l'acquisition des paramètres écophysologiques de *Pylaiella* et notamment des valeurs de quotas critiques et de subsistance pour N et P pour la consolidation du module biologique *Pylaiella*. Les expérimentations menées en 2012 n'ont pas abouti à une définition claire de ces seuils qui constituent un élément essentiel à la modélisation des phénomènes biologiques.
 - mettre en place une expérimentation simple de compétition entre ulves et *Pylaiella* dans les conditions les plus proches possibles de la réalité.

- ⇒ L'initiation d'une étude de la dynamique de population de *Solieria* pour mieux comprendre et prévoir les conditions de colonisation et d'échouage de cette algue. Les échouages massifs de *Solieria chordalis* sont depuis longtemps caractéristiques de certains secteurs sud du littoral breton mais leur fréquence et leur importance ont paru augmenter à l'époque récente dans certains sites. L'enjeu de connaissance est de déterminer si l'importance des biomasses de *Solieria* présentes en infralittoral est en relation avec une disponibilité accrue des sels nutritifs ou/et se trouve sous dépendance d'autres facteurs de croissance comme la lumière (contrôlée notamment par la turbidité des eaux), la température hivernale (susceptible de progresser avec le changement global), ou encore en lien avec une offre nouvelle de substrats favorables à la colonisation de l'espèce (augmentation nette des surfaces colonisables, interactions de compétition favorables pour leur occupation). L'année 2012 a été consacrée à une revue des données biologiques et écologiques de l'espèce, à un historique du phénomène sur les côtes atlantiques et à des plongées de prospection en Bretagne Sud. Ces actions ont permis de préciser l'habitat de l'espèce : zone favorable, distribution verticale et nature des substrats dans les zones infralittorales qu'elles colonisent. En 2013, il a été proposé de :
 - (1) réaliser une cartographie complète d'une population de *Solieria* dans un secteur d'échouage connu,
 - (2) mieux décrire le cycle saisonnier du développement de l'algue dans son habitat, incluant l'observation des conditions de recrutement,
 - (3) toujours *in situ*, valider/préciser certains paramètres physico-chimiques de cet habitat,
 - (4) proposer un protocole de laboratoire permettant de tester directement ou par modélisation la sensibilité de l'espèce à différents apports de sels nutritifs.

2 Acquisition de paramètres écophysologiques pour *Pylaiella littoralis*

2.1 Rappel des objectifs et du programme de travail

L'objectif pour cette année 2013 est de poursuivre l'amélioration des connaissances sur les développements de blooms de *Pylaiella littoralis*, algue brune filamenteuse récurrente sur le site de la Fresnaye depuis 2006 et qui semble désormais persister sur le site de Saint-Brieuc.

Le programme de travail comporte deux volets :

- 1) **Consolider les valeurs de Q_1N et Q_0N** : Les valeurs de quota critique (Q_1) et quota de subsistance (Q_0) pour l'azote sont nécessaires pour consolider le module biologique *Pylaiella* du modèle écologique Mars-ulves. Les expérimentations menées en 2012 n'ont pas abouti à une définition claire de ces valeurs et une nouvelle expérience est proposée pour 2013.
- 2) **Déterminer les conditions favorables au développement prépondérant de *Pylaiella* lorsqu'elle est en compétition avec l'ulve** : Face au constat d'un développement prépondérant de *Pylaiella* au détriment de l'ulve en baie de Saint-Brieuc, il s'agit de mettre en place une expérimentation simple de compétition entre ulves et *Pylaiella* dans les conditions les plus proches de la réalité et à deux saisons différentes.

Le tableau ci-dessous présente le calendrier des expériences de 2013 (Tableau 1).

Tableau 1 : Expériences d'écophysologie réalisées en 2013

N° expérience	Intitulé de l'expérience	Date et lieu de prélèvement des algues	Date et durée de l'expérience
1	Compétition <i>Pylaiella</i> vs. <i>Ulva</i>	- <i>Ulva armoricana</i> : 24/06, Morieux (22) - <i>Pylaiella littoralis</i> : 26/06, La Fresnaye (22)	du 27/06 au 17/07 20 jours
2	Q_1N , Q_0N	- <i>Pylaiella littoralis</i> : 26/08, Morieux (22)	du 27/08 au 09/09 13 jours
3	Compétition <i>Pylaiella</i> vs. <i>Ulva</i>	- <i>Ulva armoricana</i> : 16/09, Hillion (22) - <i>Pylaiella littoralis</i> : 16/09, Hillion (22)	du 18/09 au 24/10 36 jours

2.2 Consolidation des valeurs de Q_1N et Q_0N

L'objectif est de déterminer les valeurs de quota critique et quota de subsistance de *Pylaiella littoralis* vis-à-vis de l'azote. Le quota critique Q_1N est la valeur de la teneur en azote dans l'algue en-dessous de laquelle la croissance est limitée. Le quota de subsistance Q_0N est la valeur de la teneur en azote dans l'algue en-dessous de laquelle la croissance est nulle. Pour cet objectif, il s'agit de mesurer la croissance de l'algue en fonction de ses quotas azotés, en conditions contrôlées de température et de lumière.

Des expériences ont été conduites pour la première fois avec cette algue en 2012 mais elles n'ont pas permis de déterminer clairement les valeurs de Q_1N et Q_0N . Aucune différence significative de croissance n'avait été observée entre les algues en conditions carencées et le témoin enrichi en azote (Annexe 1). Deux hypothèses avaient alors été formulées :

- 1) Une possible carence en vitamines dans le milieu de culture.
- 2) Un stress induit par le broyage des pompons d'algues en début d'expérience, à l'aide d'un mixeur plongeant.

Les expériences de 2013 doivent permettre d'améliorer le protocole de l'expérience – en tenant compte des conclusions de 2012 – pour obtenir des valeurs fiables de Q_1N et Q_0N .

2.2.1 Matériel et méthodes

2.2.1.1 Matériel biologique

L'algue brune *Pylaiella littoralis* a été récoltée le 26 août 2013 en baie de Saint-Brieuc, à Morieux, dans les Côtes d'Armor. C'est une algue filamenteuse de petite taille qui se développe régulièrement en mélange avec d'autres espèces d'algues et qui est souvent colonisée par les diatomées. Les algues récoltées ont donc été triées et rincées à de multiples reprises avec de l'eau de mer pour aboutir à un échantillon le plus pur et le plus propre possible. Ensuite, les « pompons » de *Pylaiella* ont été fragmentés manuellement, à l'aide de pinces.

2.2.1.2 Amélioration de la méthode de pesée

Pour suivre la croissance des algues, des pesées de la biomasse d'algues fraîches sont réalisées quotidiennement. Préalablement à l'expérience des quotas, nous avons cette année encore, conduit des tests de pesée selon différentes méthodes d'essorage de la biomasse fraîche, pour déterminer une méthode pratique (facilité de mise en œuvre) et fiable (bonne répétabilité se traduisant par un coefficient de variation de faible valeur). Trois méthodes ont été testées, les algues étant dans les trois cas préalablement récupérées sur une toile de 100 μm^1 :

- 1) **Essorage par égouttage pendant 1 minute** : La toile contenant les algues est simplement suspendue pendant 1 minute pour laisser l'eau s'égoutter. Après 1 min, l'ensemble toile + algues est pesé.

¹ Il s'agit de la même toile que l'année dernière mais il y avait une erreur dans le rapport de 2012 qui indiquait une maille de 300 μm .

- 2) **Essorage à la centrifugeuse électrique** : La toile contenant les algues est introduite dans la centrifugeuse (Dito Sama EL65 - 330 tr/min) qui est mise en marche pendant 1 minute, suite à quoi la galette d'algues essorée est pesée, sans la toile.
- 3) **Essorage par pressage** : C'est la méthode qui avait été retenue en 2012 avec quelques modifications. La toile est refermée autour des algues au moyen d'un élastique (et pas simplement en donnant un tour à la main comme fait en 2012). L'élastique est positionné assez loin des algues, à l'extrémité de la toile de sorte que l'opérateur n'exerce aucune pression sur les algues. L'ensemble toile + algues est placé sur le dispositif – identique à 2012 – et un poids de 14 kg est appliqué pendant 1 minute. Après avoir été débarrassées de la toile, les algues essorées sont pesées.

Les résultats des pesées sont présentées ci-dessous (Tableau 2). La méthode par égouttage donne les valeurs de coefficients de variation les plus faibles (3,4%) mais pose problème pour le prélèvement d'un échantillon. En effet, l'échantillon contient toujours beaucoup d'eau après l'égouttage et cela implique qu'on devra prélever plus de matière en poids frais pour avoir une quantité de matière équivalente en poids sec à la méthode appliquée l'année dernière. Les méthodes par centrifugeuse et par pressage donnent des résultats assez similaires avec des coefficients de variation de respectivement 5,62% et 4,94%. Pour des raisons pratiques, notre choix se tourne vers la méthode par pressage que nous avons déjà pratiquée en routine en 2012.

Tableau 2 : Résultats des pesées pour les 10 répliqués et statistiques associées

Méthode	Egouttage 1 min		Centrifugeuse 1 min	Pressage 1 min
	Poids frais toile + algues (g)	Poids frais toile (g)	Poids frais algues (g)	Poids frais algues (g)
n				
1	93,36	9,19	36,35	38,3
2	88,21	8,85	38,42	39,27
3	87,07	9,13	35,93	39,07
4	90,14	9,09	32,86	38,74
5	88,85	9,29	36,79	39,16
6	84,88	9,56	33,84	35,98
7	87,06	9,83	33,14	34,99
8	89,68	9,62	32,44	36,67
9	85,49	9,42	35,9	34,76
10	82,82	8,93	36,04	
n actifs	10	10	10	9
Moyenne	87,76	9,29	35,17	37,44
Mini	82,82	8,85	32,44	34,76
Maxi	93,36	9,83	38,42	39,27
Ecart-type	3,00	0,31	1,98	1,85
Coefficient de variation	3,42 %	3,38 %	5,62 %	4,94 %

2.2.1.3 Conditions de réalisation de l'expérience

L'expérience est conduite dans le PPE (plateau polyvalent d'écophysioogie), sous conditions contrôlées de lumière et de température. Les conditions utilisées sont proches des optima de croissance pour *Pylaiella littoralis*: 15°C (Dufresnes, 2011), avec une intensité lumineuse d'environ 100 $\mu\text{mol photons/m}^2/\text{s}$ (CEVA, 2012). La photopériode appliquée est de 16L:8D. Quatre aquariums de 20 L remplis d'eau de mer artificielle (Annexe 2) sont disposés dans le PPE (Figure 1). A $t=0$, 75 g d'algues essorées sont introduits dans chaque aquarium, correspondant à une densité de 3,75 g/L. L'agitation des algues est entretenue par bullage à l'air.

Tous les jours à heure fixe pendant toute la durée de l'expérience (**sauf $j=11$ et $j=12$**), les algues sont récoltées, essorées et pesées. Les aquariums sont vidangés et le milieu de culture renouvelé. Celui-ci est constitué d'eau de mer artificielle supplémentée en sels nutritifs tel que :

- Tous les aquariums sont supplémentés en phosphates, en métaux et en vitamines selon la composition de la solution f/2 (Annexe 3)
- L'aquarium témoin n°3 reçoit en plus une dose de nitrates, selon la composition de la solution f/2 (Annexe 3)
- Le *Pylaiella* utilisé pour l'expérience paraissait très clair (récolté à la fin du mois d'août) ce qui pouvait laisser penser que le quota azoté de départ était bas. Par crainte de ne pas pouvoir conduire l'expérience jusqu'au bout, nous avons donc décidé d'apporter une dose de nitrates seulement au démarrage de l'expérience ($j=0$) dans l'aquarium n°2 (pour faire remonter le quota).

Ces conditions sont résumées dans le tableau ci-dessous (Tableau 3).

Tableau 3 : Caractéristiques du milieu de culture selon les aquariums

Aquarium	Milieu de culture	Enrichissement			
		solution à 75 g/L de NaNO_3^*	solution à 5 g/L de $\text{NaH}_2\text{PO}_4^*$	solution métallique *	solution de vitamines*
un témoin (n°3)	Eau de mer artificielle	1 mL/L tous les jours	1mL/L tous les jours	1mL/L tous les jours	0,5mL/L tous les jours
deux carencés, sans azote (n°1 et n°4)		-			
un carencé, ayant reçu une dose d'azote le 1 ^{er} jour (n°2)		1 mL/L à $j=0$			

* d'après la composition de la solution de f/2 (Annexe 3)

Tous les jours, un échantillon de biomasse de chaque aquarium est prélevé pour analyse. L'échantillon est rincé à l'eau douce, essoré à la main, pesé, congelé, lyophilisé puis à nouveau pesé pour déterminer la matière sèche. Les échantillons lyophilisés sont alors

envoyés en sous-traitance pour dosage des teneurs en azote total et phosphore total par microanalyse.

Après le prélèvement, les biomasses sont ajustées de manière à avoir une densité égale d'algues dans les quatre aquariums.



Figure 1 : Vue des 4 aquariums dans le PPE. Photo prise le 28/08/13, 24h après le début de l'expérience. Le témoin est l'aquarium n°3. L'aquarium n°2 a reçu une dose de f/2 au début de l'expérience.

2.2.1.4 Exploitation des données

La croissance μ – ici, croissance exponentielle moyenne journalière exprimée en %/jour – est calculée selon l'équation d'Elia & Deboer (1978 *in* Gómez Pinchetti et al., 1998) :

$$\mu (\% \cdot \text{jour}^{-1}) = \frac{\ln(W_j/W_i)}{(j-i)} \times 100$$

avec W_i (g frais) = biomasse de *Pylaiella* introduite dans l'aquarium à $t=i$
 W_j (g frais) = biomasse de *Pylaiella* récoltée à $t=j$ (en principe $j= i + 24h$);
 $j-i$ (jours) = temps écoulé entre les deux pesées (en principe ~ 24 heures)

Pour 2013, la croissance est calculée sur la base des poids frais.

En ce qui concerne les valeurs des quotas N et P, elles sont données en % sec/brut, le brut correspondant à l'échantillon lyophilisé. Il s'agit donc d'une valeur en % par rapport à la matière sèche de l'algue. Six réplicats ont été analysés pour calculer l'incertitude des analyses (Annexe 4), qui vaut 10% pour le quota N et 12% pour le quota P. Cette incertitude est représentée sous forme de barres d'erreur dans les graphiques qui suivent.

2.2.2 Résultats

L'expérience des quotas a pour objectif de déterminer les teneurs internes en azote qui limitent la croissance. Pour cela les algues cultivées en conditions optimales dans un milieu enrichi en nitrates (aquarium témoin n°3) sont comparées aux algues cultivées en conditions de carence azotée (aquariums n°1, 2 et 4). En conditions de carence azotée, le milieu de culture n'est pas supplémenté en nitrates et l'algue doit donc puiser dans son stock interne d'azote pour sa croissance. Une diminution progressive du quota interne en azote des algues cultivées dans les aquariums n°1, 2 et 4 est donc attendue. Cette diminution doit également s'accompagner d'un ralentissement de la croissance en comparaison de la croissance des algues de l'aquarium témoin.

2.2.2.1 Evolution de l'aspect visuel des algues

L'évolution de l'aspect visuel des aquariums au fur et à mesure de l'expérience est présentée Figure 2. Au départ, les algues ont la même couleur dans les 4 aquariums puis rapidement, les algues des aquariums n°1, 2 et 4 se décolorent et passent d'un marron foncé à un marron clair. Au contraire, les algues de l'aquarium témoin enrichi en azote restent marron foncé pendant toute la durée de l'expérience. Ceci est à mettre en relation avec l'évolution du quota azoté.

2.2.2.2 Evolution des quotas N et P

L'évolution des quotas dans les différents aquariums est présentée à la Figure 3 pour le quota N et à la Figure 4 pour le quota P.

L'inoculum de départ présentait un quota N de 2,16%. A $j=1$, les algues des aquariums n°2 et 3 qui ont tous les deux reçus une dose d'azote à $j=0$ voient leur quota N monter à 3%. Au contraire, le quota N des algues des aquariums n°1 et 4 qui n'ont pas reçu d'azote reste équivalent à la valeur de départ (2,18% pour l'aquarium n°1 et 2,11% pour l'aquarium n°4). Par la suite, le quota N dans les aquariums n°1, 2 et 4 diminuent progressivement. En l'absence d'un apport exogène en azote dans le milieu de culture, les algues puisent dans leur quota interne. L'aquarium n°2 qui a reçu une dose d'azote à $j=0$ met plus de temps à appauvrir son quota mais à $j=9$, il atteint un quota N non significativement différent des aquariums n°1 et 4. A la fin de l'expérience, c'est-à-dire à $j=13$, le quota N des aquariums n°1, 2 et 4 se situe entre 1,07 et 1,27%, contre 2,16% au début de l'expérience.

En ce qui concerne le témoin, le quota augmente jusqu'à $j=2$ puis il reste relativement constant jusqu'à la fin de l'expérience, autour de 4,17% en moyenne, largement au-dessus du quota des algues des aquariums n°1, 2 et 4.

Pour ce qui est du quota P, il vaut 0.30% dans l'inoculum de départ. A $j=1$, il est équivalent dans tous les aquariums, autour de 0.33%, et non significativement différent de la valeur de départ. Dans les aquariums n°1 et 4, le quota P des algues reste à ce même niveau jusqu'à la fin de l'expérience. Dans l'aquarium témoin n°3 qui a reçu une dose d'azote tous les jours, le quota P augmente et devient supérieur au niveau de départ et aux aquariums n°1 et 4 dès $j=10$. En ce qui concerne l'aquarium n°2 qui a reçu une dose d'azote à $j=0$, le quota P augmente également. Il se situe à un niveau intermédiaire (et non significativement différent) entre l'aquarium n°4 et l'aquarium n°3. A $j=13$, le quota P de l'aquarium n°2 devient significativement supérieur au niveau de départ et au quota de l'aquarium n°1 (Figure 4). La supplémentation en azote réalisée à $j=0$ semble avoir été bénéfique en termes de quota P également.

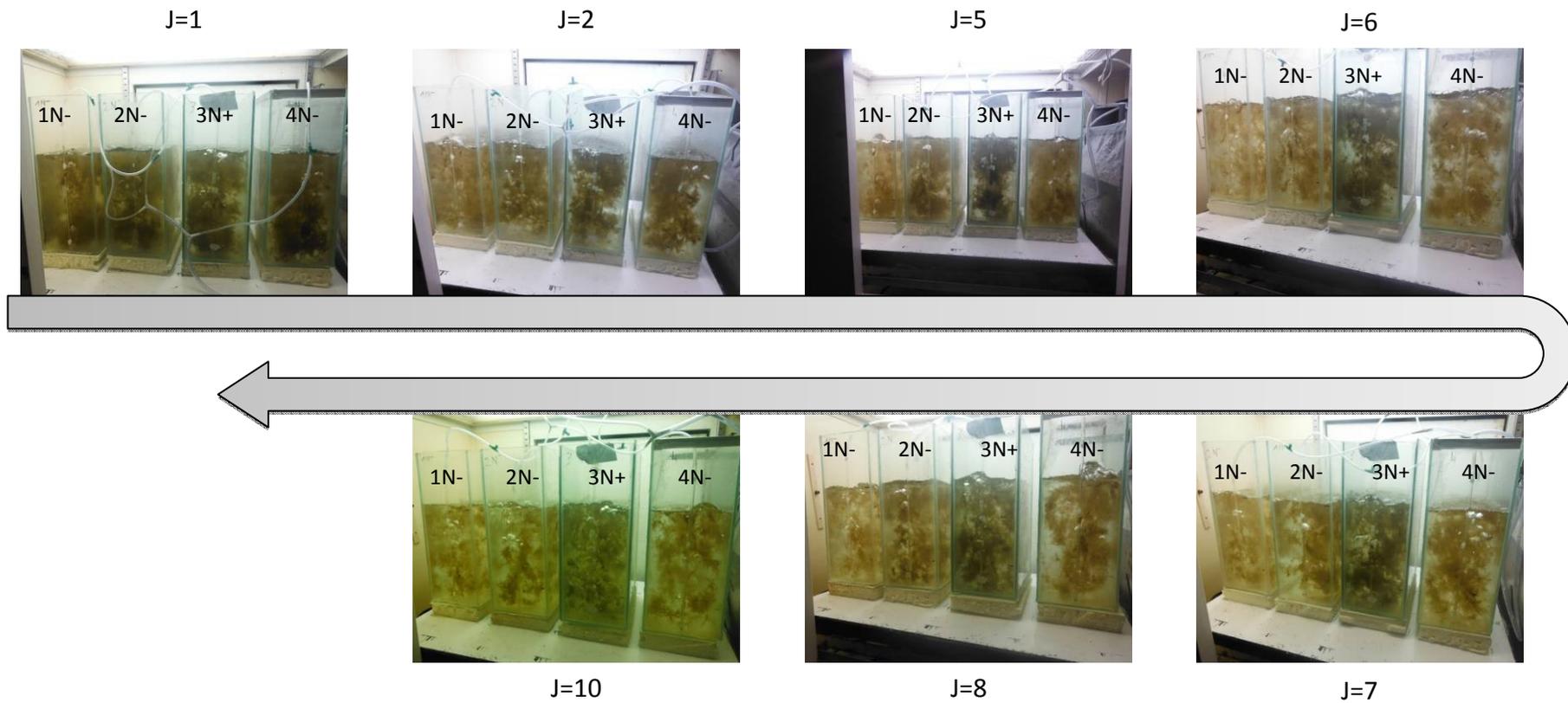


Figure 2 : Evolution de l'aspect visuel des aquariums au cours de l'expérience

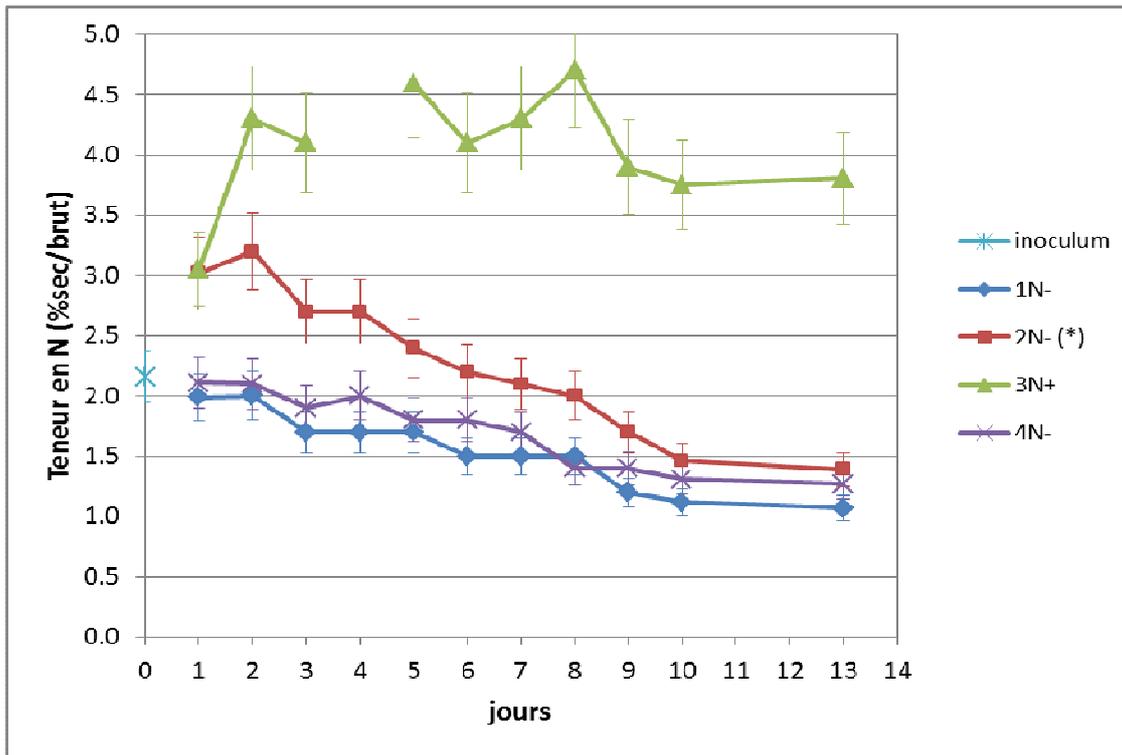


Figure 3 : Evolution comparée des quotas azotés en fonction du temps entre l'aquarium témoin (3N+, en vert) et les aquariums carencés en nitrates (1N-, 2N-, 4N-, en bleu, rouge et violet). La valeur du quota de départ est représentée par la série « inoculum » à j = 0. Les barres d'erreur correspondent à l'incertitude relative de la mesure, égale ici à 10% (calculé sur 6 valeurs).

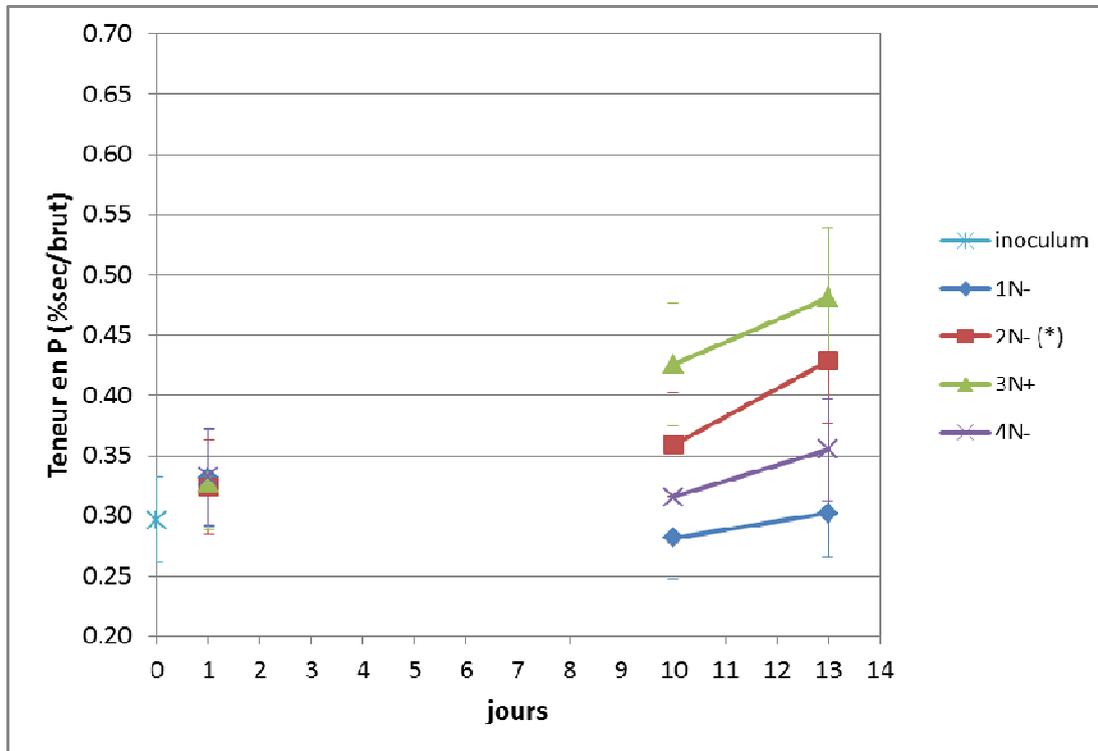


Figure 4 : Evolution comparée des quotas phosphorés en fonction du temps entre l'aquarium témoin (3N+, en vert) et les aquariums carencés en nitrates (1N-, 2N-, 4N-, en bleu, rouge et violet). La valeur du quota de départ est représentée par la série « inoculum » à j = 0. Les barres d'erreur correspondent à l'incertitude relative de la mesure, égale ici à 12% (calculé sur 6 valeurs).

2.2.2.3 Evolution de la croissance et des matières sèches

L'évolution des matières sèches est présentée Figure 5 et l'évolution de la croissance selon les conditions d'enrichissement est présentée Figure 6.

L'inoculum de départ est à 8.8% de matière sèche. Sur les 5 premiers jours de l'expérience, la matière sèche est équivalente dans tous les aquariums, autour de 8%. Par contre, à partir du 6^e jour, on constate une différence entre l'aquarium témoin n°3 et les aquariums carencés en azote n°1, 2 et 4. En conditions d'enrichissement en azote – aquarium n°3 – la matière sèche augmente et reste à un niveau supérieur autour de 10% jusqu'à la fin de l'expérience. Au contraire, dans les aquariums n°1, 2 et 4, la matière sèche diminue légèrement et se situe autour de 7.2% jusqu'à la fin de l'expérience.

Alors qu'il y a augmentation de la matière sèche au cours du temps dans l'aquarium n°3, cela ne se semble pas se traduire par de la croissance. En effet, la tendance générale de la croissance est plutôt à la baisse, et ce quelles que soient les conditions d'enrichissement (Figure 6). Il n'y a pas de différence marquée entre les aquariums carencés et le témoin. Une remontée de la croissance sur les derniers jours est observée mais il faut rappeler que le milieu de culture n'a pas été changé à j=11 et j=12.

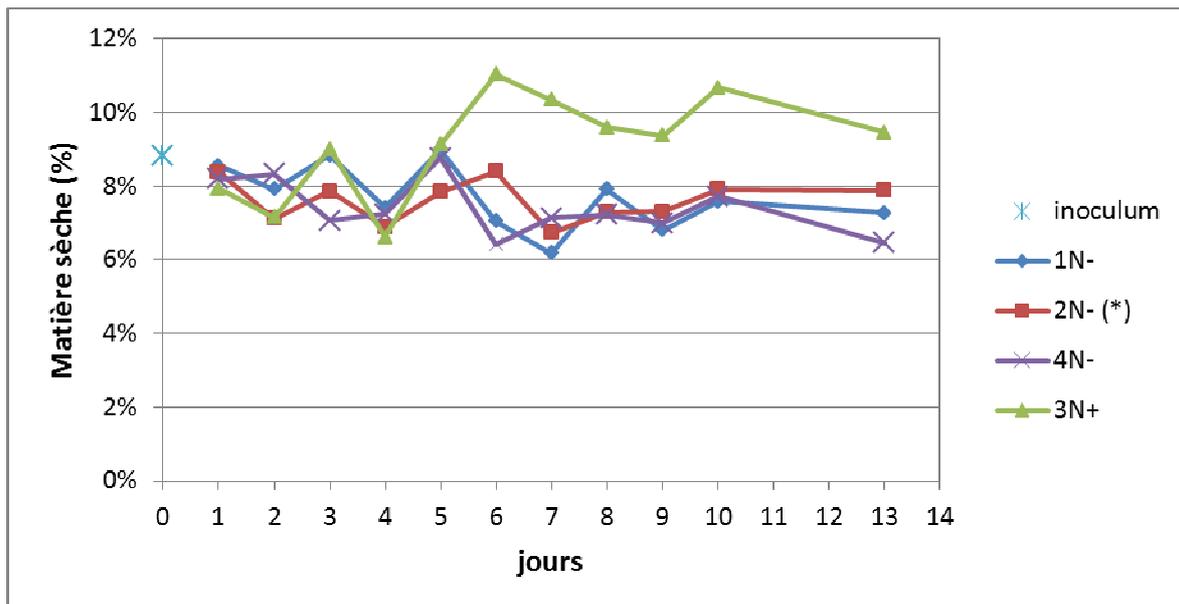


Figure 5 : Evolution comparée de la matière sèche en fonction du temps entre l'aquarium témoin (3N+, en vert) et les aquariums carencés en nitrates (1N-, 2N-, 4N-, en bleu, rouge et violet).
(*) = ajout d'une dose de nitrates à j=0.

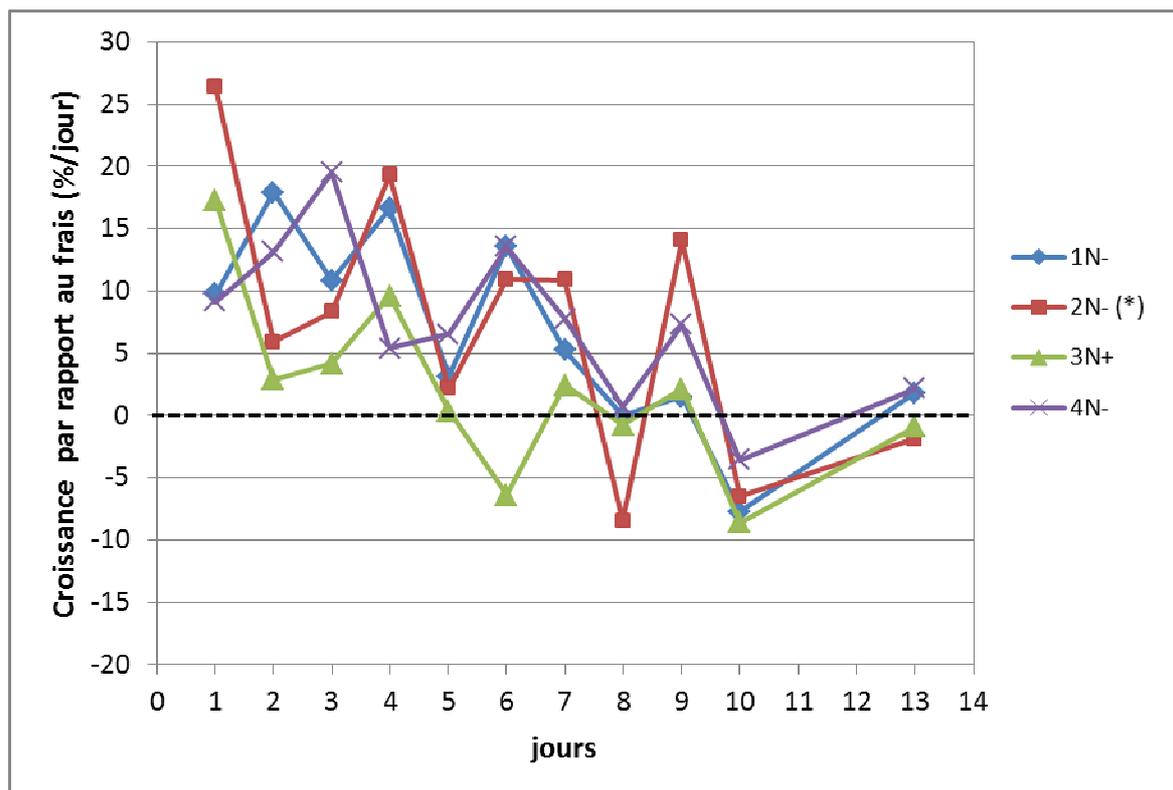


Figure 6 : Evolution comparée de la croissance en fonction du temps entre l'aquarium témoin (3N+, en vert) et les aquariums carencés en nitrates (1N-, 2N-, 4N-, en bleu, rouge et violet).
(*) = ajout d'une dose de nitrates à j=0.

2.2.3 Discussion

A partir de l'examen des matières sèches, un changement significatif apparaît à j=6 entre les aquariums enrichi et carencés en azote. La matière sèche des algues non supplémentées en azote se maintient voire diminue. Au contraire, la matière sèche du témoin, supplémenté en azote, augmente et devient nettement supérieure. A j=6, le quota N de l'aquarium n°3 vaut 4.1% alors qu'il vaut en moyenne 1.8% pour les aquariums n°1, 2 et 4. La différence significative entre les conditions enrichies/carencées à j=6 est un premier indice de l'atteinte du quota critique Q_1N . Sur cette base, **une première estimation de la valeur de Q_1N pour *Pylaiella littoralis* est donc proposée = 1.8%**.

Au contraire, en termes de croissance, aucune différence significative n'apparaît entre les conditions enrichies et carencées. Bien que des croissances négatives aient été observées lors de l'expérience, **il n'est pas possible de conclure sur la valeur du quota de subsistance Q_0N pour *Pylaiella littoralis*.**

Pour comparaison, des valeurs de quotas azotés critique et de subsistance déterminés pour quelques espèces d'algues brunes sont reportées dans le tableau ci-dessous (Tableau 4).

Tableau 4 : Valeurs des quotas critique Q_1N et de subsistance Q_0N pour quelques espèces d'algues brunes

Espèce	Origine	Q_1N	Q_0N	Référence
<i>Chordaria flagelliformis</i> (Ectocarpales)	Canada	0,7%	-	Rosenberg et al., 1984
<i>Fucus distichus</i>	Canada	0,6%	-	Rosenberg et al., 1984
<i>Hinckesia sordida</i> (Ectocarpales)	Australie	2,08% (hiver) - 2,12% (été)	0,88% (hiver) -1,14% (été)	Campbell, 2001

Comme *Chordaria flagelliformis* et *Hinckesia sordida*, *Pylaiella littoralis* est une ectocarpale. D'après les résultats de l'expérience, nous proposons une première estimation de Q_1N à 1,8% pour *Pylaiella*, ce qui est dans l'intervalle formé par *Chordaria* (0,7%) et *Hinckesia* (2,1%). La valeur du quota de subsistance a pu être déterminée pour *Hinckesia*. Il vaut 0,88% en hiver et 1,14% en été. Lors de l'expérience sur *Pylaiella*, le quota N minimal atteint est de 1,07%. Il est donc possible que le Q_0 n'ait pas été atteint lors de l'expérience et qu'il soit inférieur à 1,07%.

Pour mettre en évidence le Q_0 , Il est nécessaire de parvenir à faire descendre le quota en dessous de 1%. Il est pour cela indispensable qu'une croissance significative de *Pylaiella* puisse être mesurée en aquarium. Les conditions de l'expérience ne sont peut-être pas parfaitement adaptées pour la croissance du *Pylaiella*. En particulier, la photopériode appliquée de 16L:8D correspond à de longues durées du jour. Or, *Pylaiella littoralis* est plutôt une espèce de début de printemps et d'automne (Salovius & Bonsdorff, 2004 ; Paalme, 2005), périodes de l'année caractérisées par des durées du jour plus courtes. Les conditions de photopériode appliquées pendant l'expérience ont donc peut-être été une source de stress qui a limité le développement normal de l'algue. Ce paramètre pourra être modifié lors de prochaines expériences.

La remontée de la croissance observée de manière généralisée sur les derniers jours de l'expérience pourrait s'expliquer par un recyclage des nutriments dans le milieu de culture, du fait de processus de dégradation et reminéralisation de la biomasse. Cette hypothèse est d'autant plus probable que les conditions de l'expérience ne sont pas axéniques et que des bactéries ont été introduites dans le milieu via les thalles de *Pylaiella*.

2.3 Compétition entre *Pylaiella littoralis* et *Ulva armoricana*

L'objectif est de suivre l'évolution des deux algues l'une par rapport à l'autre, dans des conditions proches de celles du milieu naturel et à deux saisons différentes dans l'année. Les algues sont mises en compétition à des proportions différentes. Dans la mesure du possible, l'ulve et le *Pylaiella* doivent être récoltées sur le même site dans la baie de Saint-Brieuc.

2.3.1 Matériel et méthodes

2.3.1.1 Calendrier des expériences et origine des algues

Cette expérience devait être conduite à deux saisons différentes, idéalement en sortie d'hiver – période d'installation du bloom de *Pylaiella* – puis en été, quand les ulves reprennent généralement le dessus. Cependant, les conditions climatiques de l'hiver 2012-2013 (faible ensoleillement, faible température), ont retardé l'apparition des algues. L'expérimentation a été retardée jusqu'au mois de juin pour espérer pouvoir récolter les deux algues sur le site de la baie de Saint-Brieuc. Finalement, pour des raisons d'absence de *Pylaiella* en baie de saint-Brieuc, la première expérience a été réalisée avec des algues d'origines différentes : l'ulve a été récoltée à Morieux en baie de Saint-Brieuc et le *Pylaiella* a été récolté à La Fresnaye. Pour la deuxième expérience, les algues provenaient toutes les deux du même site en baie de Saint-Brieuc (Tableau 5).

Tableau 5 : Dates des expériences de compétition et origine des algues utilisées

Saison (dates et durée de l'expérience)	Date et lieu de prélèvement des algues
Été (du 27/06 au 17/07 soit 20 jours)	- <i>Ulva armoricana</i> : 24/06, Morieux (22) - <i>Pylaiella littoralis</i> : 26/06, La Fresnaye (22)
Automne (du 18/09 au 24/10 soit 36 jours)	- <i>Ulva armoricana</i> : 16/09, Hillion (22) - <i>Pylaiella littoralis</i> : 16/09, Hillion (22)

2.3.1.2 Conditions de réalisation de l'expérience

Les expériences sont réalisées en extérieur, en aquarium en verre de 20L, en circuit ouvert avec un renouvellement continu d'eau de mer naturelle de l'ordre de 95 mL/minute. Les thalles d'ulves sont coupés aux ciseaux pour éviter le colmatage de la crépine de sortie. Quatre proportions d'algues sont testées, avec un poids constant d'ulves fixé à 30 g frais essoré par aquarium au début de l'expérience (Tableau 6). Un aquarium ne contenant que de l'ulve et un autre ne contenant que du *Pylaiella* servent de témoins. L'intensité lumineuse reçue sur la station du CEVA (plus précisément le rayonnement photosynthétique actif ou « PAR ») et la température dans les aquariums sont suivies en continu.

Tableau 6 : Quantités d'algues introduites dans les aquariums en début d'expérience et % correspondants

n° aquarium	<i>Ulva</i> (g)	<i>Pylaiella</i> (g)	Quantité totale d'algues (g)	Ratio <i>Ulva</i> : <i>Pyla</i>
1 (« témoin ulve »)	30	0	30	1 : 0
2	30	7,5	37,5	1 : 0,25
3	30	22,5	52,5	1 : 0,75
4	30	37,5	67,5	1 : 1,25
5	30	52,5	82,5	1 : 1,75
6 (« témoin <i>Pylaiella</i> »)	0	30	30	0 : 1

Etant donné que l'on travaille en aquarium en verre, l'intensité lumineuse reçue par les algues est forte (surtout pour l'expérience d'été) ce qui peut être néfaste pour les algues. L'intensité lumineuse est donc réduite par mise en place d'un grillage autour de l'aquarium, ce qui procure un léger ombrage et ce qui reproduit l'ombrage naturel *in situ* occasionné par les algues présentes dans la colonne d'eau (Figure 7).

Le suivi est qualitatif : tous les jours en début d'après-midi, les aquariums sont pris en photos pour suivre l'évolution d'une population par rapport à l'autre selon les proportions de mélange testées. L'expérience doit durer tant que les deux populations survivent. Quand il apparaît clairement qu'une des deux algues a pris le pas sur l'autre, les algues sont récoltées, triées et pesées (après essorage 1 min à la centrifugeuse électrique) pour déterminer les % finaux. Les biomasses sont séchées à 50°C pendant 12h pour déterminer leur poids sec. Ces échantillons séchés sont conservés pour analyse ultérieure des quotas N et P si besoin. A la fin de l'expérience, un échantillon d'eau est également prélevé dans chaque aquarium pour analyse des nitrates et phosphates (analyse en sous-traitance par spectrométrie selon la méthode RNO, certifiée Cofrac).

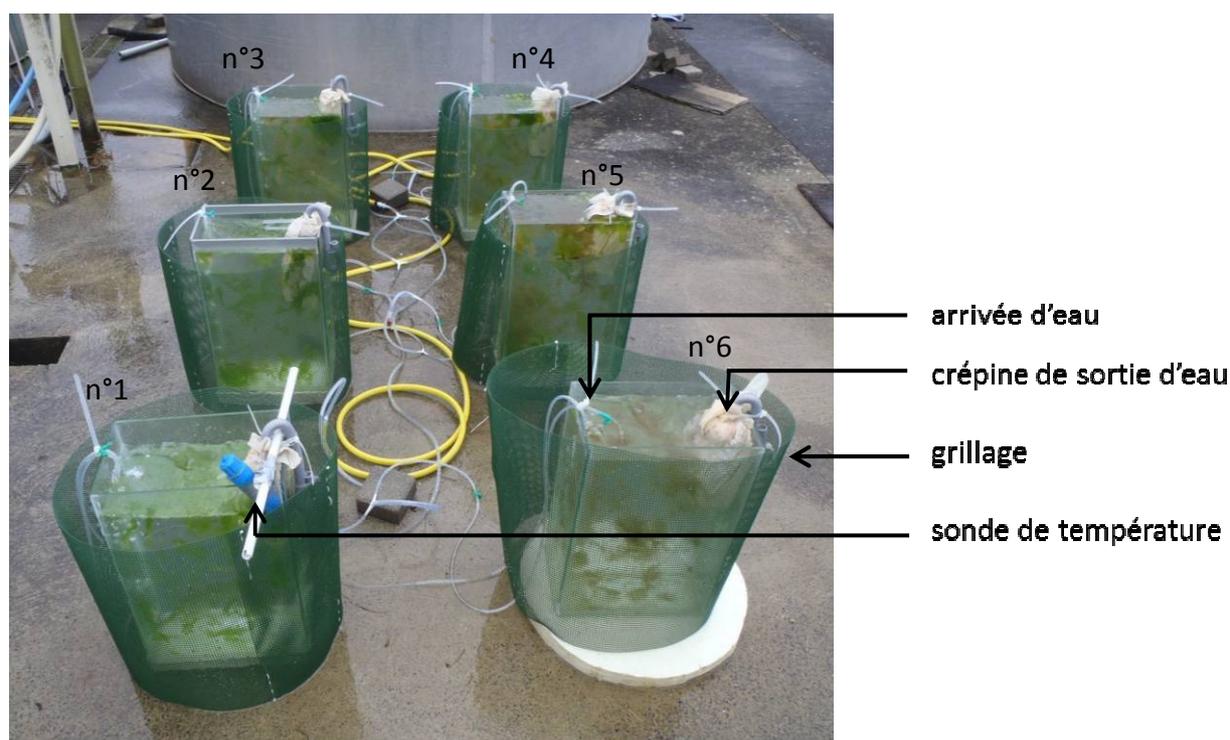


Figure 7 : Dispositif expérimental mis en place pour les expériences de compétition d'été et d'automne

2.3.2 Résultats

Les données de température et de PAR (photosynthetic active radiation, correspondant à l'intensité lumineuse reçue dans la bande de 400-700 nm) sont présentées à la Figure 8 et à la Figure 9. Pour une meilleure lisibilité des données de PAR, ce sont les moyennes quotidiennes, calculées sur la période 00:00 à 23:00, qui ont été représentées. La température et l'intensité lumineuse ont été supérieures pendant l'expérience d'été. La température maximale a atteint 33,6°C lors de l'expérience d'été (28,2°C maxi pendant l'expérience d'automne). La température minimale a atteint 8,7°C lors de l'expérience d'automne (14,8°C mini pendant l'expérience d'été).

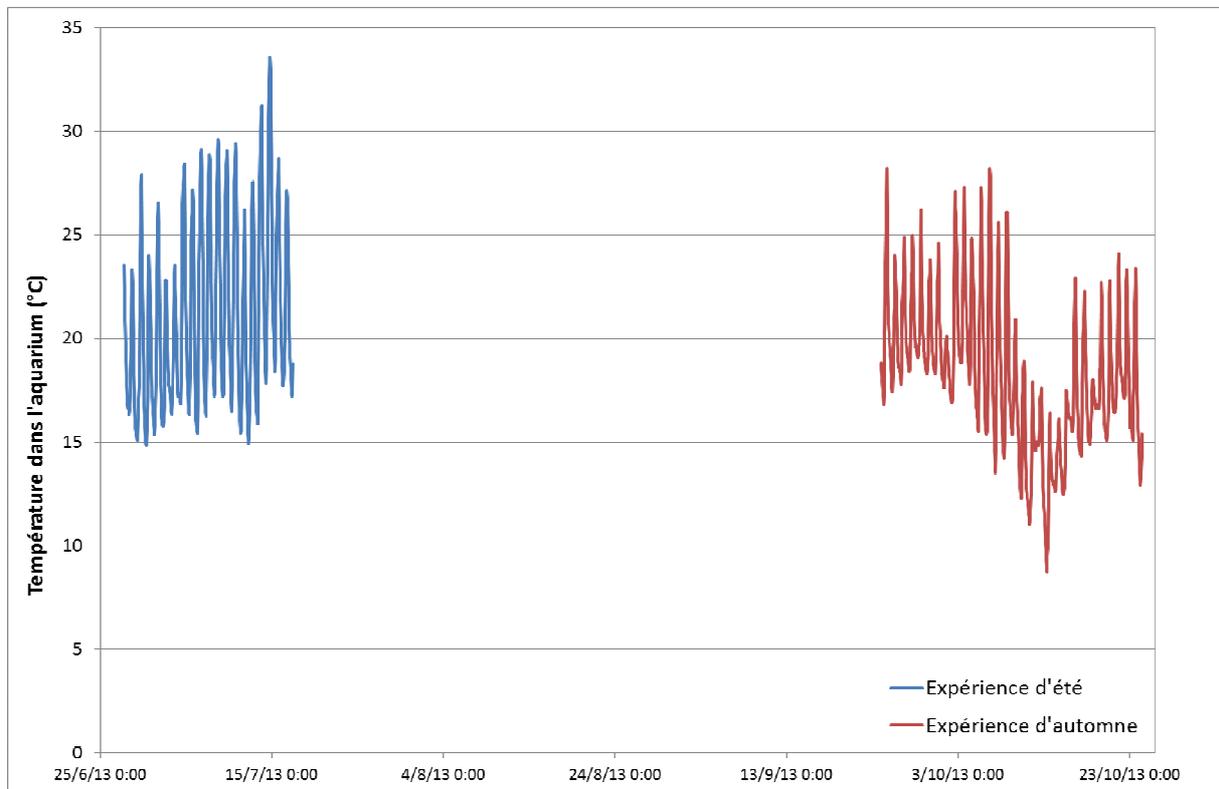


Figure 8 : Température de l'eau mesurée dans l'aquarium n°1 pendant l'expérience d'été (en bleu) et l'expérience d'automne (en rouge) – sonde Odyssey immergée.

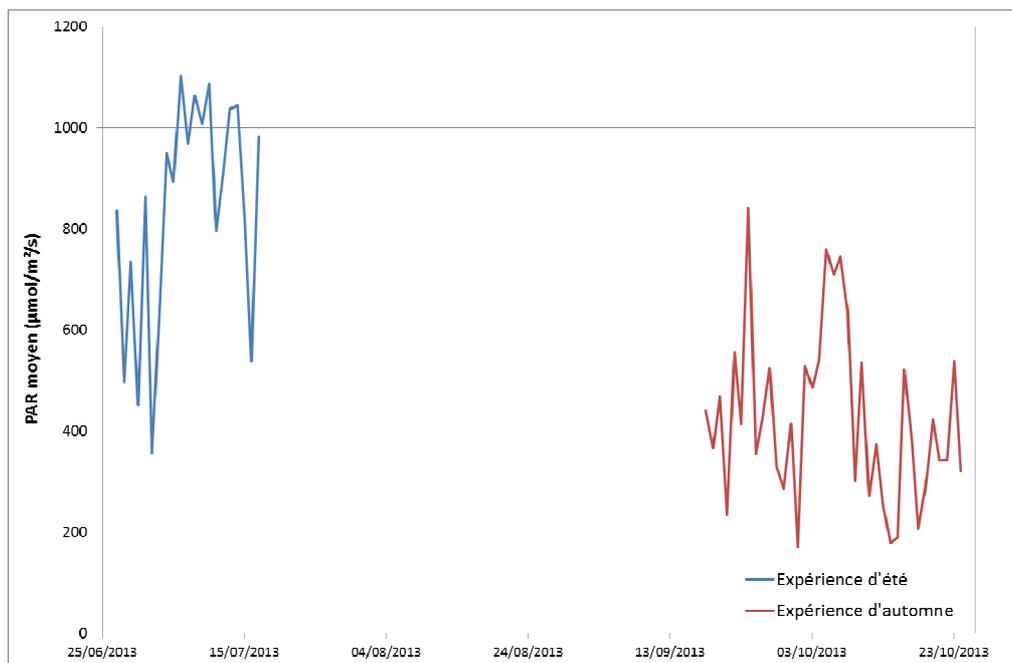


Figure 9 : PAR moyen mesuré sur la station du CEVA pendant l'expérience d'été (en bleu) et l'expérience d'automne (en rouge) – sonde LICOR émergée.

Dans ces expériences, l'évolution des populations est évaluée en valeur relative plutôt qu'en valeur absolue. Il a été choisi d'exprimer les biomasses en % d'occupation de l'aquarium, 100% correspondant à la somme des biomasses d'*Ulva* et de *Pylaiella*. Le pourcentage d'occupation de chaque algue est calculé au début et à la fin de l'expérience puis l'évolution de l'occupation de l'aquarium est analysée. Les résultats sont présentés à la Figure 10 et dans le Tableau 7.

Tableau 7 : Evolution des biomasses d'ulve et de *Pylaiella* au cours des expériences d'été et d'automne

ÉTÉ	aquarium	Début		Fin	
		Ulva (g)	Pyla (g)	Ulva (g)	Pyla (g)
	1	30	0	55,55 (↗)	0
2	30	7,5	57,46 (↗)	0,5 (↘)	
3	30	22,5	53,47 (↗)	1,21 (↘)	
4	30	37,5	60,2 (↗)	2,31 (↘)	
5	30	52,5	59,37 (↗)	0,35 (↘)	
6	0	30	0	4,54 (↘)	

AUTOMNE	aquarium	Début		Fin	
		Ulva (g)	Pyla (g)	Ulva (g)	Pyla (g)
	1	30	0	31,58 (=)	0
2	30	7,5	25,95 (=)	18,46 (↗)	
3	30	22,5	32,41 (=)	45,99 (↗)	
4	30	37,5	25,73 (=)	62,67 (↗)	
5	30	52,5	27,37 (=)	78,73 (↗)	
6	0	30	0	31,15 (=)	

Lors de l'expérience d'été, les populations ont évolué assez rapidement, les premiers signes de dépérissement du *Pylaiella* ayant été observés dès la deuxième semaine d'expérience. Les « pompons » de *Pylaiella* se sont rapidement dégradés, pour laisser la place à l'ulve (Figure 11). L'expérience a été stoppée au bout de 20 jours, quand le *Pylaiella* avait presque entièrement disparu. Ce résultat a été observé dans tous les aquariums, quel que soit le ratio *Ulva:Pylaiella* testé (1:0,25 ; 1:0,75 ; 1:1,25 ; 1:1,75) et y compris dans l'aquarium témoin.

Figure 10 : Evolution de la répartition des deux espèces au cours des expériences d'été (à gauche) et d'automne (à droite) dans les 6 aquariums

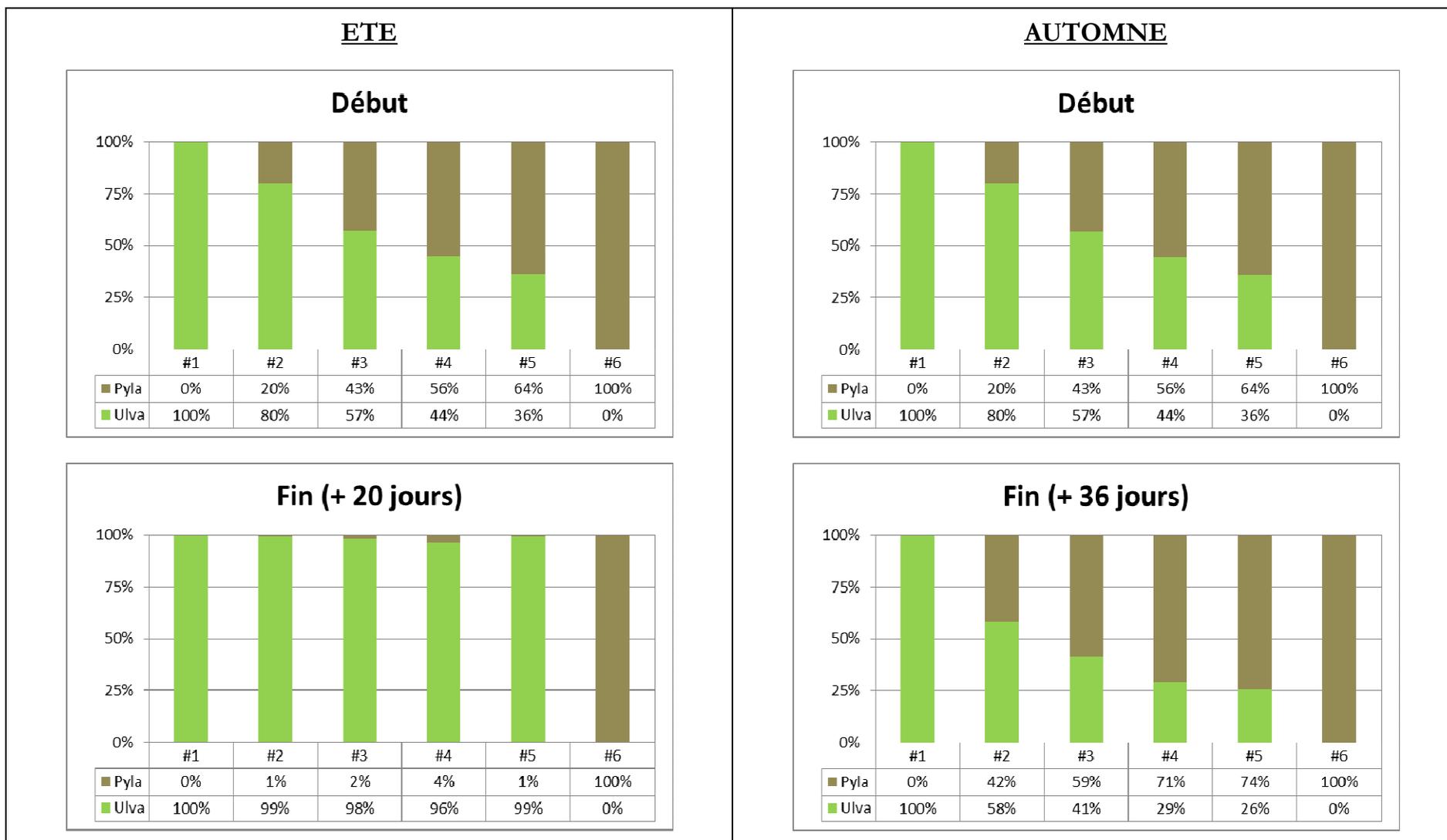




Figure 11 : Aquarium n°4 (ratio de départ 1:1,25) photographié lors de l'expérience d'été, le 2^e jour à gauche et le 12^e jour à droite

En ce qui concerne l'expérience d'automne, les populations ont évolué moins rapidement. L'expérience a été stoppée après 36 jours, alors que le *Pylaiella* était devenu l'espèce majoritaire en termes de biomasse dans tous les aquariums en mélange avec l'ulve (Figure 10). Nous avons pu trier et peser une biomasse non nulle d'ulves mais l'aspect visuel des lames était caractéristique d'un épuisement physiologique de l'algue. Si dans l'aquarium témoin la biomasse s'est maintenue à un niveau équivalent au début de l'expérience, les lames étaient très claires, voire blanches (Figure 12). De même dans les aquariums en mélange avec le *Pylaiella*, les ulves se sont décolorées au fur et à mesure du temps et le *Pylaiella* a peu à peu pris le pas sur l'ulve. Il est à noter que les ulves étaient moins décolorées lorsqu'elles étaient en mélange, c'est-à-dire que la biomasse totale [ulve + *Pylaiella*] était plus importante dans l'aquarium (Figure 13). L'auto-ombrage procuré par une biomasse importante dans l'aquarium a probablement réduit le niveau de stress subi par les ulves. Il faut noter que l'expérience a été stoppée alors que les ulves avaient entièrement blanchi dans l'aquarium témoin. Les biomasses d'ulves étaient alors quasiment égales aux biomasses de départ mais il est très probable que les ulves auraient disparu en peu de temps si l'expérience avait été poursuivie au-delà du 36^e jour.



Figure 12 : Aspect des ulves dans l'aquarium témoin (n°1) le dernier jour de l'expérience d'automne



Figure 13 : Aspect des ulves dans l'aquarium n°5 (1:1,75) le dernier jour de l'expérience d'automne

Les analyses de nitrates et phosphates dans l'eau des aquariums sont présentées ci-dessous (Tableau 8). Les phosphates sont systématiquement en-dessous du seuil de quantification (fixé à $0,1 \mu\text{mol/L}$ soit $3,1 \mu\text{g P-PO}_4 /\text{L}$). Concernant les nitrates, les observations sont différentes selon la saison :

- Pour l'expérience d'été, les nitrates sont en faible quantité dans l'aquarium 1 (témoin à 100% d'ulve) et en quantité significativement supérieure dans les aquariums 2 à 6. Contrairement à l'aquarium 1, les aquariums 2 à 6 contiennent du *Pylaiella*. Les fortes teneurs en nitrates observées semblent être corrélées à la dégradation de la biomasse de *Pylaiella*. Des phénomènes de reminéralisation ont dû avoir lieu, favorisés par ailleurs par les fortes températures observées pendant la période.
- Pour l'expérience d'automne, les nitrates sont systématiquement en-dessous du seuil de quantification (fixé à $0,1 \mu\text{mol/L}$ soit $1,4 \mu\text{g N-NO}_3 /\text{L}$), sauf pour l'aquarium 1 où l'analyse donne $0,44 \mu\text{mol NO}_3/\text{L}$ (soit $6,16 \mu\text{g N-NO}_3/\text{L}$). L'aquarium 1 ne contient que des ulves qui présentaient à la fin de l'expérience un mauvais état physiologique (Figure 12). Il est probable que dans cet état la consommation de nitrates par les ulves est réduite, ce qui explique qu'il reste une certaine quantité de nitrates dans le milieu. Par contre, dans les aquariums 2 à 6 où le *Pylaiella* est présent et se porte bien, les nitrates disponibles sont consommés par le *Pylaiella*. D'ailleurs, dans les aquariums 2 à 5 où les ulves et le *Pylaiella* sont présents en mélange, une croissance nette de biomasse de *Pylaiella* est observée entre le début et la fin de l'expérience (ce qui n'est pas le cas dans l'aquarium témoin à 100% *Pylaiella*). Il est possible que des processus de dégradation et reminéralisation de la biomasse d'ulves aient fourni un apport supplémentaire de nutriments dans le milieu, consommé par le *Pylaiella* pour sa croissance.

Tableau 8 : Teneurs en nitrates et phosphates dans les aquariums à la fin des expériences

ETE	aquarium	Ratio ulva:pylaeilla	NO3 ($\mu\text{mol/L}$)	PO4 ($\mu\text{mol/L}$)
	1	1 : 0	0,36	< 0,1
	2	1 : 0,25	45	< 0,1
	3	1 : 0,75	44	< 0,1
	4	1 : 1,25	34	< 0,1
	5	1 : 1,75	37	< 0,1
	6	0 : 1	42	< 0,1

AUTOMNE	aquarium	Ratio ulva:pylaeilla	NO3 ($\mu\text{mol/L}$)	PO4 ($\mu\text{mol/L}$)
	1	1 : 0	0,44	< 0,1
	2	1 : 0,25	< 0,1	< 0,1
	3	1 : 0,75	< 0,1	< 0,1
	4	1 : 1,25	< 0,1	< 0,1
	5	1 : 1,75	< 0,1	< 0,1
	6	0 : 1	< 0,1	< 0,1

2.3.3 Discussion

Le tableau ci-dessous résume les observations faites lors des expériences et les hypothèses émises pour expliquer ces observations (Tableau 9).

Tableau 9 : Résumé des observations et des hypothèses explicatives des expériences de compétition d'été et d'automne entre l'ulve et le *Pylaiella*

Saison de l'expérience	Conditions environnementales		Observations	Hypothèses explicatives
	Température moyenne (°C)	PAR moyen ($\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$)		
ETE	21,2	837,6	<ul style="list-style-type: none"> - Rapide dégradation du <i>Pylaiella</i> dans tous les aquariums (y compris le témoin) - Croissance nette de l'ulve dans tous les aquariums où elle est présente (y compris le témoin) 	<ul style="list-style-type: none"> - Dégradation du <i>Pylaiella</i> à mettre en relation avec des conditions environnementales peu favorables à cette algue (températures élevées et fort ensoleillement) - Le <i>Pylaiella</i> disparaît, au profit de l'ulve qui se développe
AUTOMNE	18,3	424,8	<ul style="list-style-type: none"> - Evolution plus lente - Décoloration des lames d'ulve dans tous les aquariums - Maintien du <i>Pylaiella</i> dans l'aquarium témoin et croissance nette dans les aquariums en mélange avec l'ulve 	<ul style="list-style-type: none"> - Dégradation de l'état physiologique de l'ulve à mettre en relation avec des conditions environnementales peu favorables à l'ulve (températures plus faibles et moindre ensoleillement) - Au contraire, les conditions sont favorables au maintien voire au développement du <i>Pylaiella</i> - Si l'expérience avait été poursuivie au-delà, une disparition de la biomasse d'ulve aurait probablement été observée

Les résultats de ces deux expériences sont en cohérence avec les optimums de développement décrits pour ces deux algues. *Pylaiella littoralis* n'est pas adapté aux conditions de fortes températures (Müller, 1999) et n'a pas survécu lors de l'expérience d'été où la température moyenne était de 21,2°C avec un maximum à 33,6°C. Au contraire, l'ulve a montré une croissance nette pendant cette expérience, bénéficiant par ailleurs des nutriments recyclés à partir de la biomasse de *Pylaiella*. Lors de l'expérience d'automne, c'est l'ulve qui a souffert des conditions environnementales, caractérisées par des températures plus faibles et un moindre ensoleillement. Les ulves sont mieux adaptées aux conditions printanières et estivales (Merceron et al., 2007) et, selon les espèces et leurs origines, la croissance est optimale entre 19°C et 28°C (Geertz-Hansen & Sand-Jensen,

1992 ; Kapraun, 1969 ; Mathot, 1982 ; Pádua et al., 2004). Au contraire, *Pylaiella littoralis* est mieux adapté aux conditions de faible température et faible ensoleillement (Pomeroy & Stockner, 1976 ; Paalme, 2005). Les populations de la mer Baltique sont d'ailleurs décrites comme des espèces de début de printemps ou d'automne (Salovius & Bonsdorff, 2004), périodes de l'année où la production primaire de l'algue est à son maximum (Paalme, 2005). Un autre facteur qui pourrait être responsable de la dégradation de l'état physiologique des ulves est le raccourcissement de la durée du jour. Ménesguen (2003) dit en effet que le bloom d'ulves ne peut s'installer que si la durée d'ensoleillement est suffisante. Or, durant cette expérience d'automne, les jours avaient beaucoup raccourci par rapport à l'expérience d'été.

2.4 Conclusion des expériences de l'année 2013

L'objectif pour cette année 2013 était double.

Premièrement, il s'agissait de consolider les valeurs de Q_1N et Q_0N pour *Pylaiella littoralis*, suite aux expériences de 2012 qui n'avaient pas permis de conclure sur ces valeurs. Cette année, une première estimation du quota critique pour l'azote Q_1N est proposée à 1,8%, valeur qui se situe dans l'intervalle connu pour d'autres Ectocarpales. Au contraire, il n'a pas été possible de conclure sur la valeur du quota de subsistance Q_0N . Celui-ci semble être inférieur à 1%, ce qui est cohérent avec les valeurs connues pour l'ulve (Tableau 15). De nouvelles expériences devront être mises en place pour parvenir à un épuisement plus fort du quota azoté du *Pylaiella littoralis* en conditions contrôlées de culture au laboratoire du CEVA.

Deuxièmement, les conditions favorables au développement prépondérant de *Pylaiella littoralis* lorsqu'elle est en compétition avec l'ulve ont été explorées au travers d'expériences de compétition en aquarium. Les facteurs environnementaux – température, intensité lumineuse, photopériode – semblent avoir été responsables du développement prépondérant d'une espèce sur l'autre, sans que la densité d'une espèce par rapport à l'autre ait d'influence. Contrairement à l'ulve, le développement prépondérant de *Pylaiella littoralis* est favorisé en conditions automnales (température et intensité lumineuse plus faibles qu'en été et raccourcissement de la durée du jour). Par analogie, on peut penser que le développement de *Pylaiella littoralis* est favorisé à la sortie de l'hiver, alors que les conditions ne sont pas encore tout à fait propices à la croissance de l'ulve.

3 Amélioration des connaissances biologiques

3.1 Rappel des objectifs et du programme de travail

L'année 2013 a été consacrée à l'approfondissement des connaissances concernant les proliférations de *Pylaiella littoralis*, nouvellement observées en baie de Saint-Brieuc (depuis 2011) et les proliférations de *Solieria chordalis* dont les échouages semblent de plus en plus présents et importants sur les côtes de la Bretagne sud (notamment au large de la presqu'île de Rhuys). Les approches *in situ* ont été privilégiées avec un suivi sur site renouvelé au cours de l'année pour mieux comprendre l'évolution de ces populations. Deux types d'étude ont été menés selon la population algale étudiée :

- Concernant *Pylaiella littoralis*, une mission de terrain a été menée une fois par mois entre janvier et décembre 2013 au cours de laquelle étaient mesurées en trois points les valeurs de température de l'eau, salinité, oxygène et pH. Un prélèvement d'eau a également été effectué de façon à suivre l'évolution des concentrations en azote et phosphore dissous. Enfin des prélèvements d'algues (*Pylaiella* et/ou ulves selon la présence des algues) ont été effectués de façon à suivre l'évolution des quotas azotés et phosphorés au cours de l'année.
- Concernant *Solieria chordalis*, une estimation de la biomasse présente au large de la presqu'île de Rhuys a été effectuée à trois reprises au cours de l'année 2013 de façon à analyser l'évolution saisonnière. Par ailleurs, les paramètres physico-chimiques (température, oxygène, salinité, pH, turbidité) ainsi que la concentration en éléments nutritifs (azote et phosphore) dissous ont été également mesurés lors de ces 3 missions.

3.2 Analyse sur site du cycle biologique complet de *Pylaiella littoralis* dans la baie de Saint-Brieuc

3.2.1 Matériel et Méthodes

3.2.1.1 Calendrier des missions effectuées

Une fois par mois entre janvier et décembre 2013, un opérateur s'est rendu dans la baie de Saint-Brieuc pour effectuer les mesures de température, salinité, oxygène, pH. Un prélèvement d'eau a également été effectué pour permettre un suivi des concentrations en nitrates, ammonium et phosphore dissous dans l'eau. Les jours de prélèvements ainsi que les conditions météorologiques sur le terrain sont résumées dans le Tableau 10.

Tableau 10 : Calendrier des missions effectuées précisant, la date, le coefficient de marée, l'heure de basse mer, la plage horaire durant laquelle les mesures des paramètres physico-chimiques et les prélèvements d'eau ont été effectuées et les conditions météorologiques (vent, couverture nuageuse)

Date	Coefficient	Heure de Basse Mer	Plage horaire de mesures	Vent (direction/force)	Couverture nuageuse
24/01/2013	54	11:44	11:50 -12:25	Absent	80 %
22/02/2013	49	11:15	11:20-11:50	Est/6	20 %
25/03/2013	73	12:15	12:11-12:31	Nord/1	100 %
22/04/2013	56	11:40	11:59-12:29	Absent	100 %
22/05/2013	66	11:51	12:11-12:35	Nord/3	50 %
19/06/2013	53	09:58	10:40-11:00	Nord - nord-ouest/1	80 %
19/07/2013	56	10:38	10:05-10:30	Absent	100 %
19/08/2013	85	12:52	12:44-13:15	Nord-est/3-4	50 %
16/09/2013	63	11:34	11:55-12:20	Ouest/5	100 %
21/10/2013	88	15:48	15:08-15:35	Sud-ouest/4-5	90 %
13/11/2013	60	09:53	9:50-10:10	Absent	15 %
12/12/2013	54	09:12	9:27-9:48	Est/1	60 %

3.2.1.2 Protocole de mesure des paramètres physico-chimiques et biologiques

- Température, salinité, oxygène, pH

Ces quatre paramètres (dont les unités de mesure et la précision sont indiquées dans le Tableau 11) ont été mesurés en trois points dans le secteur des bouchots dans une épaisseur d'eau d'environ 30 centimètres ; la localisation des points est fonction du niveau de l'eau atteint par les conditions de marées du jour de la mission (Figure 14). La mesure de ces paramètres a été effectuée à l'aide de capteurs plongés dans l'eau reliés à une sonde WTW-Multi 1970i (Figure 15). Chaque capteur fait l'objet d'une calibration et d'une vérification avant chaque mission.

Tableau 11 : Unité et précision de mesure des paramètres acquis avec la sonde WTW-Multi 1970i

Paramètre	Unité	Précision
Température	° C	± 0.1
Salinité	Sans unité	± 0.1
pH	Sans unité	± 0.01
Oxygène	mg.l ⁻¹ / %	± 0.01 / ± 0.1

Localisation des mesures hydrologiques
Baie de Saint-Brieuc - pointe des Guettes - Missions mensuelles 2013

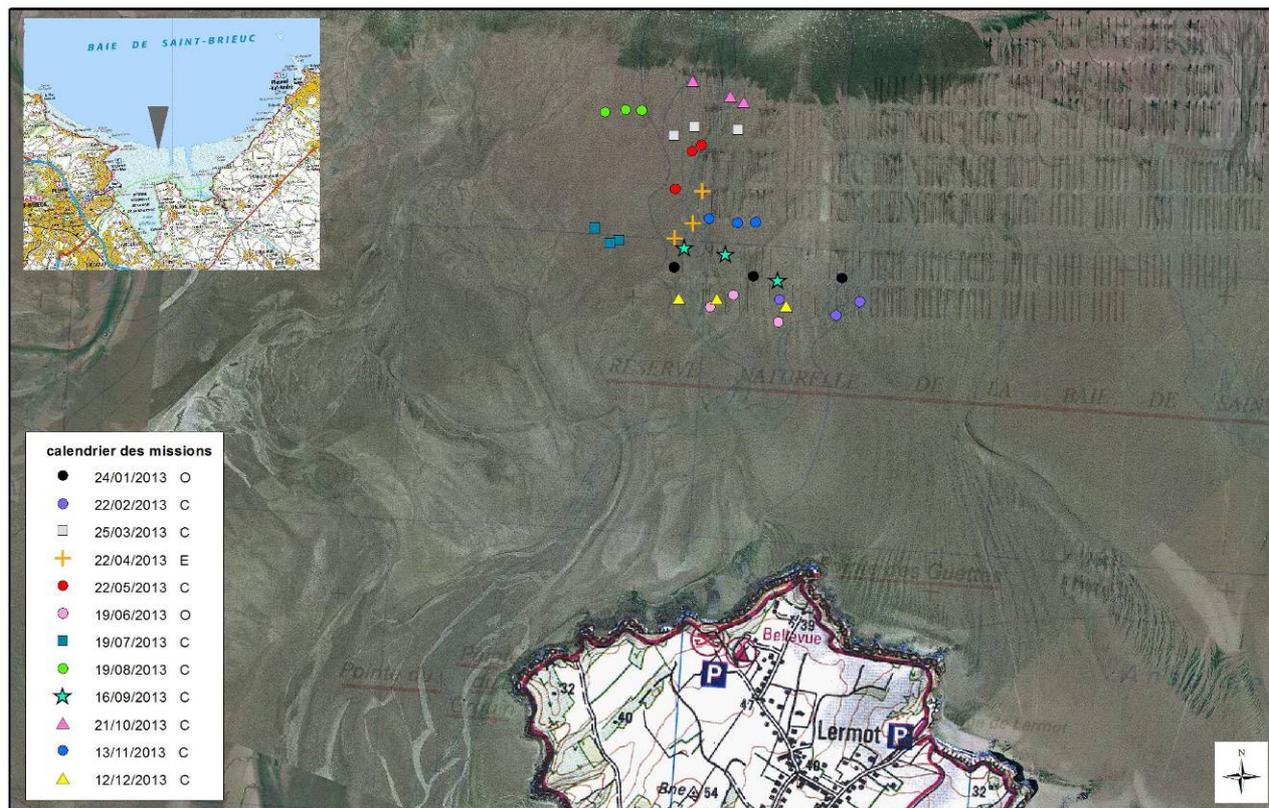


Figure 14 : Localisation des points de mesures hydrologiques effectués lors de chacune des missions de terrain. Dans la légende, les lettres à droite de la date indique sur quel point a été effectué le prélèvement d'eau pour les analyses de nutriments dans l'eau (O : point ouest, C : point du centre, E : point est)



Figure 15 : Illustration du protocole de mesure des paramètres hydrologiques par l'emploi de la sonde WTW-Multi 1970i.

- Suivi des nitrates (NO_3^-), de l'ammonium (NH_4^+) et du phosphore (PO_4^{3-}) dans l'eau

Lors de chaque sortie terrain, un prélèvement d'eau a été effectué dans la zone prospectée, par faible profondeur d'eau (< 30 cm). Le prélèvement a été fait sur un des trois points des mesures hydrologiques. La localisation choisie lors de chaque sortie terrain est signalée dans la Figure 14.

Pour le prélèvement d'eau, l'opérateur suit le protocole suivant :

- *Prélèvement de l'eau dans un flacon de 500 ml préalablement identifié (date, lieu). Le flacon est rincé 3 fois avec l'eau du milieu avant le prélèvement de l'échantillon à analyser.*
- *Conservation de l'échantillon en glacière jusqu'au retour au laboratoire.*
- *Filtration de l'échantillon le jour même (filtre en acétate de cellulose, porosité : $0.45 \mu\text{m}$). Les premiers ml de filtrat sont jetés pour éviter toute contamination par un relargage éventuel d'azote ou de phosphore par le filtre.*
- *Conservation de l'échantillon au congélateur (-18°C)*
- *Envoi des échantillons d'eau congelés au laboratoire sous-traitant pour l'analyse des nitrates, de l'ammonium et du phosphore (analyse par spectrométrie selon la méthode RNO, certifiée COFRAC). La limite de détection est de $0.1 \mu\text{M}$ pour les nitrates, l'ammonium et les orthophosphates*

- Suivi des quotas azotés et phosphorés

Lorsque le matériel algal est présent, l'opérateur prélève, dans la zone prospectée, des thalles d'ulves et de *Pylaiella* selon le protocole suivant.

- *Prélever environ 100 g d'ulves fraîches en plusieurs poignées répartie sur l'ensemble de la zone prospectée pour constituer un échantillon représentatif. Faire de même avec *Pylaiella* qui nécessite une quantité moindre (l'équivalent d'une poignée d'algues essorées).*
- *Récolter séparément les ulves et le *Pylaiella* dans des sacs type sac de congélation préalablement identifiés (date et lieu de prélèvement). L'opérateur prendra soin d'essorer délicatement les algues avant de les mettre dans le sac de façon à assurer des conditions optimales de conservation.*
- *Placer les algues en glacière dans leur sac maintenu ouvert (pour éviter une dégradation précoce de l'échantillon) jusqu'au retour au laboratoire.*

Au laboratoire, les algues sont traitées selon la procédure suivante.

- *Rincer les algues dans plusieurs baignoires d'eau de mer pour les débarrasser du sable et de la macrofaune éventuellement présente et terminer par un rinçage rapide (environ 30 secondes) dans de l'eau déminéralisée pour retirer le sel.*
- *Conservé les échantillons au congélateur (-18°C) au moins 24 h.*
- *Passer les échantillons au lyophilisateur.*
- *Envoyer les échantillons au laboratoire sous traitant pour les analyses de contenus internes en phosphore et en azote des algues (azote Kjeldhal pour les ulves ; azote total pour le *Pylaiella* en microanalyse ; phosphore total pour les ulves et le *Pylaiella*).*

- Suivi de l'évolution des populations algales

Dans le cadre du programme CIMAV P4 et du RCS Loire-Bretagne, un suivi mensuel de la baie par photographie aérienne est effectué d'avril à octobre. En 2013, des campagnes aériennes supplémentaires ont pu être effectuées en début de saison ce qui permet de disposer de clichés aériens de la baie de Saint-Brieuc en février et mars. Ces suivis aériens sont complétés par des vérités terrain qui viennent en appui des photographies de terrain

effectuées chaque mois dans le cadre de la présente étude. L'ensemble de ces informations permettent de mettre en lien l'évolution générale des 2 populations algales au niveau de la baie avec l'évolution des quotas et des paramètres abiotiques mesurés dans l'eau.

3.2.2 Résultats - Discussion

3.2.2.1 Evolution des paramètres physico-chimiques

L'évolution annuelle de la **température de l'eau** (Figure 16) a montré une variation saisonnière classique avec un maximum à près de 24°C en août et un minimum de 4.2°C en décembre.

De façon à caractériser l'année 2013 vis-à-vis de l'évolution annuelle de la température de l'eau, les données enregistrées à la station Astan du réseau SOMLIT (Roscoff) en 2013 ont été comparées à la moyenne pluri-annuelle des températures de l'eau relevées entre 2001 et 2012 (Figure 17). **En 2013, les eaux sont restées froides** notamment de la période entre mars et juillet avec un écart de température vis-à-vis de la moyenne évoluant entre 0.5 et 1.5°C suivant les mois.

L'évolution annuelle de la **salinité** (Figure 16) a montré des variations en lien avec les arrivées d'eaux douces notamment de l'Urne compte tenu des points de prélèvements. Ainsi, la salinité a été variable lors des mois les plus pluvieux (janvier –avril) avec un minimum de 27.8. Entre mai et décembre, la salinité s'est stabilisée entre 33 et 35, démontrant la diminution des apports d'eaux douces au profit d'une influence essentiellement marine.

L'évolution annuelle de l'**oxygène dissous** (Figure 16) dans l'eau a été également très variable avec une saturation supérieure à 100 % de juin à novembre, période durant laquelle d'importantes biomasses d'algues étaient présentes au niveau des points de mesure. Les valeurs d'oxygène mesurées attestent de l'activité photosynthétique des algues qui, en plus d'influencer la concentration d'oxygène dissous dans l'eau, a une influence sur le **pH** de l'eau qui devient plus alcalin au fur et à mesure que l'activité photosynthétique augmente. C'est pourquoi les évolutions de pH et d'oxygène présentent des profils comparables.

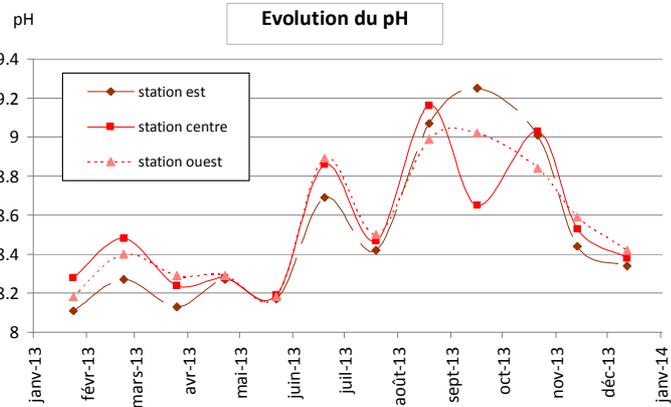
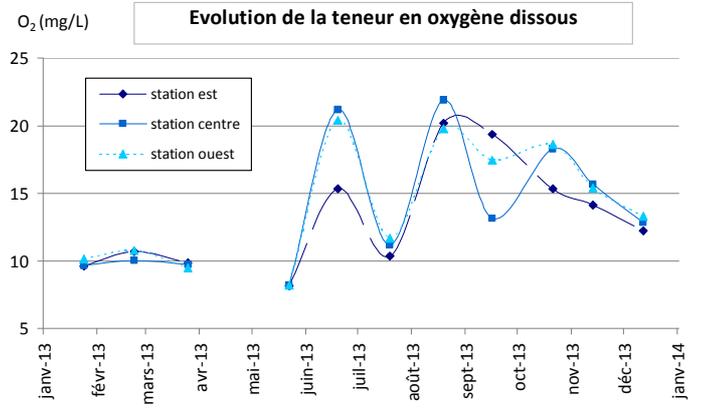
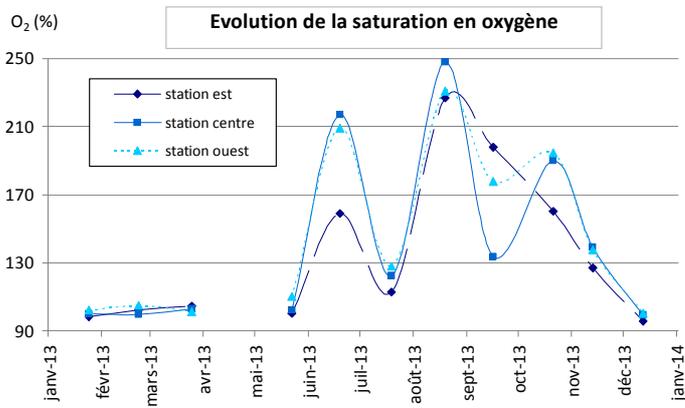
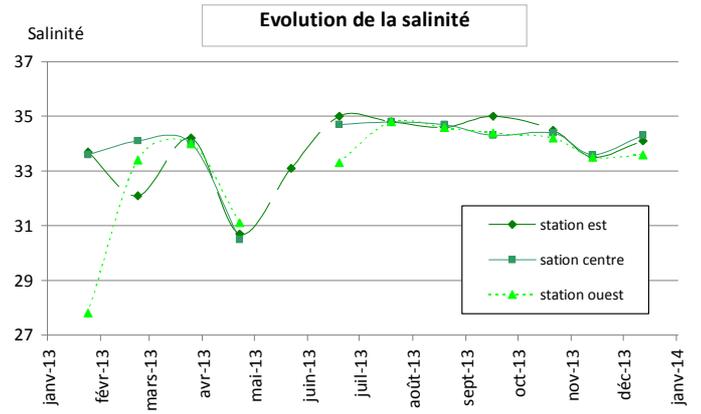
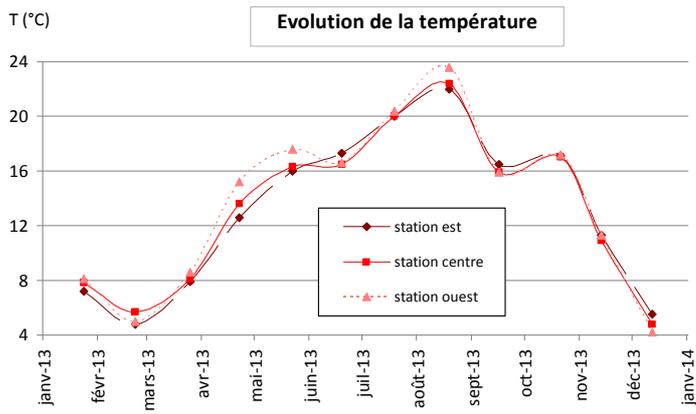


Figure 16 : Evolution annuelle des différents paramètres physico-chimiques en baie de Saint-Brieuc (voir Figure 14 pour la localisation précise des mesures). Les données manquantes correspondent à l'absence de mesure due à une défaillance de la sonde.

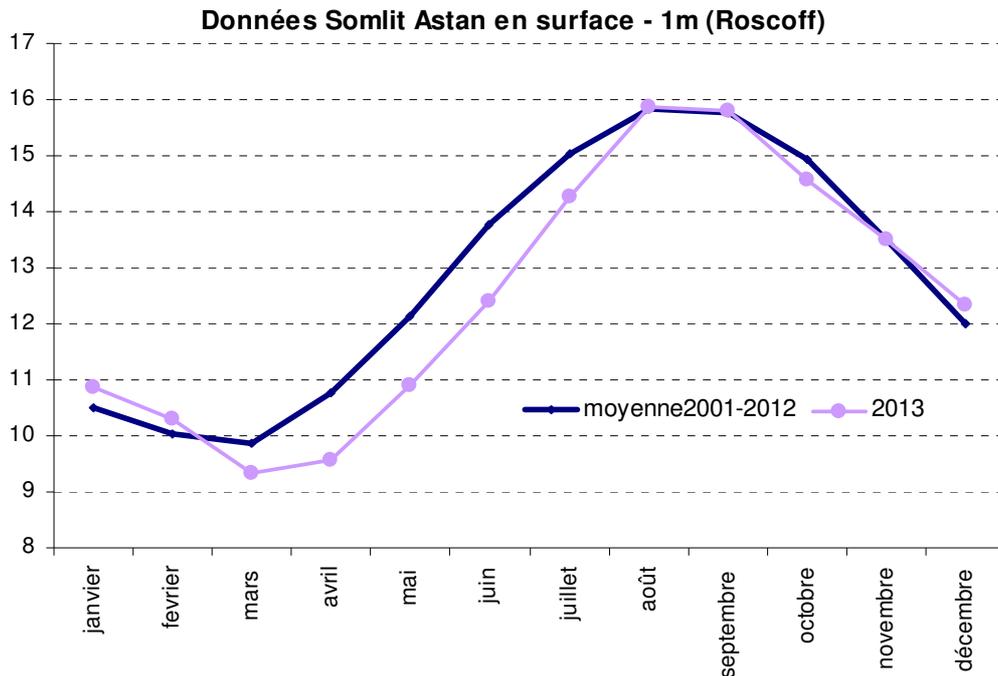


Figure 17 : évolution annuelle de la température de l'eau en 2013 en comparaison de l'évolution moyenne pluri-annuelle calculée à partir des données de température enregistrées à la station Astan du réseau SOMLIT (données fournies par le Service d'Observation en milieu Littoral, INSU-CNRS, Station biologique de Roscoff).

L'évolution annuelle de la concentration en nutriments dissous (Figure 18) suit un profil classique avec des eaux riches en fin d'hiver qui s'appauvrissent au fur et à mesure de l'accroissement de la production primaire caractérisé par le développement phytoplanctonique dans un premier temps auquel s'ajoute le développement macroalgal à partir de juin. A noter l'élévation des concentrations en **nitrates** au moins d'avril qui correspond, comme le montre la mesure de salinité à cette même date (Figure 17), à la signature de l'apport d'eau douce chargée en nutriments.

L'**ammonium** a toujours été à des concentrations inférieures à 1 μM de février à octobre (Figure 18). Ces concentrations combinées aux concentrations en nitrates indétectables ou très faibles entre juin et octobre sont insuffisantes pour saturer le taux d'absorption et couvrir le besoin nutritionnel pour soutenir la croissance des ulves. L'analyse des **quotas internes en azote** confirme que la croissance des ulves est limitée par cet élément entre juin et octobre (Figure 19).

La concentration des **orthophosphates** est restée faible entre février et décembre ($< 0.6 \mu\text{M}$), avec une concentration indétectable en avril. Le phosphore est essentiellement fourni par le sédiment et son relargage est dépendant de la température, celui-ci devenant plus important avec l'augmentation de la température. Cette dynamique permet d'expliquer le profil annuel observé qui montre une tendance à l'augmentation au fur et à mesure de l'année avec des eaux plus riches en hiver dû à l'absence de production primaire et donc de consommation des nutriments durant cette période. L'analyse des **quotas en phosphore** des ulves (Figure 19) confirme l'évolution de ce nutriment observé dans la masse d'eau avec une limitation de la croissance des ulves par le phosphore d'avril à juin.

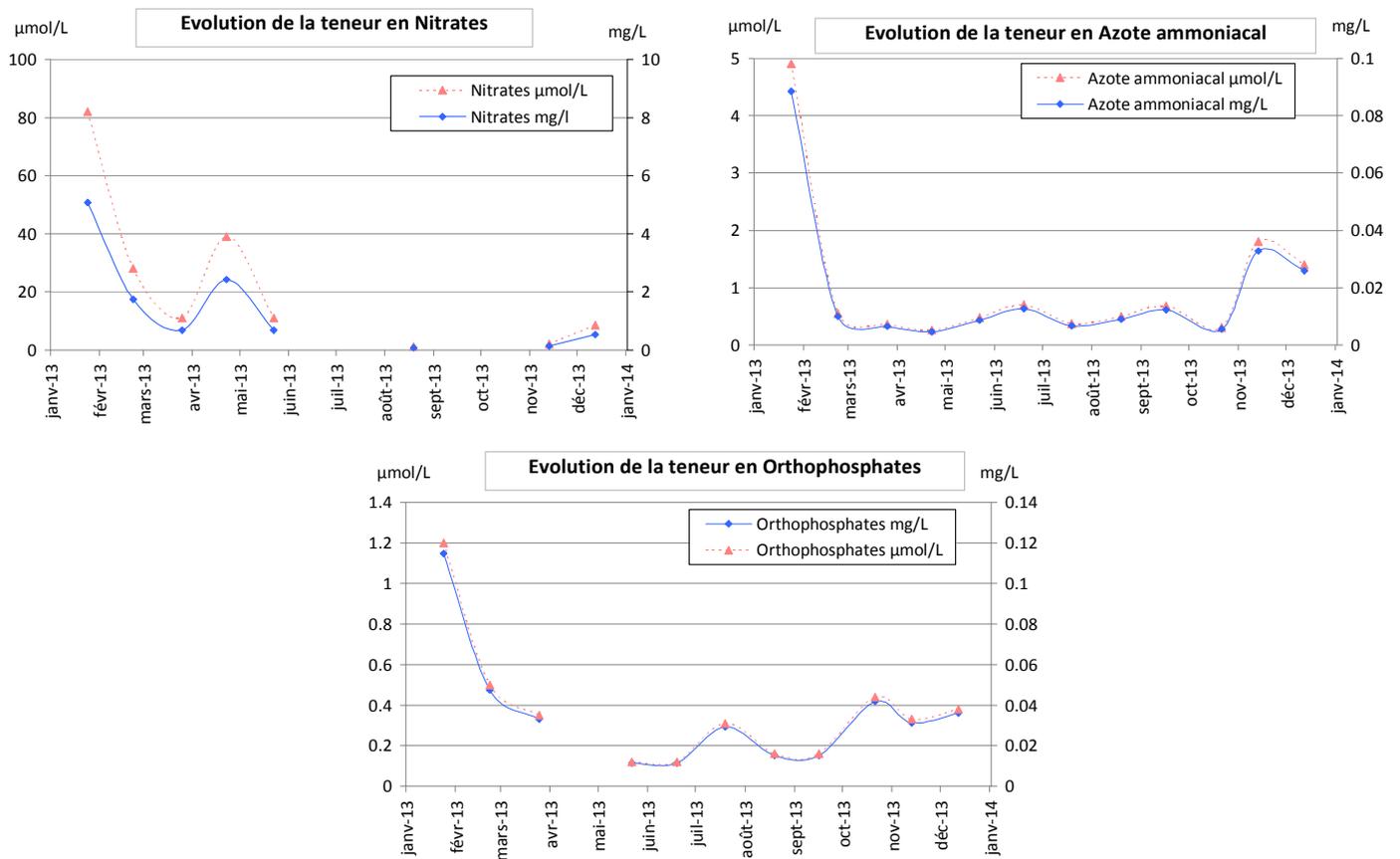


Figure 18 : Evolution annuelle des concentrations en nutriments dissous (nitrates, ammonium et orthophosphates) dans la baie de Saint-Brieuc (voir Figure 14 pour la localisation précise des mesures). L'absence de données graphiques correspond à des dosages de nutriments en dessous de la limite de détection (0.1µM pour les trois paramètres).

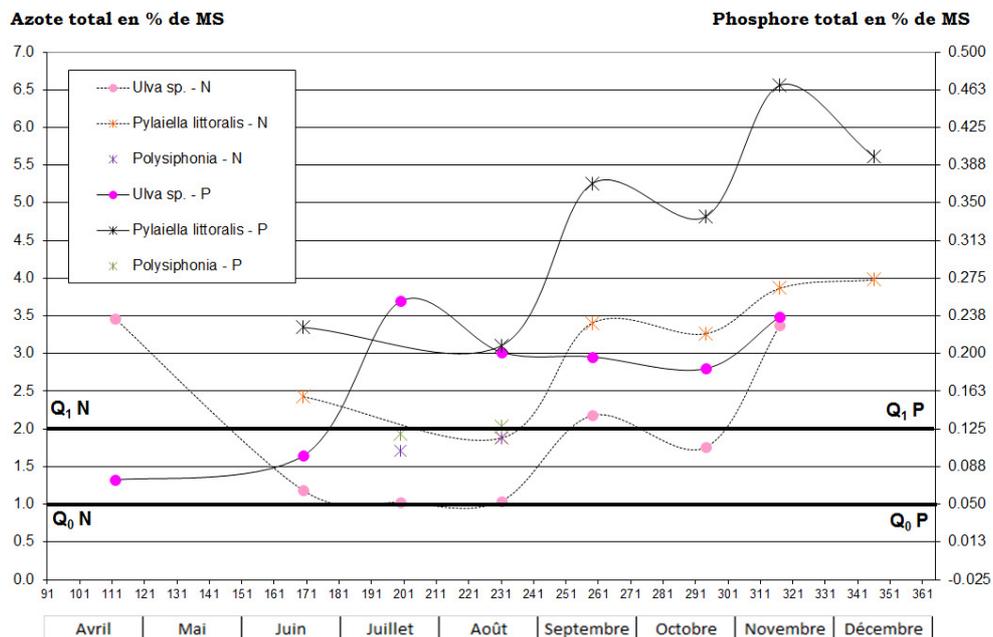


Figure 19 : Evolution des contenus internes en azote et en phosphore des différentes espèces algales présentes en baie de Saint-Brieuc durant l'année 2013. Les quotas critiques (Q1) et de subsistance (Q0) en azote (N) et en phosphore (P) déterminés pour les ulves sont représentés sur le graphique par deux traits noirs plus épais. Lorsque les quotas internes en azote ou en phosphore mesurés dans les ulves sont inférieurs au quota critique alors la croissance des ulves est ralentie. En dessous du quota de subsistance, la croissance des ulves est nulle. Les quotas critiques et de subsistance pour *Pylaiella littoralis* ne sont pas fixés mais les premières expérimentations menées tendent à montrer qu'ils seraient en dessous de ceux des ulves.

3.2.2.2 Evolution annuelle des populations algales

Compte tenu des éléments physico-chimiques, l'année 2013 n'étaient pas une année propice à un développement massif d'ulves en baie de Saint-Brieuc. Le suivi de terrain complété par les photographies aériennes le confirme (Figure 20 à Figure 31).

Les eaux froides du début d'année ont retardé le développement des ulves qui a été réellement marqué à partir de juin. Pour rappel, les expérimentations conduites sur les ulves lors du projet 3 du programme CIMAV en 2009 avaient montré que la croissance optimale des ulves était obtenue pour des températures comprises entre 14 et 25 °C. Or, la température est restée, en moyenne, inférieure à 14°C jusqu'au mois de mars inclus. En avril, les températures mesurées sur le terrain commencent à être supérieures à 14° C. Des fragments d'ulves de petite taille sont alors présents dans la masse d'eau. En mai, les premiers dépôts d'algues vertes de faibles surfaces ont été mesurés (< 1 ha) alors que la température était aux alentours de 16°C. Il semble donc que ce soit à partir de cette date que la température n'ait réellement plus été un élément limitant la croissance des algues vertes.

Dès le début de la prolifération des ulves en juin, les **quotas** montraient une limitation de la croissance par **l'azote et par le phosphore**. C'est pourquoi la prolifération n'a que peu progressé entre juin et juillet et a rapidement diminué par la suite (Figure 32). Même si les surfaces d'algues vertes mesurées peuvent paraître importantes (maximum de près de 150 ha en juillet) elles sont en moyenne 50 % inférieures à la moyennes des surfaces mesurées de 2002 à 2012.

La présence de *Pylaiella littoralis* a été observée sur le terrain en janvier, février et mars avec une biomasse toutefois très faible. Lors des expérimentations menées dans le cadre du projet 3 du programme CIMAV 2010, il a été établi qu'une température comprise entre 10 et 20 °C était nécessaire pour la croissance optimale de *Pylaiella littoralis*. Or, les mesures conduites sur le terrain ont montré des températures évoluant entre 4 et 8°C entre janvier et mars, températures trop faibles pour engendrer une croissance significative de cette algue. A partir d'avril, les températures mesurées deviennent favorables à la fois au développement des ulves et de *Pylaiella* mais de nombreux fragments d'ulves sont visibles dans l'eau. Or les expérimentations de **compétition** ci-avant montrent que dès lors que les conditions sont favorables au développement des ulves, celles-ci prennent rapidement le dessus sur le développement de *Pylaiella*. Le suivi des deux populations au cours de la saison le confirme avec une très faible présence de *Pylaiella* jusqu'en août. Au-delà du phénomène de compétition entre *Pylaiella* et ulves, les températures de l'eau en juillet et août ont été supérieures au maximum de la température optimale pour la croissance de *Pylaiella* (20°C). A noter la présence éphémère mais significative de *Polysiphonia* (algues rouges) au mois de juillet en mélange avec les ulves. En septembre, les conditions de température à nouveau favorables à *Pylaiella* ajouté à la diminution importante de la population d'ulves permettent à la population de *Pylaiella* de se développer de façon significative et de devenir la population algale majoritaire jusqu'au mois de novembre. En fin d'année, la température de l'eau d'environ 5°C couplée à des conditions météorologiques perturbées induisent une importante régression de la population de *Pylaiella* dans la baie.



Figure 20 : Photographie de terrain de la Baie de Saint-Brieuc en janvier. Très peu d'algues sont observées avec la présence de quelques thalles de *Pylaiella littoralis*.



Figure 21 : Photographie aérienne (à gauche) et de terrain (à droite) de la baie de Saint-Brieuc au mois de février. La baie reste, comme en janvier, exempte d'algues. Seuls quelques thalles de *Pylaiella* sont observés.



Figure 22 : Photographie aérienne (à gauche) et de terrain (à droite) de la baie de Saint-Brieuc au mois de mars. La baie reste, comme en janvier et février, exempte d'algues. Seuls quelques thalles de *Pylaiella* sont observés sur l'estran. Un amas brun (indiqué par la flèche rouge) est néanmoins perceptible dans les premiers centimètres d'eau, constitué d'un mélange de *Pylaiella* avec d'autres fragments d'algues.



Figure 23 : Photographies aérienne (à gauche) et de terrain (à droite) de la baie de Saint-Brieuc au mois d'avril. La baie reste, comme en début d'année, exempte d'algues. Dans les premiers centimètres d'eau (en bas, à droite) des fragments d'ulves sont présents en mélange avec du *Pylaiella*.



Figure 24 : Photographies aérienne (à gauche) et de terrain (à droite) de la baie de Saint-Brieuc au mois de mai. Les premiers dépôts algaux sont observés constitués par un mélange d'ulves et de *Pylaiella*.



Figure 25 : Photographies aérienne (à gauche) et de terrain (à droite) de la baie de Saint-Brieuc au mois de juin. Observation de la prolifération d'ulves formant des tapis sur l'estran et un rideau d'algues au bas de la plage, dans l'eau (flèche rouge et photo en bas, à droite).



Figure 26 : Photographies aérienne (à gauche) et de terrain (à droite) de la baie de Saint-Brieuc au mois de juillet. Observation de la prolifération d'ulves en mélange avec quelques fragments de *Pylaiella* et une population significative de *Polysiphonia*. A noter la présence d'ulves plus claires, signe d'une carence en azote.



Figure 27 : Photographies aérienne (à gauche) et de terrain (à droite) de la baie de Saint-Brieuc au mois d'août. Observation de la prolifération d'ulves en mélange avec des fragments de *Pylaiella*. Les ulves présentes sont désormais toutes de couleur claire, signe d'une carence en azote généralisée.



Figure 28 : Photographies aérienne (à gauche) et de terrain (à droite) de la baie de Saint-Brieuc au mois de septembre. Observation de la prolifération d'ulves en mélange avec du *Pylaiella* qui est dominant au niveau des observations faites dans le rideau (en bas, à droite). En revanche, les échouages sont majoritairement composés d'ulves (en haut, à droite).



Figure 29 : Photographies aérienne (à gauche) et de terrain (à droite) de la baie de Saint-Brieuc au mois d'octobre. Une prolifération de *Pylaiella* est observée. Quelques fragments d'ulves subsistent.



Figure 30 : Photographies de terrain de la baie de Saint-Brieuc au mois de novembre. Comme le mois précédent, une prolifération de *Pylaiella* est observée.



Figure 31 : Photographies de terrain de la baie de Saint-Brieuc au mois de décembre. Plus aucune prolifération n'est observable. Seuls quelques fragments de *Pylaiella* sont présents sur l'estran

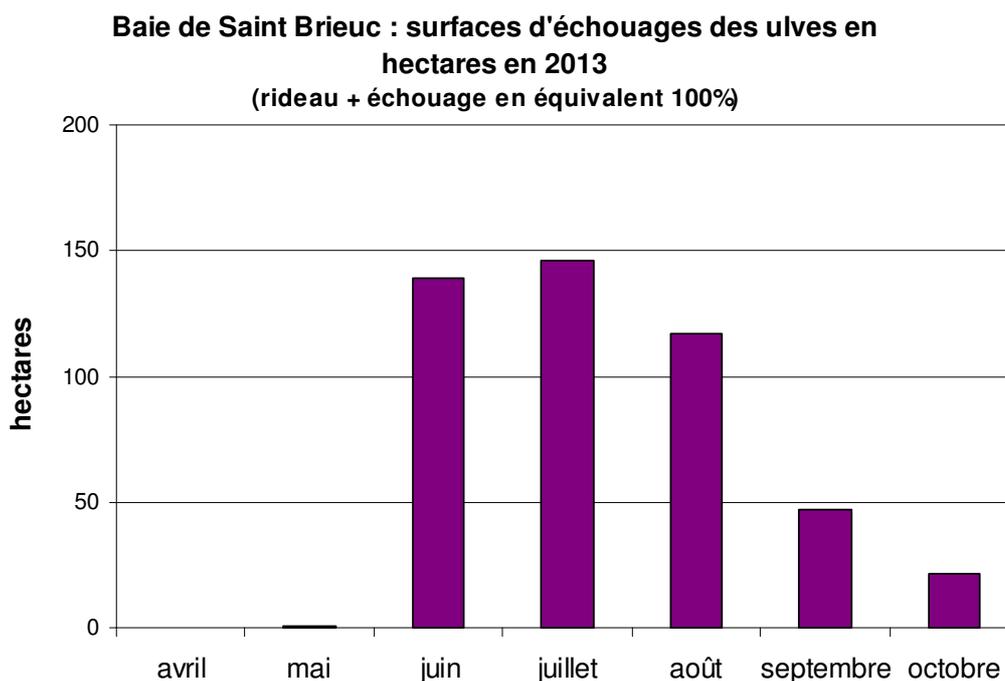


Figure 32 : Evolution des surfaces d'ulves (ha équi 100) en baie de Saint-Brieuc d'avril à octobre 2013. L'absence de données en avril correspond à une absence d'algue.

3.3 Etude de la dynamique de population de l'algue rouge *Solieria chordalis*

3.3.1 Matériel et Méthodes

3.3.1.1 Calendrier des missions effectuées

Trois missions de plongées de 3 jours ont été effectuées au cours de l'année 2013 pour suivre l'évolution de la population de *Solieria* au large de la Presqu'île de Rhuys. Elles se sont déroulées du 14 au 16 mai 2013, du 3 au 5 juillet 2013 et du 24 au 26 septembre 2013. A l'issue de chaque mission, les mesures de température de l'eau, salinité, oxygène dissous, pH et turbidité ont été effectuées en surface en 2 points. Un prélèvement d'eau a également été effectué au niveau de ces deux points au fond et en surface pour permettre un suivi des concentrations en nitrates, ammonium, nitrites et phosphore dissous dans l'eau. Les jours de mesures physico-chimiques/prélèvements d'eau ainsi que les conditions météorologiques sur le terrain sont résumées dans le Tableau 12.

Tableau 12 : Calendrier des missions effectuées précisant, la date, le coefficient de marée, l'heure de basse mer, la plage horaire durant laquelle les mesures des paramètres physico-chimiques et les prélèvements d'eau ont été effectuées et les conditions météorologiques (vent, couverture nuageuse)

Date	Coefficient	Basse Mer (au Croisic)	heure de mesures	Vent (force)	Couverture nuageuse
16/05/2013	50	15:39	14:39-14:42	3	70 %
05/07/2013	56	09:50	11:23-11:52	2	10 %
26/09/2013	73	16:17	13:07-13:17	0	Ciel voilé

3.3.1.2 Protocole de mesure des paramètres physico-chimiques et biologiques

- Température, salinité, oxygène, pH, turbidité

La température, la salinité, le pH et l'oxygène (dont les unités de mesure et la précision sont indiquées dans le Tableau 11) ont été mesurés en 2 points en surface au large de la presqu'île de Rhuys (profondeur maximum d'environ 6 mètres au moment des mesures); la localisation des points est présentée Figure 33. La mesure de ces paramètres a été effectuée à l'aide de capteurs plongés dans l'eau reliés à une sonde WTW-Multi 1970i (Figure 15). Chaque capteur fait l'objet d'une calibration et d'une vérification avant chaque mission.

La mesure de turbidité a été effectuée au moyen d'un disque de Secchi qui, plongé dans l'eau, permet d'évaluer visuellement la profondeur de disparition de celui-ci. Plus la profondeur de disparition est faible, plus les eaux sont turbides. Au fond, la turbidité a été évaluée à travers la visibilité estimée par le plongeur.

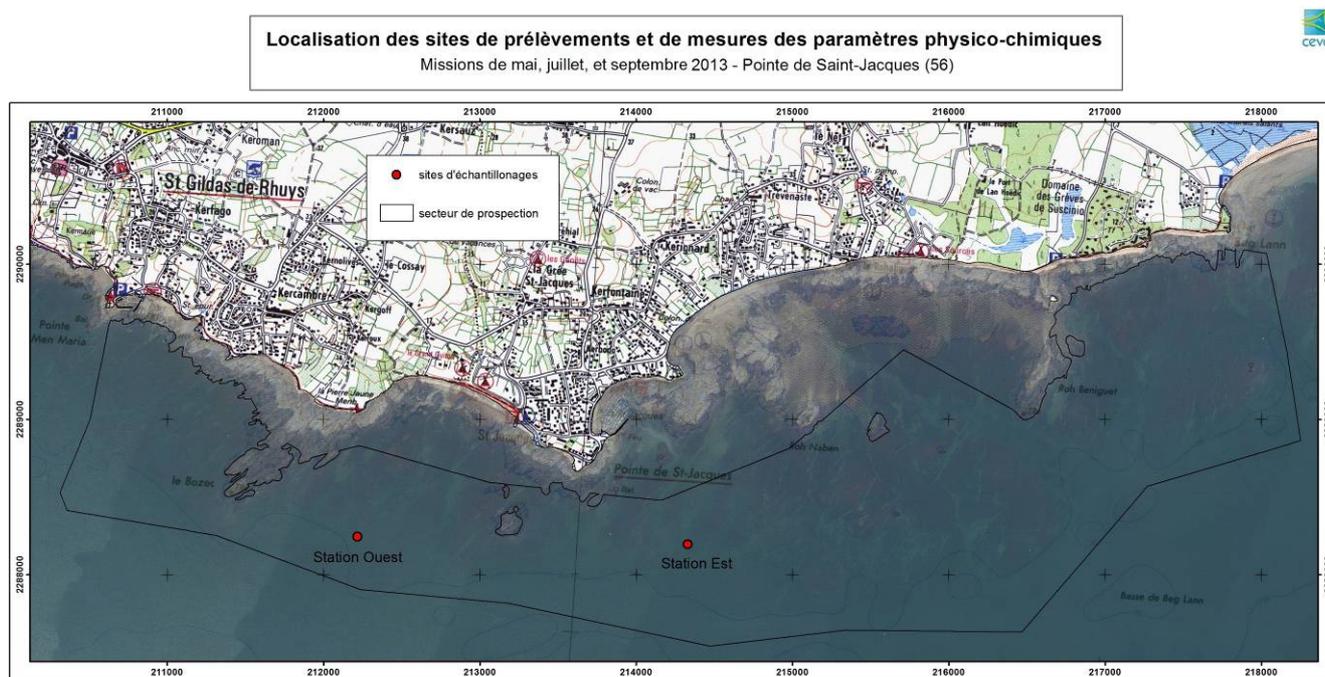


Figure 33 : Localisation des deux points sur lesquels ont été effectuées les mesures par capteurs des paramètres physico-chimique (en surface), ainsi que les prélèvements d'eau (en surface et au fond) et les prélèvements d'algues pour le dosage des quotas azotés et phosphorés.

- Suivi des nitrates (NO_3^-), de l'ammonium (NH_4^+), des nitrites (NO_2^-) et du phosphore (PO_4^{3-}) dans l'eau

Lors de chaque mission, un prélèvement d'eau a été effectué sur chaque point de prélèvement présenté dans la Figure 33, en surface (à la main depuis l'embarcation) et au fond (en plongée). Pour le prélèvement d'eau, l'opérateur suit le protocole suivant :

- Prélèvement de l'eau dans un flacon de 500 ml préalablement identifié (date, lieu). Le flacon est rincé 3 fois avec l'eau du milieu avant le prélèvement de l'échantillon à analyser. Pour l'échantillon du fond, le flacon est rincé avec l'eau de surface.
- Conservation de l'échantillon en glacière jusqu'au retour au laboratoire.
- Filtration de l'échantillon le jour même (filtre en acétate de cellulose, porosité : $0.45 \mu\text{m}$). Les premiers ml de filtrat sont jetés pour éviter toute contamination par un relargage éventuel d'azote ou de phosphore par le filtre.
- Conservation de l'échantillon au congélateur (-18°C)
- Envoi des échantillons d'eau congelés au laboratoire sous-traitant pour l'analyse des nitrates, de l'ammonium des nitrites et du phosphore (analyse par spectrométrie selon la méthode RNO, certifiée COFRAC). La limite de détection est de $0.1 \mu\text{M}$ pour les nitrates, l'ammonium et les orthophosphates et de $0.05 \mu\text{M}$ pour les nitrites.

- Suivi des quotas azotés et phosphorés

Au niveau des deux points de suivis des paramètres physico-chimiques, l'opérateur prélève, en plongée, des thalles de *Solieria chordalis* fixés sur substrat rocheux selon le protocole suivant.

- Prélever environ 100 g de *Solieria chordalis* dans un rayon de quelques mètres pour constituer un échantillon représentatif.
- Après avoir remonté la récolte en surface, les algues sont placées dans un sac type sac de congélation préalablement identifiés (date et lieu de prélèvement). L'opérateur prendra soin d'essorer délicatement les algues avant de les mettre dans le sac de façon à assurer des conditions optimales de conservation.
- Placer les algues en glacière dans leur sac maintenu ouvert (pour éviter une dégradation précoce de l'échantillon) jusqu'au retour au laboratoire.

Au laboratoire, les algues sont traitées selon la procédure suivante.

- Rincer les algues dans plusieurs baigns d'eau de mer pour les débarrasser du sable et de la macrofaune éventuellement présente et terminer par un rinçage rapide (environ 30 secondes) dans de l'eau déminéralisée pour retirer le sel.
- Conserver les échantillons au congélateur (-18°C) au moins 24 h.
- Passer les échantillons au lyophilisateur.
- Envoyer les échantillons au laboratoire sous-traitant pour les analyses de contenus internes en phosphore et en azote des algues (azote Kjeldhal et phosphore total).

- Suivi de l'évolution de la population algale

De façon à suivre l'évolution de la population, il était initialement prévu d'effectuer des transects tractés en plongée sous-marine et de prélever la biomasse présente dans 1 m^2 à chaque changement de densité d'algue visuellement perçue par le plongeur. Sur place, les conditions de visibilité réduites n'ont pas permis de mettre en place cette méthodologie, la traction du plongeur nécessitant une visibilité minimum pour que celui-ci puisse éviter les

obstacles éventuels (filets, roches...). Des plongées ponctuelles ont finalement été effectuées sur chaque point présenté dans la Figure 34. Un quadrat d'1 m² a été disposé sur le fond et la totalité des thalles de *Solieria chordalis* se trouvant à l'intérieur du quadrat a été prélevée, remontée en surface et pesée en poids humide égoutté 1 minute.



Figure 34 : Points sur lesquels ont été mesurées les biomasses de *Solieria chordalis* présentes lors de chacune des 3 missions

3.3.2 Résultats-discussion

3.3.2.1 Evolution des paramètres physico-chimiques

Les mesures des différents paramètres physico-chimiques (température, salinité, Oxygène dissous, pH, turbidité) ont montré des valeurs comparables entre les deux stations (Figure 35).

La température de l'eau a progressée de 5 degré au cours de la saison, accompagnée par une augmentation de la température due notamment à des apports moindre d'eaux douces par la côte au cours de la saison estivale.

Les eaux sont bien oxygénées au cours de la saison avec une saturation maximale a près de 140 % atteinte à la station est en septembre. Cette augmentation est le fait de l'activité des producteurs primaires et notamment du phytoplancton pour ce qui est des mesures faites en surface, l'écart observé entre les valeurs d'oxygène mesurées en septembre aux stations est et ouest s'expliquant par la distribution hétérogène du phytoplancton.

Le **pH** ne subit que de très faibles variations au cours de la saison, ce qui semble normal vu les propriétés « tampon » de l'eau de mer qui empêche de fortes variabilités lorsque la masse d'eau dans laquelle se déroulent les phénomènes biologiques est suffisamment importante.

Le secteur prospecté présente une **turbidité élevée** qui diminue toutefois en surface au cours de la saison du fait d'eaux plus calmes et d'un apport d'eaux douces limité. La visibilité au fond reste néanmoins restreinte et toujours inférieure à 1 m quelle que soit la mission considérée.

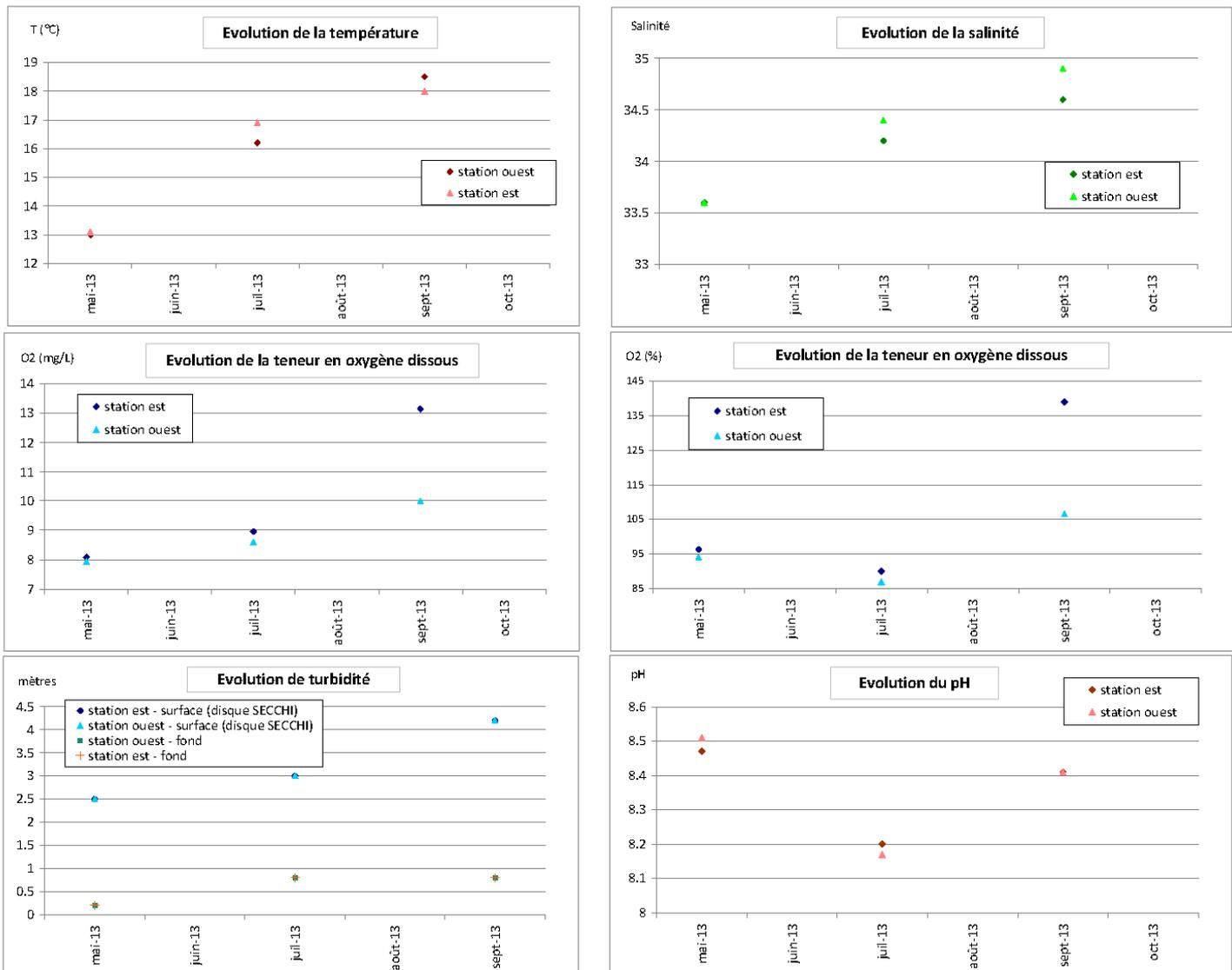


Figure 35 : Mesures des différents paramètres physico-chimiques aux stations est et ouest lors des trois missions effectuées en mai, juillet et septembre. Toutes les mesures ont été effectuées en surface à l'exception de la turbidité qui a pu être estimée en surface et au fond. Il est important de noter que la turbidité est ici mesurée vis-à-vis de la profondeur de disparition du disque de Secchi (en surface) ou selon la visibilité appréhendée au fond par le plongeur. La turbidité sera donc d'autant plus forte que la profondeur indiquée sur le graphique est faible.

L'évolution de la concentration des différents nutriments dissous dans l'eau est présentée Figure 36. La concentration en **nitrates** est comparable d'une station à l'autre et quelle que soit la profondeur. En mai, les concentrations mesurées sont de l'ordre de 4 μM diminuant d'un facteur 3 en juillet et devenant indétectables en septembre. L'évolution des nitrates dans l'eau est en accord avec l'évolution des **quotas azotés** mesurés dans les thalles de *Solieria* (Figure 37).

L'**ammonium** décrit une courbe en cloche avec un maximum atteint en juillet compris entre 1 et 1.4 μM selon la station et la profondeur. Une activité de reminéralisation peut expliquer l'enrichissement temporaire de la masse d'eau en ammonium suite notamment à un bloom phytoplanctonique.

L'évolution des **orthophosphates** est hétérogène selon la profondeur de prélèvement et la station considérée. Les teneurs en orthophosphates évoluent entre 0.2 et 0.65 μM en surface et 0.1 et 0.5 μM au fond. En été, dans le milieu marin, cet élément est, tout comme l'ammonium, dépendant de l'activité de reminéralisation. L'évolution en cloche, bien que moins marquée que celle de l'ammonium, semble confirmer cette hypothèse. La courbe des **quotas phosphorés** suit la tendance saisonnière des concentrations en phosphore mesurées dans l'eau avec une diminution au cours de la saison (Figure 37).

Il n'était pas initialement prévu de doser les nitrites du fait du manque de stabilité de cette forme azoté dans le milieu marin qui conduit à avoir des teneurs généralement très faibles ce qui est confirmé par les dosages effectués avec des concentrations maximales inférieures à 0.35 μM .

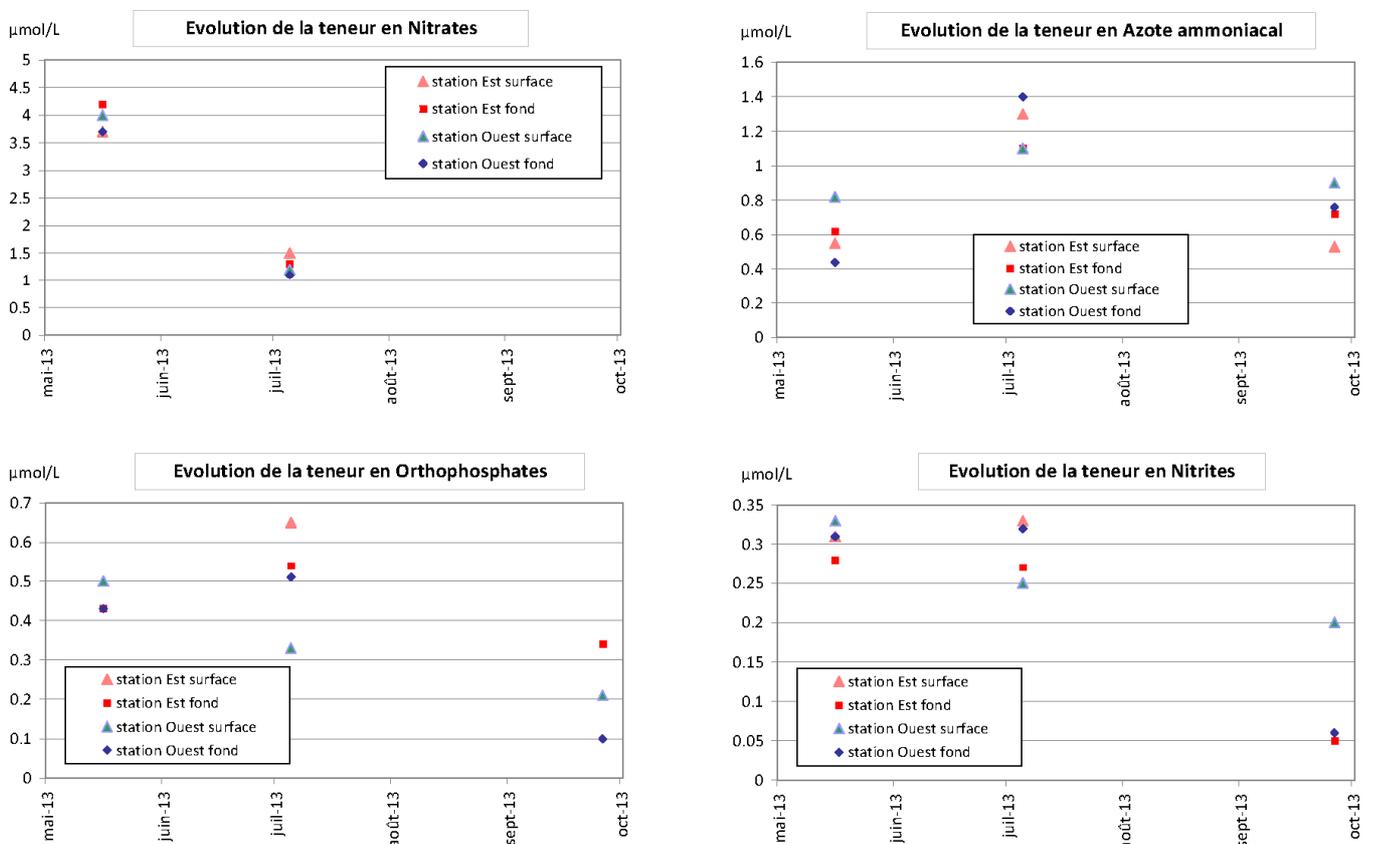


Figure 36 : Mesures des teneurs en nutriments dans l'eau au fond et en surface aux stations est et ouest. L'absence de données correspond à des concentrations en nutriments en dessous de la limite de détection.

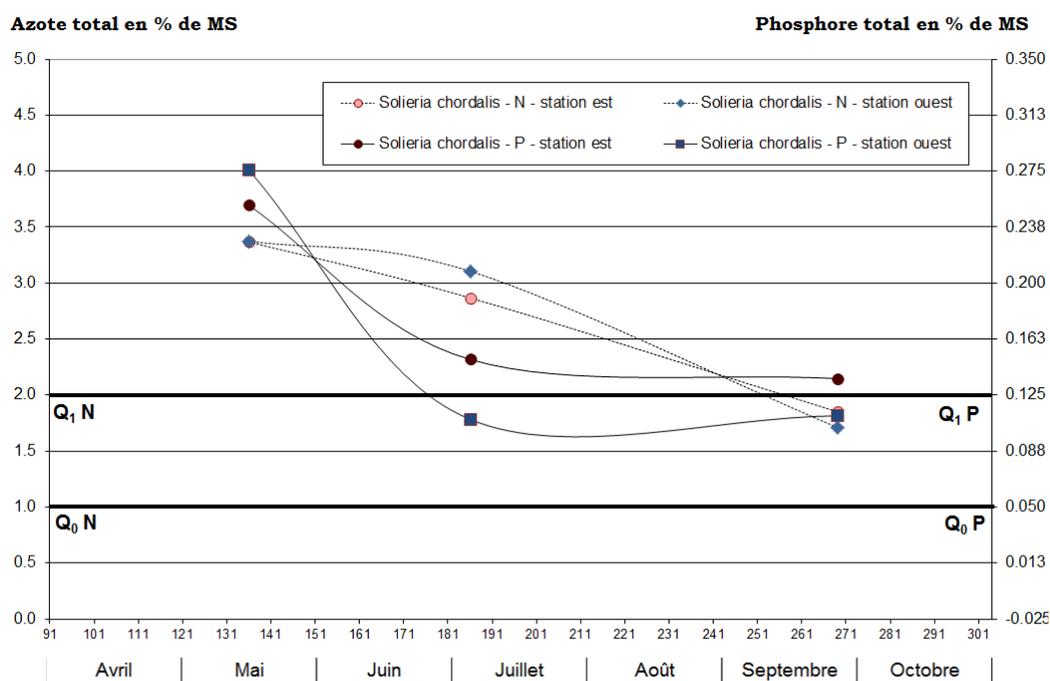


Figure 37 : Evolution des quotas azotés et phosphorés de *Solieria chordalis* au cours de la saison estivale aux stations est et ouest. Les quotas critiques (Q_1) et de subsistance (Q_0) des ulves pour l'azote (N) et le phosphore (P) sont rappelés à titre indicatif.

3.3.2.2 Evolution de la biomasse de *Solieria chordalis*

L'évolution des biomasses au niveau d'une même station est variable selon les secteurs mais une progression au cours du temps semble être la tendance mesurée. Les biomasses fixées peuvent atteindre 2.5 kg.m^{-2} alors que les biomasses libres peuvent atteindre plus du double. Les biomasses libres ont été les plus fréquentes lors de la mission de septembre. L'augmentation de biomasse perceptible sur les photographies aériennes semble liée davantage au changement morphologique des algues dont les ramules (ramifications présentes sur les axes principaux de l'algue) s'agrandissent au fur et à mesure de la saison (Figure 39). Toutefois, ces ramules ayant la capacité de se décrocher pour se fixer à nouveau sur le substrat et former un nouvel individu, une partie de l'augmentation de la biomasse pourrait également provenir en partie de la colonisation du substrat au fur et à mesure de la saison estivale.

Evolution saisonnière des biomasses infralittorales de *Solieria*
 Missions de mai, juillet, et septembre 2013 - Pointe de Saint-Jacques (56)

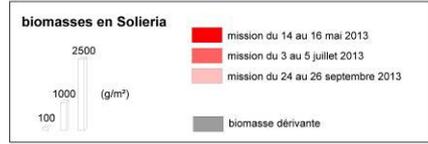


Figure 38 : Evolution temporelle des biomasses de *Solieria chordalis* présentes en différents points subtidiaux. Lorsque la biomasse mesurée est non fixée au substrat dur, celle-ci est signalée par un bâton gris.

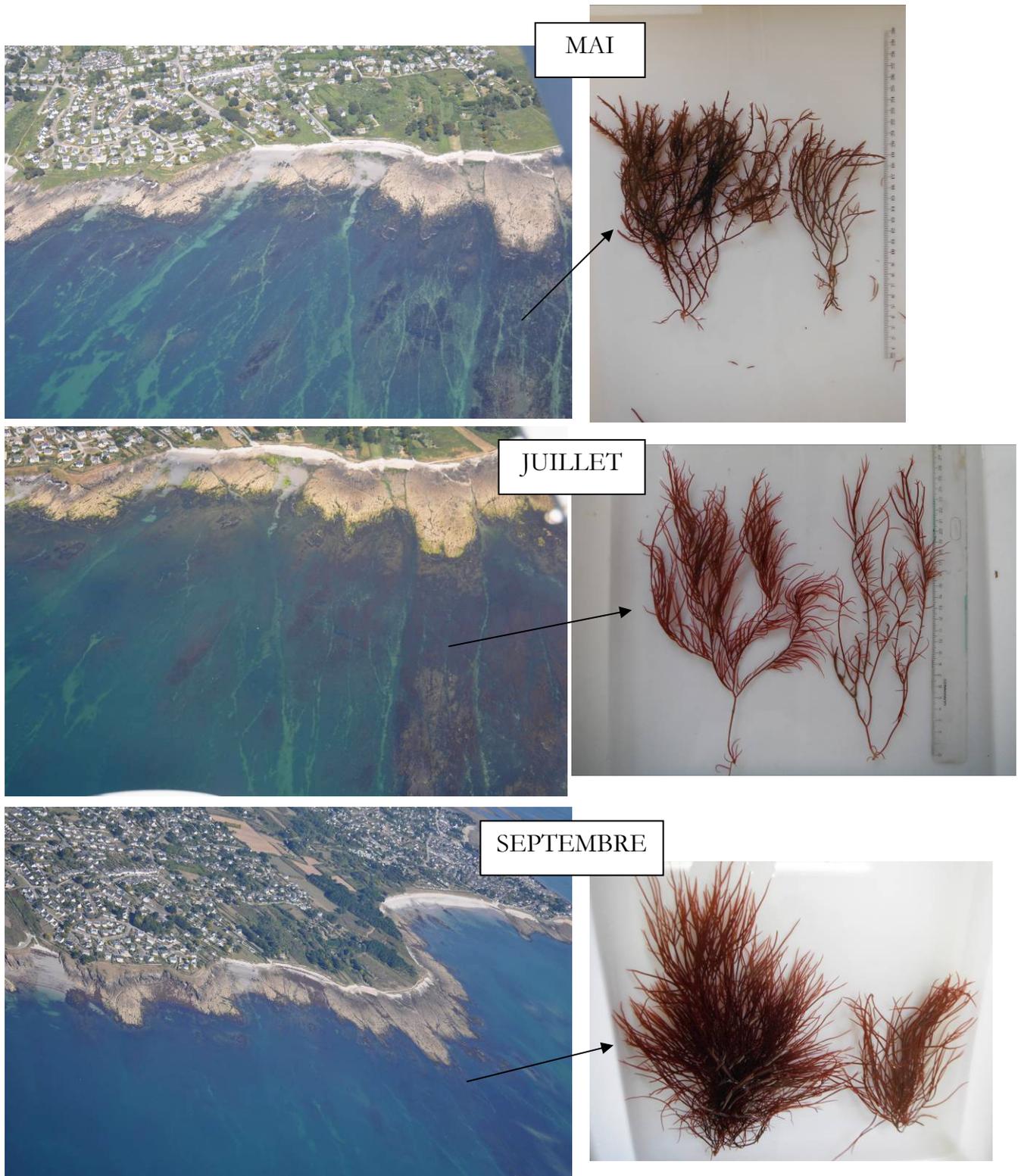


Figure 39 : Illustration de la biomasse de *Solieria chordalis* observée par photographies aériennes en mai, juillet et septembre (à gauche) avec les morphologies algales associée (échantillons issues des missions de plongée effectuées en mai, juillet et septembre). Des échouages de *Solieria* sont visibles sur les plages uniquement sur la photographie aérienne de septembre.

L'extrapolation des biomasses mesurées ponctuellement permet d'estimer le **stock d'algues** présent sur le site (Figure 40). De façon à ne pas biaiser le résultat avec les biomasses d'algues libres, seules les biomasses d'algues fixées ont été utilisées pour effectuer l'extrapolation. Les résultats montrent une évolution progressive de la biomasse sur site celle-ci variant de **2782 tonnes à 5800 t** en fin de saison. Le fait que les biomasses évoluent peu entre juillet et septembre semble indiquer que d'importantes biomasses sont arrachées dont une partie vient directement s'échouer sur les plages.

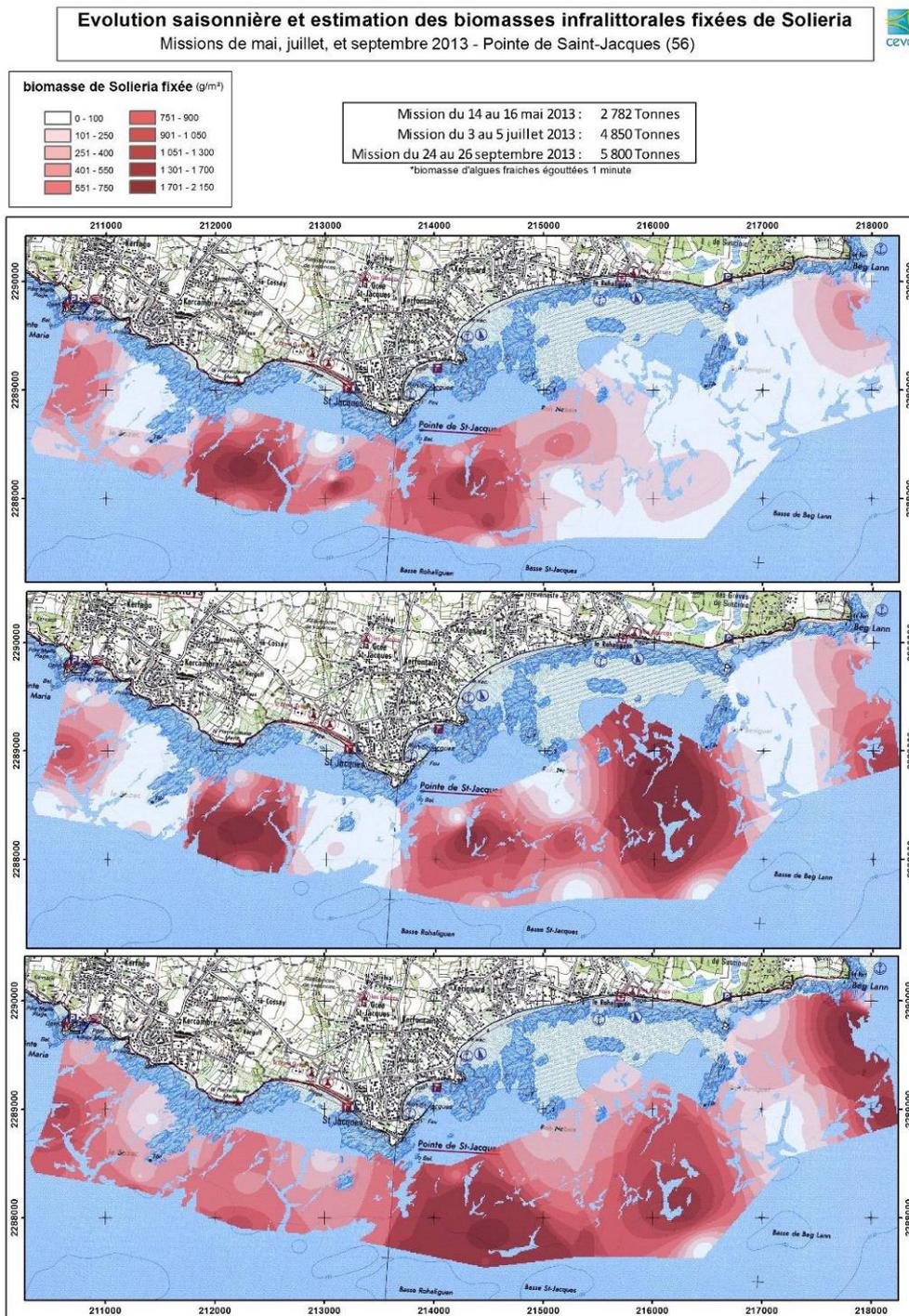


Figure 40 : Evolution des biomasses fixées de *Solieria chordalis* présentes dans la zone prospectées au cours de la saison estivale.

3.4 Conclusions sur l'amélioration des connaissances biologiques

L'étude du cycle biologique des algues dans leur milieu naturel à différentes périodes de l'année permet de mieux appréhender leurs caractéristiques de développement. Ainsi, le suivi mensuel de la baie de Saint-Brieuc en ayant une information concomitante entre paramètres physico-chimiques dans l'eau, contenus nutritifs des algues et développement des populations algales a permis de valider les différentes hypothèses émises quant aux conditions de développement de *Pylaiella* à savoir :

- des températures de l'eau plus froides que celles nécessaires au développement des ulves
- des conditions nutritionnelles inférieures à celles requises par les ulves
- une croissance plus faible de *Pylaiella* qui conduit à avantager l'ulve dans des conditions de température favorables aux deux espèces et lorsque le milieu est suffisamment riche en nutriments.

Concernant la population de *Solieria chordalis* se développant notamment au large de la Presqu'île de Rhuys et provoquant des échouages massifs, il apparaît que l'évolution morphologique des algues pourrait être en partie la cause de l'augmentation de la biomasse en cours de saison. Les quotas pour la première fois suivis pour cette algue montrent une évolution similaire à celle des teneurs en azote et en phosphore dans le milieu. La mesure de quotas, largement utilisée chez les ulves comme indicateur de l'ambiance nutritionnelle dans lequel vivent les algues, semble donc pouvoir être interprété de la même façon pour d'autres algues dont *Solieria chordalis*.

Suite à cette étude, plusieurs perspectives émergent de façon à accroître les connaissances sur ces « nouvelles » proliférations d'algues :

- concernant *Pylaiella*, il s'agit désormais de préciser les paramètres écophysologiques qui permettront de modéliser au mieux l'évolution parallèle des ulves et de *Pylaiella* selon les conditions environnementales du milieu dans lequel elles se développent de façon concomitante.
- concernant *Solieria chordalis*, des expérimentations en laboratoire sont désormais nécessaires pour préciser sa croissance et sa capacité à se multiplier selon différents gradients de concentrations, notamment en termes de nitrates. Il s'agira notamment de conduire ces expérimentations sur des individus fixés à un substrat dur et libre de façon à savoir (1) si cette algue se multiplie par fragmentation dans des conditions nutritionnelles particulières, (2) si sa morphologie diffère selon le gradient nutritionnel dans lequel elle vit, (3) si une fois arrachée, elle est capable de croître et ce, dans différentes conditions nutritionnelles.

4 Compilation des données acquises dans le cadre du programme CIMAV – projet 3 depuis 2008

Le projet 3 du programme CIMAV a pour principal objectif :

- l'acquisition de données permettant de mieux comprendre les facteurs conditionnant le développement des proliférations macroalgales
- la détermination de différents paramètres écophysologiques de façon à apporter des améliorations au module Ulve du modèle numérique et de prévoir au mieux les objectifs de qualité d'eau à atteindre pour parvenir à la réduction significative des marées vertes.

Les différentes actions menées depuis 2008 et leurs apports sont synthétisés dans le Tableau 13. De manière générale, les suivis effectués *in situ* permettent de mieux caractériser l'origine, le déroulement et les conditions naturelles engendrant la prolifération algale. Ainsi, le suivi des quotas en azote et en phosphore des algues, des paramètres physico-chimiques du milieu et de l'évolution morphologique des algues permettent de cerner les facteurs les plus impliqués dans les phénomènes de proliférations. Ces facteurs sont par la suite étudiés de façon plus précise en conditions contrôlées de façon à les quantifier pour pouvoir les intégrer par la suite dans le modèle numérique Mars3D-Ulves. Les facteurs conditionnant la croissance des algues et leur capacité d'absorption vis-à-vis des nutriments sont particulièrement importants et ont fait l'objet de plusieurs évaluations notamment en ce qui concernent les quotas critiques et de subsistance pour l'azote et le phosphore ainsi que les vitesses maximales d'absorption (V_{max}) et les constantes de demi-saturation (K_m : concentration à laquelle la moitié de la vitesse maximale d'absorption est atteinte) pour l'azote et le phosphore. Pour rappel, le quota critique d'un nutriment correspond au contenu interne de ce nutriment dans l'algue à partir duquel la croissance de l'algue est diminuée. En dessous du quota de subsistance, la croissance de l'algue est nulle. Les valeurs des paramètres d'absorption sont rappelées dans le Tableau 12 et les quotas critiques et de subsistance sont répertoriés dans le Tableau 15. Concernant les paramètres d'absorption, il apparaît que les valeurs dépendent à la fois du site de prélèvement, de l'espèce algale et de la saison. Le paramétrage de ces valeurs dans le modèle est donc nécessaire d'un site à l'autre et une évolution au cours de la saison doit être programmée. Concernant les quotas, les différentes expérimentations ont permises d'obtenir pour l'ulve les quotas critiques et de subsistance pour l'azote et le phosphore. Une première indication du quota critique en azote pour *Pylaiella* a été établie mais le quota de subsistance reste à établir. Pour cette algue, les quotas critique et de subsistance sont également à établir pour le phosphore.

Tableau 13 : Compilation des principaux apports des différentes études menées dans le cadre du Cimav P3

Année	Etudes menées	Principaux apports des expérimentations menées
2008	Analyse des conditions d'apparition ou de changements d'espèces dans certains sites	En baie de la Fresnaye, <i>Ulvaria obscura</i> et <i>Pylaiella littoralis</i> sont favorisées dans les eaux froides par rapport à <i>Ulva armoricana</i> . Implication possible du contrôle du développement d' <i>Ulva armoricana</i> par le broutage par des isopodes de l'espèce <i>Idotea baltica</i>
	Analyse des conditions de reconduction interannuelle des stocks résiduels	Les baies de la Fresnaye, Saint-Brieuc et Douarnenez conservent des stocks d'algues en hiver ce qui conduit à une reconduction interannuelle de la marée verte
	Point sur les quotas en phosphore des ulves	En comparant les mesures effectuées en 2008 par rapport à celles de 1999, les quotas phosphorés montrent une diminution plus ou moins marquée selon les sites avec une position limitante pour les sites de Binic, Kerleven (Concarneau) et le Moulin Blanc.
2009	Détermination des paramètres d'absorption de l'azote par les ulves	Détermination de la vitesse maximale d'absorption (V_{max}) et de la constante de demi-saturation (K_m) pour l'absorption de l'azote par <i>Ulva rotundata</i> (baie de Douarnenez), <i>Ulva armoricana</i> (baie de Saint-Brieuc) et <i>Ulvaria obscura</i> (baie de La Fresnaye)
	Détermination des paramètres de température et de lumière nécessaires à la croissance des ulves	La croissance des ulves est la meilleure pour des températures comprises entre 14 et 25 °C et pour un éclaircissement dépassant les 40 $\mu E \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$
	Mesures directes des processus de mortalité des ulves	La dégradation d'ulve (1g d'ulve/l) produit majoritairement du carbone organique dissous (entre 30 et 40 mg/l)
	Mesure de l'auto-ombrage	La croissance des ulves diminue régulièrement avec l'augmentation de la densité algale et ce dès une densité de 50 g de matière sèche d'ulves/m ³
	Analyses complémentaires de phosphore dans les ulves de quelques sites	L'application de seuils ajustés de quotas critique et de subsistance pour les quotas phosphorés ($Q_1P = 0.10\%$ de la MS et $Q_0P = 0.05\%$ de la MS) confirme la limitation de la croissance des ulves par ce paramètre en baie de Concarneau
2010	Consolidation des valeurs Q_1P et Q_0P pour les ulves	$Q_1P = 0.12\%$ de la MS et $Q_0P = 0.05\%$ de la MS
	Détermination des paramètres d'absorption de l'azote par les ulves à deux périodes de l'année pour les ulves prélevées sur plage et à une période de l'année pour les ulves prélevées en vasières	Pour les ulves prélevées sur plage, le K_m augmente au cours de la saison tandis que le V_{max} diminue. Le K_m et V_{max} des ulves prélevées sur vasière sont plus importantes que celles prélevées sur plage.
	Mesure de l'impact de l'auto-ombrage sur la croissance des ulves	Précision de l'effet de l'auto-ombrage sur des gammes de densité algales plus importantes que celles testées en 2009 et dans des conditions nutritionnelles différentes (milieux enrichi et non enrichi)
	Mesures de production de matière organique dissoute et particulaire au cours de la croissance des ulves	Forte production de matière organique dissoute qui semble indépendante de la densité algale mais qui est beaucoup plus importante dans les cultures enrichies en azote
	Premières acquisitions de données écophysologiques pour l'algue brune <i>Pylaiella littoralis</i>	Croissance optimale à une température de l'eau comprise entre 10 et 20 °C avec un taux de croissance journalier maximal de 18 %
2011	Variations de la cinétique d'absorption des nitrates en fonction de l'espèce d'ulve considérée et de la saison	Evolution saisonnière de V_{max} et K_m pour <i>Ulva armoricana</i> prélevée en baie de Lannion et comparaison sur une date avec les valeurs de V_{max} et K_m déterminées pour <i>Ulva rotundata</i> prélevée en baie de Douarnenez. Une évolution saisonnière des paramètres de la cinétique d'absorption des nitrates par les ulves est confirmée. Ces valeurs diffèrent d'une espèce à l'autre
	Variations journalières de la cinétique d'absorption des nitrates	Les variations journalières de la vitesse d'absorption des nitrates chez les ulves sont peu marquées et une absorption a lieu durant la nuit
	Suivi <i>in situ</i> de l'évolution saisonnière des paramètres physico-chimiques (température, salinité, oxygène, pH, nitrates, ammonium, phosphore) en baie de Lannion au large et en très proche côtier	Les eaux du très proche côtier sont soumises à de très fortes variations des paramètres physico-chimiques. L'influence des apports terrigènes se traduit par des concentrations élevées en nitrates. Le phosphore est difficilement détectable. Au large, les évolutions suivent le signal saisonnier avec des concentrations en nitrates et en phosphore inférieure à la limite de détection durant la période estivale. L'ammonium est en revanche toujours présent signe d'une activité de reminéralisation dans la colonne d'eau.

2012	Détermination des valeurs de Q_1N et Q_0N pour <i>Pylaiella littoralis</i>	Les quotas critique et de subsistance n'ont pas pu être établis du fait d'un faible épuisement des quotas traduisant une croissance limitée de <i>P. littoralis</i> et un besoin d'améliorer les conditions de culture
	Mesure des paramètres V_{max} et K_m pour l'absorption de l'azote pour <i>Pylaiella littoralis</i>	Evolution saisonnière de V_{max} et K_m pour <i>P. littoralis</i> avec des valeurs généralement plus faibles que celles répertoriées dans la littérature
	Détermination du facteur d'auto-ombrage	A une profondeur de 35 cm et pour une densité de 4.58 kg de <i>Pylaiella</i> frais/m ³ la perte de lumière est presque totale. Cette perte augmente graduellement entre une densité de 480 g et 4.58 kg de <i>Pylaiella</i> frais/m ³
	Mesure des relations entre croissance de <i>Pylaiella littoralis</i> et lumière	La croissance maximale journalière de <i>Pylaiella littoralis</i> (12-15 %) est atteinte pour des intensités lumineuses comprise entre 90 et 130 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$
	Typologie des sites à marées vertes bretons	A partir d'identification morphologique sous microscope, il a été précisé la répartition géographique des différentes espèces d'ulves ainsi que leur origine (algues arrachées ou se développant sur place et librement dans la masse d'eau)
	Analyse <i>in situ</i> du cycle biologique complet de <i>Pylaiella littoralis</i>	Présence de <i>Pylaiella</i> tout au long de l'année, se développant majoritairement librement dans la masse d'eau. Un stock fixé est néanmoins présent dans la zone subtidale
	Connaissances actuelles sur les proliférations et échouages massifs de l'algue rouge <i>Solieria chordalis</i>	En Bretagne, la zone la plus touchées est la presqu'île de Rhyus. Cette algue a un fort pouvoir colonisateur en particulier dans les zones turbides.

Tableau 14 : Compilation des valeurs de V_{max} et K_m mesurées au CEVA

Date	Type d'algues	Origine	K_m ($\mu\text{mol NO}_3/\text{L}$)	V_{max} ($\mu\text{mol NO}_3/\text{g sec/h}$)	Référence
12/07/1990	<i>Ulva armoricana</i>	St Brieuc	30,0	207,0	données CEVA
31/07/1990	<i>Ulva armoricana</i>	St Brieuc	3,0	48,5	données CEVA
02/08/1990	<i>Ulva armoricana</i>	St Brieuc	40,0	207,0	données CEVA
24/04/1991	ulves		9,6	176,6	données CEVA
07/05/1991	ulves		1,7	63,6	données CEVA
03/06/1991	ulves		17,9	228,0	données CEVA
16/07/1991	ulves		52,1	184,7	données CEVA
26/08/1991	ulves		3,2	79,1	données CEVA
08/07/2009	<i>Ulva armoricana</i>	St Brieuc - Lermot	5,9	108,7	CEVA, 2009
10/07/2009	<i>Ulvaria obscura</i>	La Fresnaye	1,3	76,2	CEVA, 2009
25/08/2009	<i>Ulva rotundata</i>	Douarnenez	2,3	56,8	CEVA, 2009
21/04/2010	<i>Ulva armoricana</i>	St Michel en Grève	6,6	146,0	CEVA, 2010
12/05/2010	<i>Ulva armoricana</i>	Rance (vasière)	46,0	223,0	CEVA, 2010
30/07/2010	<i>Ulva armoricana</i>	St Michel en Grève	22,1	91,7	CEVA, 2010
06/06/2011	<i>Ulva armoricana</i>	Lannion	3,1	50,4	CEVA, 2011
19/07/2011	<i>Ulva armoricana</i>	Lannion	14,6	87,5	CEVA, 2011
02/08/2011	<i>Ulva rotundata</i>	Douarnenez (vasière)	30,9	121,8	CEVA, 2011
31/08/2011	<i>Ulva armoricana</i>	Lannion	3,1	81,6	CEVA, 2011
18/04/2012	<i>Pylaiella littoralis</i>	La Fresnaye	29,2 \pm 9,1*	12,1 \pm 1,6*	CEVA, 2012
03/10/2012	<i>Pylaiella littoralis</i>	La Fresnaye	14,1	6,3	CEVA, 2012

* moyenne \pm intervalle de confiance à 95%

Tableau 15 : Compilation des valeurs de Q₀ et Q₁ mesurées au CEVA

Date	Type d'algues	Origine	Q ₁ N (%/sec)	Q ₀ N (%/sec)	Q ₁ P (%/sec)	Q ₀ P (%/sec)	Référence
Juin & Août 1988	Ulves de marée verte	St Brieuc - Hillion			0.12		Duflo, 1988
Sept. & Oct. 1995	Ulves de marée verte	St Brieuc - Hillion	2	Impossible de conclure	Impossible de conclure	Impossible de conclure	Cassagnes, 1996
	Ulves de marée verte	Baie de Lannion	1.66	0.9	0.10	0.05	Dion et al., 1996
Juil. 2009	<i>Ulvaria obscura</i>	La Fresnaye			0.05	Impossible de conclure	CEVA, 2009
Juil.-Aout 2009	<i>Ulva armoricana</i>	St Brieuc - Lermot			0.10	Impossible de conclure	CEVA, 2009
Aout-Sept. 2009	<i>Ulva rotundata</i>	Dournenez			0.10	Impossible de conclure	CEVA, 2009
Nov. 2010	<i>Ulva armoricana</i>	St Michel en Grève			0.12	0.05	CEVA, 2010
Juin 2012	<i>Pylaiella littoralis</i>	La Fresnaye	Impossible de conclure				CEVA, 2012
Oct. 2012	<i>Pylaiella littoralis</i>	La Fresnaye	Impossible de conclure				CEVA, 2012
Aout-Sept. 2013	<i>Pylaiella littoralis</i>	Morieux	1.8	Impossible de conclure			Cette étude

N.B. : Un changement de la technique de dosage du phosphore contenu dans les ulves est intervenu en 2008 ce qui a conduit le CEVA à consolider les premiers résultats de quotas critique et de subsistance obtenus pour le phosphore au cours des années suivantes.

5 Bibliographie

- Campbell S. Ammonium requirements of fast-growing ephemeral macroalgae in a nutrient-enriched marine embayment (Port Phillip Bay, Australia). *Marine Ecology Progress Series*, **2001**, 209: 99-107.
- Cassagnes M.-P. Etude du contrôle de la croissance par les quotas internes chez l'ulve des marées vertes, cultivée en bassin extérieurs en flux continu. *Stage d'ingénieur, Ecole Supérieure d'Agriculture de Purpan, Toulouse, France*, **1996**, 109 p.
- CEVA. Compléments d'études sur les processus biologiques, hydrologiques et sédimentologiques impliqués dans la marée verte. *CIMAV P3*, **2012**, 66 p.
- CEVA. Compléments d'études sur les processus biologiques, hydrologiques et sédimentologiques impliqués dans la marée verte. *CIMAV P3*, **2011**, 36 p.
- CEVA. Compléments d'études sur les processus biologiques, hydrologiques et sédimentologiques impliqués dans la marée verte. *CIMAV P3*, **2010**, 15 p.
- CEVA. Compléments d'études sur les processus biologiques, hydrologiques et sédimentologiques impliqués dans la marée verte. *CIMAV P3*, **2009**, 32 p.
- Dion P. ; Le Bozec S. ; Golven P. Factors controlling the green tides in the bay of Lannion (France). Proceedings of the second EUMAC Workshop held in Sète, 29 February-3 March 1996. Rijstenbil J.W., Kamermans P., Nienhuis P.H. (eds), **1996**, 121-137.
- Dion P. ; Le Bozec S. Contenu tissulaire des ulves en azote et phosphore comme facteurs limitants de leur croissance en baie de Douarnenez. In : Pollutions diffuses : du bassin versant au littoral , M. Merceron (coord.). Actes de colloques IFREMER, **1999**, 24 : 77-85.
- Duflo C. Aspects écophysiologicals de la production des « marées vertes ». Photosynthèse et nutrition phosphorée. *Stage de DAA, option halieutique, Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Rennes/CEVA, Rennes, France*, **1988**, 32 p.
- Dufresnes, G. Détermination de l'optimum de température pour la croissance de la *Pylaeilla littoralis*. *Stage de Master 1, IUEM/CEVA*, **2011**, 23 p.
- Geertz-Hansen O. ; Sand-Jensen K. Growth rates and photon yield of growth in natural populations of a marine macroalga *Ulva lactuca*. *Marine Ecology Progress Series*, **1992**, 81: 179-183.
- Gómez Pinchetti, J. L. ; Campo Fernández, E. (del) ; Moreno Díez, P. ; García Reina, G. Nitrogen availability influences the biochemical composition and photosynthesis of tank-cultivated *Ulva rigida* (Chlorophyta). *Journal of Applied Phycology*, **1998**, 10: 383-389.
- Kapraun D.F. Field and cultural studies of the genera *Ulva* and *Enteromorpha*. Doctor of Philosophy, University of Texas, Austin, **1969**, 191 p.

Mathot J.F. Production d'algues vertes en eaux côtières estuariennes et détermination des possibilités d'aquaculture en eaux fertilisées. Mémoire Sciences agronomiques, Université libre de Bruxelles, Bruxelles, **1982**, 112 p.

Ménesguen A. Les “marées vertes” en Bretagne, la responsabilité du nitrate. **2003**. <http://archimer.ifremer.fr/doc/00000/143/>.

Merceron M. ; Antoine V. ; Auby I. ; Morand P. In situ growth potential of the subtidal part of green tide forming *Ulva* spp. Stocks. *Science of the Total Environment*, **2007**, 384(1-3): 293-305.

Müller D. G. ; Küpper F.C. ; Küpper H. Infection experiments reveal broad host ranges of *Eurychasma dicksonii* (Oomycota) and *Chytridium polysiphoniae* (Chytridiomycota), two eukaryotic parasites in marine brown algae (Phaeophyceae). *Phycological Research*, **1999**, 47(3): 217-223.

Paalme T. Nuisance brown macroalga *Pilayella littoralis*: Primary production, decomposition and formation of drifting algal mats. *Oü Vali Press, Tallin University*, **2005**, 25 pp.

Pádua (de) M. ; Growoski Fontoura P.S. ; Mathias A.L. Chemical composition of *Ulvaria oxysperma* (Kützing) Bliding, *Ulva lactuca* (Linnaeus) and *Ulva fasciata* (Delile). *Brazilian archives of biology and technology*, **2004**, 47: 49-55.

Pomeroy W.M. ; Stockner J.G. Effects of disturbance on the distribution and primary production of benthic algae on a British Columbia estuary. *J. Fish. Res. Board Can.*, **1976**, 33: 1175-1187.

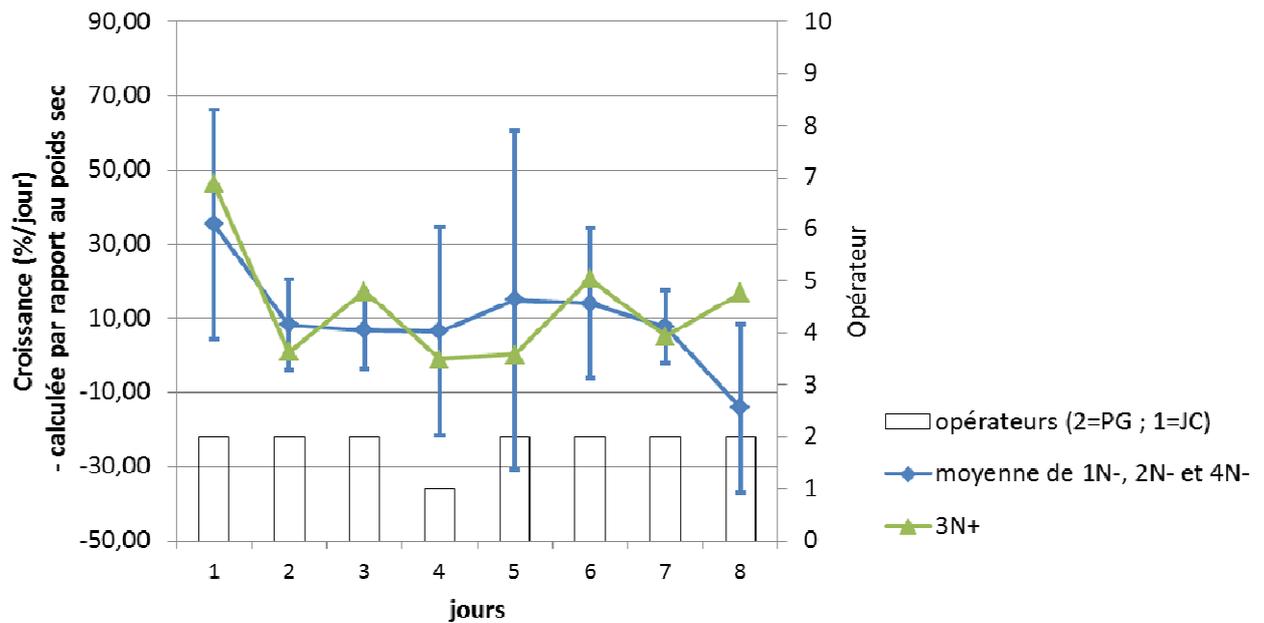
Rosenberg G. ; Probyn T.A. ; Mann K.H. Nutrient uptake and growth kinetics in brown seaweeds: Response to continuous and single additions of ammonium. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, **1984**, 80(2): 125-146.

Salovius S. ; Bonsdorff E. Effects of depth, sediment and grazers on the degradation of drifting filamentous algae (*Cladophora glomerata* and *Pilayella littoralis*). *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, **2004**, 298: 93-109.

6 ANNEXES

Annexe 1 : Résultats 2012 pour l'expérience des quotas azotés

Le graphique ci-dessous présente l'évolution de la croissance sur 8 jours de *Pylaiella littoralis* cultivée en eau de mer artificielle avec (3N+) ou sans azote (1N-, 2N- et 4N-). On constate que les algues dont le milieu est enrichi en azote ne présentent pas une croissance supérieure aux algues qui ne sont pas supplémentées en azote.



Pour plus de détails, se reporter au rapport CIMAV P3 de 2012

Annexe 2 : Eau de mer artificielle

Préparer les solutions de sels 1 et 2 séparément puis rassembler.

SELS 1	Qsp 1000L eau osmosée	
NaCl	23,38	kg
KCl	0,75	kg
CaCl ₂	1,12	kg
NaHCO ₃	0,168	kg

SELS 2	Qsp 1000L eau osmosée	
MgSO ₄ . 7H ₂ O	4,93	kg
MgCl ₂ . 6H ₂ O	4,93	kg

Annexe 3 : Composition de la solution nutritive f/2

SOLUTION I	Qsp 1L eau UP	
NaNO ₃	75	g

SOLUTION II	Qsp 1L eau UP	
NaH ₂ PO ₄ , H ₂ O	5	g

SOLUTION METALLIQUE	Qsp 1L eau UP	
FeCl ₃ , 6H ₂ O	3,15	g
Na ₂ EDTA ou <u>Na₂EDTA, 2H₂O</u>	4,36	g
CuSO ₄ , 5H ₂ O	1	mL
Na ₂ Mo ₄ , 2H ₂ O	1	mL
ZnSO ₄ , 7H ₂ O	1	mL
CoCl ₂ , 6H ₂ O	1	mL
MnCl ₂ , 4H ₂ O	1	mL

SOLUTION VITAMINIQUE	Qsp 1L eau UP	
Vitamine B1 (ou thiamine)	0,2	g
Vitamine B12 d'une solution à 1g/L	1	mL
Vitamine H (ou biotine) d'une solution à 0,1g/L	10	mL

UTILISATION	Qsp 1L EDM	
solution I	1	ml
solution II	1	ml
solution métallique	1	ml
solution vitaminique	0,5	ml

Annexe 4 : Valeurs des quotas N et P mesurés pendant l'expérience des quotas

➤ Calcul des incertitudes

Les incertitudes de mesure de quota N et quota P sont calculées sur 6 réplicats. L'incertitude est calculée selon la formule suivante :

$$inc.rel. (\%) = \frac{\text{ecart - type des 6 valeurs}}{\text{moyenne des 6 valeurs}} \times 2 \times 100$$

Echantillon	N (%sec/brut)	P (% sec/brut)
1	2.11	0.28
2	2.29	0.30
3	2.07	0.29
4	2.25	0.31
5	2.01	0.33
6	2.22	0.28

moyenne	2.16	0.30
ecart-type	0.11	0.02
incertitude	10.29%	12.09%

➤ Quota N

La valeur du quota est donnée en % sec/brut, le brut correspondant ici à l'échantillon lyophilisé. L'incertitude est donnée dans la colonne « inc. ». Le point marqué d'un astérisque (*) est considéré comme aberrant et n'est pas représenté dans la Figure 3. On rappelle que l'aquarium 2 a reçu une dose de nitrates au démarrage de l'expérience à j=0.

Jour	inoculum de départ		1N-		2N-		3N+		4N-	
	N	inc.	N	inc.	N	inc.	N	inc.	N	inc.
0	2.16	10%								
1			1.99	10%	3.02	10%	3.05	10%	2.11	10%
2			2.00	10%	3.20	10%	4.30	10%	2.10	10%
3			1.70	10%	2.70	10%	4.10	10%	1.90	10%
4			1.70	10%	2.70	10%	2.60*	10%	2.00	10%
5			1.70	10%	2.40	10%	4.60	10%	1.80	10%
6			1.50	10%	2.20	10%	4.10	10%	1.80	10%
7			1.50	10%	2.10	10%	4.30	10%	1.70	10%
8			1.50	10%	2.00	10%	4.70	10%	1.40	10%
9			1.20	10%	1.70	10%	3.90	10%	1.40	10%
10			1.12	10%	1.46	10%	3.75	10%	1.31	10%
13			1.07	10%	1.39	10%	3.81	10%	1.27	10%

➤ Quota P

La valeur du quota est donnée en % sec/brut, le brut correspondant ici à l'échantillon lyophilisé. L'incertitude est donnée dans la colonne « inc. ».

Jour	inoculum de départ		1N-		2N-		3N+		4N-	
	P	inc.	P	inc.	P	inc.	P	inc.	P	inc.
0	0.30	12%								
1			0.33	12%	0.32	12%	0.33	12%	0.33	12%
10			0.28	12%	0.36	12%	0.43	12%	0.32	12%
13			0.30	12%	0.43	12%	0.48	12%	0.36	12%