

UFR Sciences et Techniques Côte Basque
Université de Pau et des Pays de l'Adour
Licence Biologie des Organismes

Les communautés des cuvettes intertidales : rôle de la variabilité naturelle dans un contexte de changement global

Pouliquen Loïc

**Stage effectué du 7 mars au 29 avril 2016 à la Station Biologique de Roscoff
(CNRS) sous la direction scientifique de Mr Erwann Legrand et Mme
Sophie Martin**



CNRS UPMC

**Station Biologique
Roscoff**

« Le présent rapport constitue un exercice pédagogique qui ne peut en aucun cas engager la responsabilité de L'Entreprise ou du Laboratoire d'accueil »

Remerciements

Je remercie Mr Dominique Davoult (responsable de l'équipe EFEB) de m'avoir accueilli au sein de cette équipe pour mon stage.

Un grand merci à Sophie Martin (Chargée de recherche CNRS) de m'avoir proposé ce stage et pour toute l'aide que tu m'as apporté.

Alors évidemment...Un grand merci à mon maître de stage Erwann Legrand (étudiant en thèse) sans qui je n'aurais pas connu les alcalinités. Non vraiment je te remercie, ça m'as permis de faire le point sur ma vie. Merci aussi pour les parties de ping-pong que je te laissé gagner (il faut penser à la note de fin de stage !) et pour m'avoir fait découvrir le café Ty Pierre et ses apéros ! Merci pour ton aide durant ce stage et je te souhaite bon courage pour la fin de ta thèse.

Merci à Pascal Riera (Maître de conférence UPMC) de m'avoir accueilli dans son bureau.

Je remercie aussi toute l'équipe EFEB pour leur convivialité et leur gentillesse ! Que de bons souvenirs lors des pauses café. Un grand merci à François et ses blagues du vendredi midi au Gulf Stream ! D'ailleurs merci à l'équipe du Gulf Stream pour les bons repas (bien manger c'est important !). Merci à Olivier Bohner (Technicien) pour m'avoir mis en contact avec les autres personnes de la station. Merci encore à Aline Migne (Maître de conférence UPMC), Doriane Stagnol (Ingénieur d'études) et Zujaila Qui Minet (Doctorante).

Merci aux stagiaires aussi, Marie pour sa bonne humeur (courage pour les sorties en mer), Paul pour ses conseils pour le permis moto et Morgane pour les potins (profite bien du nouveau bureau) ! Merci Louis pour ton enthousiasme et je souhaite bon courage à Bastien dans sa quête d'annihilation des coquilles.



Figure 1 : Photo des membres de l'équipe EFEB de gauche à droite en partant du haut ; Legrand Erwann, Riera Pascal, Davoult Dominique, Stagnol Doriane, Qui Minet Zujaila, Coudret Jerome, Pouliquen Loïc, Bordeyne François, Migne Aline, Morgane, Marie, Paul, Louis, Miguel, Bohner Olivier et Martin Sophie

I. Sommaire

II. Introduction	1
III. Matériel et méthodes	4
A. Suivi <i>in-situ</i> au sein des cuvettes intertidales	4
1. Les cuvettes intertidales	4
B. Suivi des paramètres physico-chimiques au sein des cuvettes intertidales	8
1. Présentation du suivi	8
2. Déroulement du suivi	9
3. Les paramètres mesurés.....	9
C. Assemblages expérimentaux des communautés de cuvettes intertidales	10
1. Système expérimental.....	10
2. Assemblages expérimentaux	11
D. Présentation des méthodes utilisées.....	12
1. Relations tailles poids chez les gastéropodes et détermination du poids des algues non calcaires	12
2. Mesures de métabolisme	13
3. Mesure de la concentration en ammonium.....	14
4. Mesure d'alcalinité totale	15
5. Mesure de dioxygène dissout	15
6. Traitement statistique	16
IV. Résultats et discussion.....	16
A. Analyse du suivi saisonnier et journalier des cuvettes	16
1. Evolution de la température.....	17
2. Evolution de la concentration en oxygène.....	19
3. Evolution du pH	21
4. Evolution de l'alcalinité totale.....	23
B. Analyse du métabolisme des algues non calcaires sous différentes conditions expérimentales	25
1. <i>Chondrus crispus</i>	25
2. <i>Ulva sp</i>	26
3. <i>Bifurcaria bifurcata</i>	27
V. Conclusion.....	28
VI. Références bibliographiques	1
VII. Webographie	1
VIII. Annexe.....	2
IX. Résumé	6

II. Introduction

J'ai effectué mon stage de 2 mois à la station biologique de Roscoff (SBR) (www.sb-roscoff.fr/). C'est un centre de recherche et d'enseignement en biologie et écologie marines qui dépend du Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS) et de l'Université Pierre et Marie Curie (UMPC) de Paris 6. Plus spécifiquement j'ai réalisé mon stage au sein de l'unité mixte de recherche (UMR 7144) « Adaptation et Diversité en Milieu Marin » de la SBR sous la tutelle d'Erwann Legrand (étudiant en thèse) et de Sophie Martin (chargée de recherche au CNRS). Écologie, évolution et environnement constituent le triptyque sur lequel s'élaborent les recherches de cette unité dont l'objectif central est l'étude des populations, espèces et communautés qui peuplent les mers et océans du globe, afin d'en comprendre le fonctionnement, la diversité et le devenir. Mon sujet s'inscrit dans le cadre de la thèse d'Erwann Legrand qui a pour objet d'étudier « l'impact de l'acidification et du réchauffement des océans sur la diversité et le rôle fonctionnel des communautés de macroalgues ».

L'accroissement de la concentration des gaz à effet de serre, en particulier du dioxyde de carbone (CO_2), dans l'atmosphère terrestre dû aux activités humaines telles que la combustion des énergies fossiles et la déforestation ont un impact important sur les océans. Certains effets se font déjà ressentir comme l'augmentation de la température moyenne des océans et le phénomène d'acidification des océans. Selon le groupe intergouvernemental d'experts sur l'évolution du climat (GIEC), après une hausse de $0,85^\circ\text{C}$ en moyenne entre 1880 et 2012, l'augmentation des températures moyennes à la surface de la planète pourrait atteindre $4,8^\circ\text{C}$ à l'horizon 2100 par rapport à la période 1986-2005, dans le scénario le plus pessimiste, c'est-à-dire si les émissions de gaz à effet de serre continuent à leur rythme actuel (entre $0,3^\circ\text{C}$ et $3,1^\circ\text{C}$ pour les autres scénarios). Jusqu'à présent les océans ont absorbé plus de 80% de la chaleur supplémentaire de l'atmosphère provoqué par le réchauffement climatique (Perkins, 2013). L'augmentation de la concentration en CO_2 atmosphérique s'accompagne également d'une augmentation de la concentration en CO_2 dissout dans l'océan de surface dû à l'absorption de ce dioxyde de carbone atmosphérique par les océans qui provoque une diminution du pH moyen de l'eau de mer: c'est le phénomène d'acidification des océans (AO). Lorsque le CO_2 se dissout dans l'eau de mer, cela entraîne une augmentation de protons (ions H^+) mais aussi la diminution de certains ions comme les ions carbonates (CO_3^{2-}) nécessaires à de nombreux organismes marins pour fabriquer leur squelette ou coquille calcaire tels que les coraux, algues calcaires, crustacés... (Gattuso et al. 2014). Ces organismes auront donc de plus en plus de mal à fabriquer ces structures calcaires. Leurs squelettes et coquilles sont dans certaines conditions menacés de dissolution car au-dessus d'un certain seuil d'acidité, l'eau de mer devient « corrosive » vis-à-vis du calcaire, avec des conséquences importantes sur les organismes marins calcifiants. Avec la diminution du pH, la proportion d'ions carbonates (CO_3^{2-}) est de plus en plus réduite, limitant ainsi la calcification pour les espèces concernées, au profit des ions HCO_3^- (Figure 2).

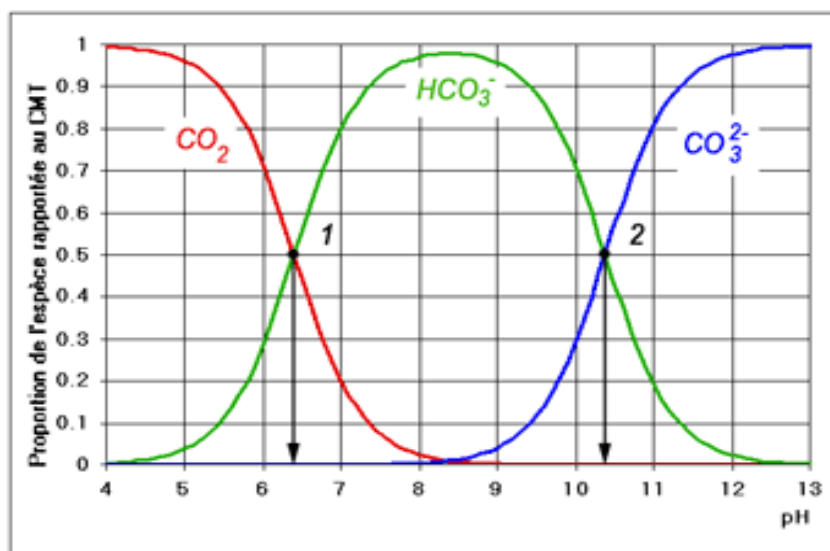


Figure 2: Graphique présentant les proportions de CO_2 dissous, d'ions carbonates (CO_3^{2-}) et d'ions bicarbonates (HCO_3^-) selon le pH de l'eau de mer (<http://bernard.pironin.pagesperso-orange.fr/aquatech/alcalinite.htm>).

Afin de comprendre et de quantifier les impacts de l'acidification et du réchauffement des océans, il est important d'évaluer les effets sur les écosystèmes côtiers dans lesquels les espèces à squelette ou coquille calcaire (coraux, algues calcaires, mollusques, échinodermes, crustacés...) jouent un rôle écologique et économique majeur. Pourtant ces milieux sont connus pour être des environnements variables pouvant présenter d'importantes fluctuations de température et de pH. C'est notamment le cas des milieux intertidaux et plus particulièrement des cuvettes marines qui correspondent à des zones de rétention d'eau en milieu intertidal rocheux lors de l'émersion. Ce sont des environnements hypervariables et les espèces y vivant sont soumises à de fortes variations des paramètres physico-chimiques. Aussi, il est important de comprendre si les espèces vivant dans ce milieu très variable sont aussi sensibles que celles vivant en milieux subtidaux beaucoup plus stables puisqu'elles sont déjà soumises et adaptées à de fortes fluctuations environnementales. Cependant, très peu d'études ont été réalisées sur le sujet. La plupart des travaux sur les effets de l'acidification et du réchauffement ont été conduits sur des espèces subtidales et/ou dans des conditions de pH et de température stables. Par ailleurs, il existe très peu d'information sur la variabilité physico-chimique de cet environnement intertidal (Daniel & Boyden, 1975 ; Morris & Taylor 1983). Les premières investigations ont montrés que les conditions au sein des cuvettes étaient très variables avec des variations de température allant jusqu'à 5°C et de pH de l'ordre de 2 unités pH. Cet environnement est un formidable cas d'études pour comprendre et évaluer le rôle de la variabilité naturelle du milieu et la sensibilité des espèces vivant dans un environnement fluctuant face à l'acidification et au réchauffement des océans. Les variations diurnes (alternance du jour et de la nuit), saisonnières et même journalières (phase d'immersion et d'émersion) entraînent des variations physico-chimiques complexes. Les macroalgues qui habitent ces milieux avec des fluctuations périodiques de lumière, de température, de nutriments et de pH font preuve d'une plasticité physiologique considérable (Stengel et al., 2014). En reproduisant en mésocosmes les conditions environnementales (température, pH, lumière) subies par les communautés de macroalgues dans les cuvettes, il

est alors possible de comprendre quels seront les effets des changements globaux sur les espèces constituant ces communautés intertidales.

L'objectif de ce stage était donc, d'une part, de déterminer les fluctuations naturelles des paramètres physico-chimiques dans les cuvettes à travers un suivi *in situ* et, d'autre part, de participer à une expérimentation sur les effets des changements globaux sur les communautés de macroalgues des cuvettes. Mon travail a consisté en (i) un suivi *in-situ* de 24h en hiver (mars 2016) dans des cuvettes intertidales, (ii) l'analyse des échantillons d'eau de mer prélevés et (iii) le traitement des résultats obtenus ainsi qu'en (iv) l'analyse des données du suivi *in-situ* réalisé préalablement en été (septembre 2015). Par ailleurs, j'ai réalisé des expérimentations en mésocosmes (mesures de métabolisme) sur les communautés d'algues des cuvettes afin d'évaluer leur réponse physiologique à la diminution du pH et à l'augmentation de la température. Ce travail s'intégrait dans le cadre des expérimentations de la thèse d'Erwann Legrand qui vise à reproduire en mésocosme l'environnement des cuvettes marines en appliquant sur une partie des aquariums les conditions actuelles de pH et de température de l'eau de mer selon la saison (hiver ou été) et une autre partie des aquariums avec les conditions futur de pH et de température.

III. Matériel et méthodes

Cette partie *Matériel et méthodes* présentera en premier lieu notre objet d'étude, les cuvettes intertidales. En second lieu je présenterai le système expérimental puis les différentes méthodes utilisées pendant ce stage pour le suivi *in-situ* et les expérimentations en mésocosme.

A. Suivi *in-situ* au sein des cuvettes intertidales

1. Les cuvettes intertidales

a) Cuvettes intertidales du Blosson

Le suivi *in-situ* a été réalisé sur 3 cuvettes (A, B et C) provenant de l'estran du port du Blosson (Figure 3) à Roscoff en Bretagne ($48^{\circ}43'28.2''N$ $3^{\circ}58'08.5''W$). Ce sont des cuvettes rocheuses remplies d'eau de mer qui se trouvent dans la zone de balancement des marées: la zone intertidale (Figure 4). Par conséquent ce sont des milieux isolés de la mer à marée basse. Ce sont des habitats pour de nombreux organismes marins tels que certains crustacés (crevettes, crabes...) mais aussi des algues (calcaires et non calcaires) ainsi que des mollusques. Dans la plupart des cuvettes on retrouve des *Ulves*, *Chondrus crispus*, *Bifurcaria bifurcata* et *Corallina officinalis* et *Lytrophyllum inscrustans* qui sont les algues non calcaires et calcaires les plus abondantes dans les cuvettes. On y trouve aussi *Patella ulyssiponensis* et *Gibulla penanti* qui sont les espèces de gastéropodes naturellement présentes.

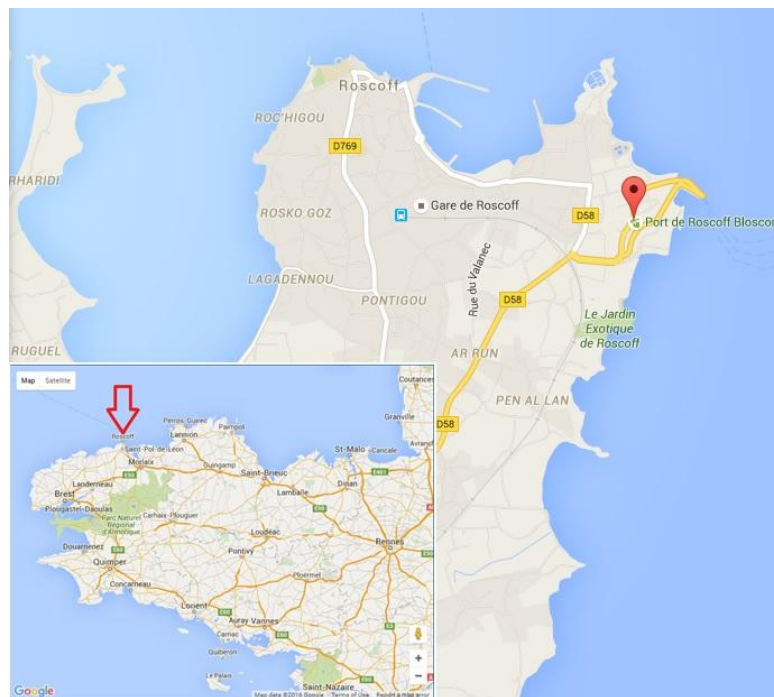


Figure 3: Carte de la région Bretagne avec l'emplacement de Roscoff (flèche rouge) et du port de Blosson (point rouge)



Figure 4: Photo d'une cuvette marine sur l'estran du Bloscon.

b) Organismes majoritaires présents dans les cuvettes intertidales

(1) Les macroalgues

Ulva sp.: Algue verte marine cosmopolite qui se développe généralement au niveau de l'étage supralittoral et notamment dans les cuvettes (Figure 5). Elle est présente toute l'année. Elle est formée d'un thalle mince et aplati, souvent lobé, ne comportant que deux couches de cellules possédant chacune un chloroplaste (organe contenant de la chlorophylle). Cette lame souple peut varier du vert foncé au vert clair et peut atteindre un mètre de longueur dans des eaux riches en matières organiques (la taille est cependant très variable, généralement entre 20 et 60 cm). L'algue adhère au substrat grâce à un petit disque de fixation, surmonté d'un stipe très court.



Figure 5: Photo d'*Ulva sp.*

Chondrus crispus: Algue rouge de couleur brun-rouge (Figure 6). Elle se développe sur substrats rocheux au niveau de l'étage infralittoral. Cette algue rouge, très polymorphe d'aspect, mesure en général entre 7 et 15 cm de long. Sa couleur varie du pourpre au vert en passant par le brun, avec de nombreuses nuances intermédiaires. Cette algue s'attache au substrat par un petit crampon, surmonté d'un stipe fin, qui s'élargit en ramifications très lobées, aplaties, et en partie translucides. Ces lobes, de forme variée, peuvent se subdiviser en lobules, ce qui donne à l'algue un aspect "frisé" (d'où le terme "*crispus*").

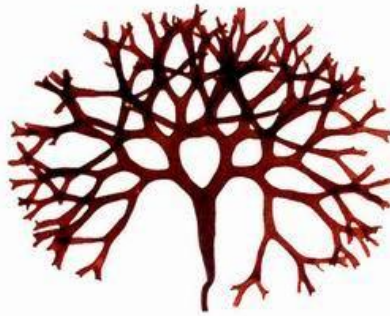


Figure 6: Photo de *Chondrus crispus* (fao.org)

Bifurcaria bifurcata: Algue brune marine qui se développe sur les côtes atlantiques nord américaine et européenne ainsi que dans les cuvettes (Figure 7). Cette algue brune doit son nom à la bifurcation de ses ramifications dichotomes. Elle est en forme de cordon cylindrique de 3 à 4mm de diamètre, au bout arrondi et peut atteindre 50cm de long. De couleur brun clair à jaunâtre, sa surface est lisse. Contrairement à de nombreuses algues, elle n'est pas fixée au substrat par un disque ou des crampons, mais par une sorte de rhizome.



Figure 7: Photo de *Bifurcaria bifurcata*

(2) Les mollusques gastéropodes

Patella ulyssiponensis : Ce gastéropode possède une coquille conique, très robuste, avec des arêtes radiales plus ou moins marquées (Figure 8). De couleur brune, jaunâtre ou grise la patelle est souvent couverte d'algues. Elle vit à un endroit précis d'un rocher, le bord de sa coquille épousant parfaitement la surface de la roche et son pied faisant ventouse. Elle peut ainsi stocker une réserve d'eau pendant la marée basse. A marée haute elle se déplace pour s'alimenter mais revient à son emplacement (phénomène de homing) en suivant une traînée de mucus. Son pied est jaunâtre et gris translucide.



Figure 8: Photo de *Patella sp* vue de dessous (doris.ffessm.fr)

Gibbula pennanti : Ce gastéropode possède une coquille conique plus large que haute (Figure 9). La base de la coquille est en damier coloré. Son ouverture est fermée par un opercule corné de couleur brune et a un intérieur nacré. Ce gastéropode vit en milieu médiolittoral moyen et inférieur rocheux en mode abrité. On la trouve facilement dans les cuvettes ou les flaques de l'estran où elle peut être localement très abondante. Elle affectionne particulièrement le couvert humide des algues comme *Fucus vesiculosus* et *Ascophyllum nodosum* ainsi que la face inférieure des rochers (www.doris.ffessm.fr/).



Figure 9: Photo de *Gibbula pennanti* (doris.ffessm.fr)

B. Suivi des paramètres physico-chimiques au sein des cuvettes intertidales

1. Présentation du suivi

Le suivi a été réalisé en été le 3 septembre 2015 et en hiver le 11 mars 2016 sur 3 cuvettes de l'estran du Blosson. La cuvette A est celle située le plus haut sur l'estran. La cuvette B est située au milieu de la zone intertidale et la cuvette C est celle qui est la plus basse sur l'estran (Annexe 1, 2 et 3). La cuvette C est enclavée entre 2 rochers. Toutes possèdent un substrat rocheux (Tableau 1). La cuvette A est la moins profonde (25 cm maximum) et celle qui a le plus petit volume (63,1L). La cuvette B a une profondeur maximum de 31 cm et un volume de 175,5L et la cuvette C a une profondeur maximum de 45 cm et un volume de 234,7 L. La surface de ces cuvettes a été déterminée avec le logiciel ImageJ et la profondeur maximum a été mesurée directement. Le volume des cuvettes a été déterminé à partir de la salinité selon le principe suivant : On a homogénéisé l'eau de la cuvette et on mesure la salinité une première fois. On prélève un gros volume d'eau (2 litres pour les plus petites et jusqu'à 10L pour la plus grande) ensuite on ajoute le même volume d'eau douce/distillée (salinité 0‰). On homogénéise et on reprend la salinité. On obtient le volume total de la cuvette avec le calcul suivant :

$$C = \frac{1-X_2}{X_1} \text{ Puis on calcule } Vf = \frac{VE}{C \times 100}$$

X1, salinité initiale de la cuvette après homogénéisation.

X2, salinité après l'ajout de l'eau douce et homogénéisation.

C, rapport obtenu

VE, volume d'eau douce ajouté en cm³.

Vf, Volume de la cuvette en L

n° cuvette	Volume (en L)	Surface en m ²	Profondeur max (en cm)	Espèces d'algues dominantes	Substrat
A	63,1	0,537	25	<i>Ulva enteromorpha</i> - <i>Litophyllum incrustans</i>	Rocheux
B	175,5	0,788	31	<i>Sargassum muticum</i> - <i>Corallina officinalis</i>	Rocheux
C	234,7	1,155	46	<i>Corallina officinalis</i>	Rocheux

Tableau 1 : Topologie des 3 cuvettes étudiées avec leur profondeur maximum, leur volume et leur surface ainsi que les espèces d'algues dominantes et leur substrat

2. Déroulement du suivi

Le suivi 24h des cuvettes a consisté à mesurer plusieurs paramètres physico-chimiques tels que le pH, la température, l'oxygène (O_2), l'alcalinité totale et l'ammonium (NH_4^+). Les mesures ont été réalisées toutes les heures dans les 3 cuvettes durant 24h pendant les basses mers sur l'estran du Bloscon.

3. Les paramètres mesurés

Les mesures de pH, d'oxygène, de salinité et de température ont été réalisées avec la sonde d'un multimètre préalablement calibré pour l'eau de mer (calibration Tris). Le pH donne des informations sur des processus d'équilibre dans les solutions. L'eau de mer est différente de l'eau douce, il faut donc une échelle de pH adapté : C'est le pH Total (pH_T). Cette échelle tient compte de la présence de l'ion fluorure dans le milieu et dont la détermination de sa constante de dissociation dans l'eau de mer est très complexe, le pH_T contourne ce problème (www.somlit.epoc.u-bordeaux1.fr/). Les prélèvements d'eau de mer pour les mesures d'ammonium et d'alcalinité totale ont été réalisés selon le protocole suivant : 100 ml d'eau de mer des cuvettes ont été prélevés avec une seringue puis le flacon destiné à recueillir ce prélèvement a été rincé 3 fois avec cette même eau de mer. Le volume d'eau souhaité restant (60ml pour l'alcalinité totale et 45ml pour l'ammonium) a été injecté dans le flacon. Pour l'alcalinité totale, l'eau de mer a été filtrée par un filtre GF/F de $0,7\ \mu m$ afin d'enlever toutes les impuretés en suspension et on a ajouté une goutte de mercure pour empoisonner l'échantillon et éliminer les microorganismes de façon à ce qu'il ne fausse pas les résultats.

Les autres paramètres ont été mesurés comme cela :

- Le test ammonium permet de connaître la concentration en NH_4^+ dans l'eau de mer. Pour obtenir un flux d'excrétion la valeur obtenue a été reportée par unité de biomasse. La méthode de mesure de l'ammonium la plus utilisée dans le milieu marin est la méthode colorimétrique au bleu d'indophénol (réaction de Berthelot) appliquée à l'eau de mer par Koroleff et Solorzano (1969-1970). Il a été ajouté 1,5 ml de réactif R1 (solution de phénol nitroprussiate) et autant de réactif R2 (solution alcaline complexante au chlore) et on a homogénéisé. Les flacons ont été placés à l'obscurité car les réactifs réagissent à la lumière. Après un temps de repos on a passé les prélèvements au spectrophotomètre de masse à 630nm. L'absorbance a ensuite été reportée sur une droite d'étalonnage au préalable établit pour estimer la concentration en NH_4^+ .

- L'alcalinité totale traduit la capacité d'une eau à neutraliser les protons H^+ , autrement dit l'AT nous renseigne sur la composition en certains types d'anions (CO_3^- , HCO_3^- , CO_3^{2-}) nécessaire à la calcification des espèces calcaires. Si l'AT augmente alors il y a une dissolution de ces ions et si l'AT diminue il y a au contraire calcification. La mesure de l'alcalinité totale d'une solution se fait par titration. Un titrateur automatique relié à une sonde pH a été utilisé. En premier lieu l'appareil a été calibré et le système a été purgé pour se débarrasser des bulles d'air. On a pesé 20mg d'eau de mer prélevée dans un bécher que l'on a ensuite placé sous l'injecteur et la sonde. Les informations ont été rentrées sur l'interface (masse, n° échantillon...). Un barreau aimanté a homogénéisé la solution durant la titration. Après 2 min l'appareil a injecté 4,3 ml d'acide chlorhydrique (concentration 0.001mol.L^{-1}). Ensuite à chaque fois que le pH se stabilise l'appareil rajoute 0,1 ml d'acide jusqu'à atteindre une valeur de pH égale à 3. Les données obtenues (évolution du pH en fonction du volume d'acide, masse de l'échantillon, température, salinité...) sont rentrées sur Excel pour obtenir la valeur d'alcalinité en milliéquivalent Kg^{-1} d'eau de mer et en milliéquivalent L^{-1} d'eau de mer.

Les formules de la photosynthèse et de la respiration sont rappelées ici :

Photosynthèse : $CO_2 + 6 H_2O \rightarrow C_6H_{12}O_6 + 6 O_2$

Et Respiration : $C_6H_{12}O_6 + 6 O_2 \rightarrow 6 CO_2 + 6 H_2O$

C. Assemblages expérimentaux des communautés de cuvettes intertidales

1. Système expérimental

Durant mon stage le système expérimental mis en place reproduisait les conditions hivernales présentes et futures des cuvettes en termes de pH, de température et de lumière. L'eau de mer était prélevée devant la station puis était filtrée avant d'alimenter le système expérimental. Ce système était composé de 4 bacs tampons de 100 L qui permettent d'ajuster le pH (7,98 et 7,62) et la température (10°C et 13°C) de l'eau de mer (Figure 10). Ces bacs alimentaient chacun de façon continue une rangée de 5 répliquats d'aquariums disposés dans 2 bains-maries régulés à 10 et 13°C pour le maintien de la température à la valeur souhaitée (Annexe 4). Le pH était contrôlé avec un bullage de CO_2 .

4 conditions (avec 5 répliquats par conditions) étaient donc obtenues :

- Condition 1 : pH 7.98 et Température 10°C
- Condition 2 : pH 7.62 et Température 10°C
- Condition 3 : pH 7.98 et Température 13°C
- Condition 4 : pH 7.63 et Température 13°C

Les bains-marie sont éclairés par des néons. L'éclairage varie selon la photopériode (jour / nuit) et selon les phases d'immersion (Irradiance = 30 μ mol) ou d'émersion (Irradiance = 100 μ mol). L'arrivée d'eau de mer est coupée pendant la phase d'émersion pour simuler la basse mer.

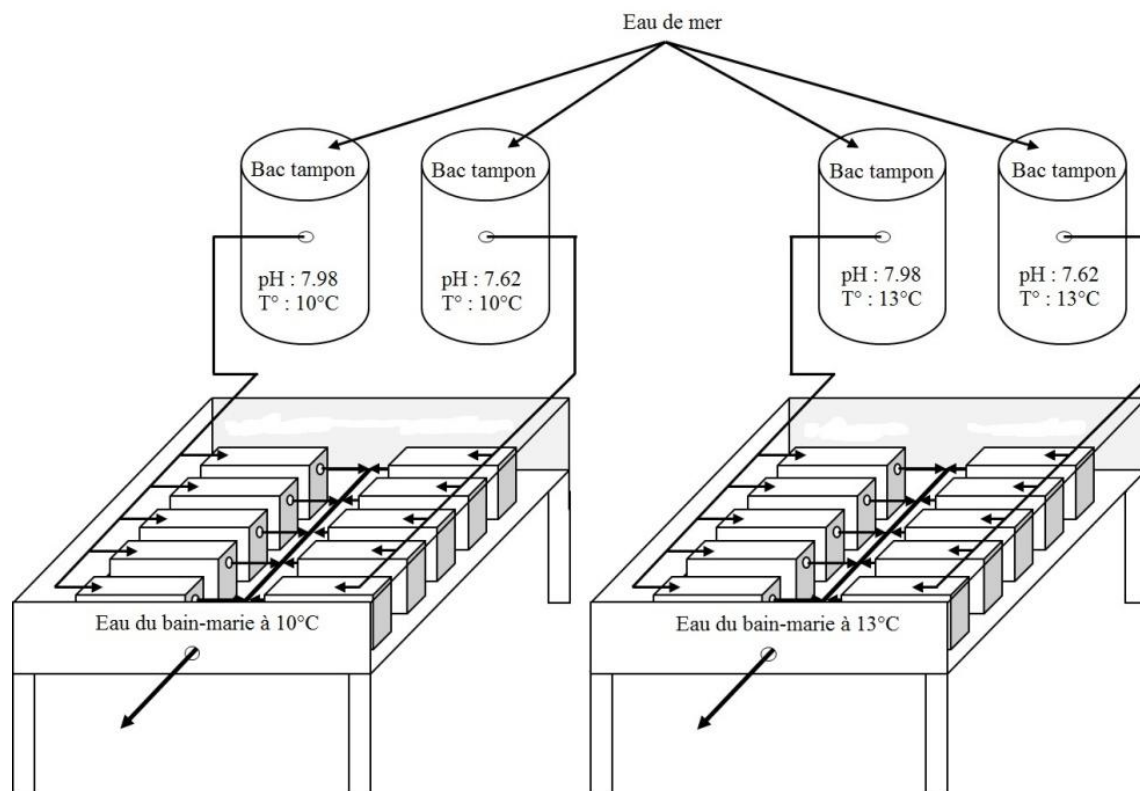


Figure 10: Schéma du système expérimental avec les 4 bacs tampons alimentant les aquariums

Des relevés de pH, température et de salinité ont été effectués tous les 2 jours dans tous les aquariums avec un multimètre.

2. Assemblages expérimentaux

Dans chaque aquarium on retrouve des *Ulves*, *Chondrus crispus*, *Bifurcaria bifurcata* et *Corallina officinalis* et *Lytophyllum inscrustans* qui sont les algues molles et calcaires les plus abondantes dans les cuvettes. On y trouve aussi 2 *Patella ulyssiponensis* et 3 *Gibulla penanti* qui y sont naturellement présentes et 2 coquilles vides de *Patella ulyssiponensis* (Figure 11).



Figure 11 : Photo d'un assemblage expérimentale contenant les communautés

D. Présentation des méthodes utilisées

1. Relations tailles poids chez les gastéropodes et détermination du poids des algues non calcaires

Les relations tailles-poids ont été établies pour connaître la biomasse des individus expérimentaux en évitant de les sacrifier pour en déterminer leur biomasse (poids sec). Les relations ont été effectuées sur 48 gibbules et 16 patelles provenant de l'estran naturel du port de Blosson à Roscoff (48°43'28.2''N 3°58'08.5''W). Ces individus ont été conservés au congélateur. Les mesures de longueur, hauteur et largeur ont été réalisées avec un pied à coulisse électronique. Le déroulement de l'opération a été le suivant : les individus ont été pesés et leurs volumes ont été déterminés avec la méthode du buoyant weight. Des coupelles en aluminium ont été pesées et identifiées avec une plaquette numérotée, puis la tare a été faite. Les coquilles et le corps des gastéropodes (gibbules et patelles) ont été pesés séparément. Pour les gibbules la coquille a été brisée avec un marteau et le corps mou a été séparé de la coquille avec une pince. Pour les patelles le corps de la coquille ont été séparés avec un scalpel. La coquille et le corps ont été pesés dans les coupelles prévues à cet effet une première fois pour avoir le poids frais, puis après 48H à l'étuve à 60°C ils ont été pesés à nouveau pour obtenir le poids sec.

J'ai ensuite déterminé le volume des algues avec la méthode du buoyant weight. J'ai ensuite pesé les algues à l'aide d'une coupelle en aluminium numérotée. Après les avoir mis à l'étuve à 60°C pendant 48H j'ai pesé à nouveau pour obtenir les poids secs. Cela nous a permis de normaliser les flux métaboliques (la production photosynthétique, respiration et excrétion) à la biomasse des gastéropodes et des algues. Les flux métaboliques sont ainsi exprimés par unité de poids secs en gramme ($\mu\text{mol h}^{-1} \text{GPS}^{-1}$)

2. Mesures de métabolisme

Les mesures de métabolisme ont été réalisées à l'aide de chambres respirométrique transparentes en plexiglas (Figure 12). Cela a été fait pour tous les gastéropodes et les algues de chaque aquarium pour chaque condition de pH et de température. Ensuite le métabolisme des communautés entières a été mesuré. Toutes les incubations ont été réalisées à la lumière et à l'obscurité pour avoir la photosynthèse nette et la respiration respectivement. Les chambres d'incubation sont transparentes et doivent être hermétiquement fermées sous l'eau afin de ne pas avoir de bulles d'air pour ne pas fausser les mesures. Elles contiennent un barreau aimanté et un support en plastique troué qui permet d'homogénéiser l'eau durant l'expérimentation tout en soutenant et préservant les individus. On connaît le volume d'eau de mer de chaque chambre à vide (185 ml). A partir des relations tailles- poids chez les gastéropodes et les relations poids- volumes pour les algues molles le volume d'eau de mer de chaque incubation a été déterminé pour pouvoir reporter la photosynthèse, la respiration et l'excrétion par gramme de poids secs. En mesurant au début (T0) et à la fin (Tf) de chaque incubation on détermine ce qui a été produit ou consommé.



Figure 12 : Photo d'une incubation d'une communauté

Grâce à cette formule globale $X = \frac{\Delta P + \alpha V}{\Delta T \times \beta}$ on a été capable de mesurer :

- Des flux de dioxygène dissout (O_2) lors de la photosynthèse des algues et leur respiration et la respiration des gastéropodes.
- Des flux d'ammonium (NH_4^+) qui correspondent à l'excrétion des gastéropodes
- L'alcalinité totale (AT) pour savoir s'il y a calcification ou dissolution

Où ΔP correspond à la variation du paramètre choisi pendant l'incubation, soit : $[P]_{Tf} - [P]_{T0}$ (en $\mu\text{mol L}^{-1}$).

V, le volume de la chambre en litre.

Δt , la durée de l'incubation en heure.

β , le poids sec des individus incubés en gramme.

3. Mesure de la concentration en ammonium

Pour obtenir un flux d'excrétion on a appliqué la formule suivante :

$$C = \frac{\Delta NH_4^+ \times V}{\Delta T \times \beta}$$

C, le flux d'excrétion par unité de poids sec en $\mu\text{mol h}^{-1} \text{ gPS}^{-1}$. Si $C > 0$ = excrétion et si $C < 0$ = assimilation.

ΔNH_4^+ qui correspond à la variation de $[NH_4^+]$ pendant l'incubation, soit : $[NH_4^+]_{Tf} - [NH_4^+]_{T0}$ (en $\mu\text{mol L}^{-1}$).

V, le volume de la chambre en litre.

Δt , la durée de l'incubation en heure.

β , le poids sec des individus incubés en gramme.

4. Mesure d'alcalinité totale

Le taux de calcification a été déterminé selon l'équation suivante :

$$B = \frac{\Delta AT \times V}{2\Delta T \times \beta} - \frac{C}{2}$$

B, le taux de calcification par unité de poids sec en $\mu\text{mol h}^{-1} \text{ gPS}^{-1}$. Si $B > 0$ = calcification et si $B < 0$ = dissolution.

ΔAT qui correspond à la variation de l'Alcalinité Totale pendant l'incubation, soit : $AT_{Tf} - AT_{T0}$ (en $\mu\text{mol L}^{-1}$).

V, le volume de la chambre en L.

Δt , la durée de l'incubation en H.

β , le poids sec des individus incubés en g

$-\frac{C}{2}$, correction appliquée par rapport à l'ammonium de l'eau de mer par (Gazeau et al., 2015)

5. Mesure de dioxygène dissout

Le dioxygène dissout a été mesuré à l'aide d'une fibre optique relié un Oxymètre. On place la fibre optique sur la pastille qui se trouve sur le couvercle de la chambre d'incubation (Annexe 5) et on lit le résultat sur l'interface du logiciel. La production photosynthétique, la respiration des algues et des gastéropodes a été déterminée selon la formule suivante :

$$A = \frac{\Delta O_2 \times V}{\Delta t \times \beta}$$

A, le flux d'oxygène par unité de poids sec en $\mu\text{mol h}^{-1} \text{ gPS}^{-1}$. Si $A > 0$ = photosynthèse et si $A < 0$ = respiration.

ΔO_2 qui correspond à la variation de $[O_2]$ durant l'incubation soit : $[O_2]_{Tf} - [O_2]_{T0}$ (en $\mu\text{mol L}^{-1}$).

V, le volume de la chambre en L.

Δt , la durée de l'incubation en H.

β , le poids sec des individus incubés en g

6. Traitement statistique

Les traitements statistiques ont été réalisés avec le logiciel R à l'aide d'un script développé sur Tinn-R. Des ANOVA à 2 facteurs ont été calculées pour déterminer si les effets du pH et de la température étaient significatifs sur le métabolisme des algues molles en conditions expérimentales. Les résultats des ANOVA à 2 facteurs et du test de Scheirer-Ray-Hare ont été consigné dans un tableau disponible en annexe (Annexe 6).

IV. Résultats et discussion

Les résultats présentés dans ce rapport concernent les fluctuations naturelles des paramètres physico-chimiques dans les cuvettes à travers le suivi *in-situ* (Partie A) et la réponse métabolique des organismes associés aux communautés de cuvette face à l'augmentation de la température et à la diminution du pH (Partie B). Au regard du nombre d'analyses et de résultats obtenus, j'ai fait le choix de ne présenter que ceux du métabolisme des algues non calcaires. Le métabolisme des algues calcaires et des gastéropodes n'est pas traité ici.

A. Analyse du suivi saisonnier et journalier des cuvettes

Pour ce suivi, j'ai analysé les fluctuations de température, d'oxygène, de pH et d'alcalinité totale de 3 cuvettes (A ; B et C). Le trait en pointillé noir sur le graphique symbolise les valeurs pour l'eau de la mer environnante qui nous servira de référence par rapport aux fluctuations des cuvettes. La partie striée représente la phase d'immersion lors de laquelle les cuvettes sont recouvertes par la mer. Les résultats sont présentés ici pour les 2 saisons : été (septembre 2015) et hiver (mars 2016).

1. Evolution de la température

La figure 13 représente la variation de la température (en °C) durant la phase d'émersion des cuvettes de nuit et de jour en été. La nuit il y a une diminution de la température d'intensité plus ou moins forte pour les 3 cuvettes. Pour la cuvette A, on passe de 15,8 °C à 13,4 °C, pour la cuvette B la variation est un peu plus faible : de 15,8°C à 13,9°C et pour la cuvette C la température atteint 14,5°C. En journée, la tendance s'inverse, on a une augmentation de la température pour les cuvettes A et B mais pas pour la C. On passe de 16,7 à 20,9°C pour A, de 16,7 à 18,8°C pour B. Mais la température de la cuvette C diminue pour atteindre 15,6°C en fin d'émersion.

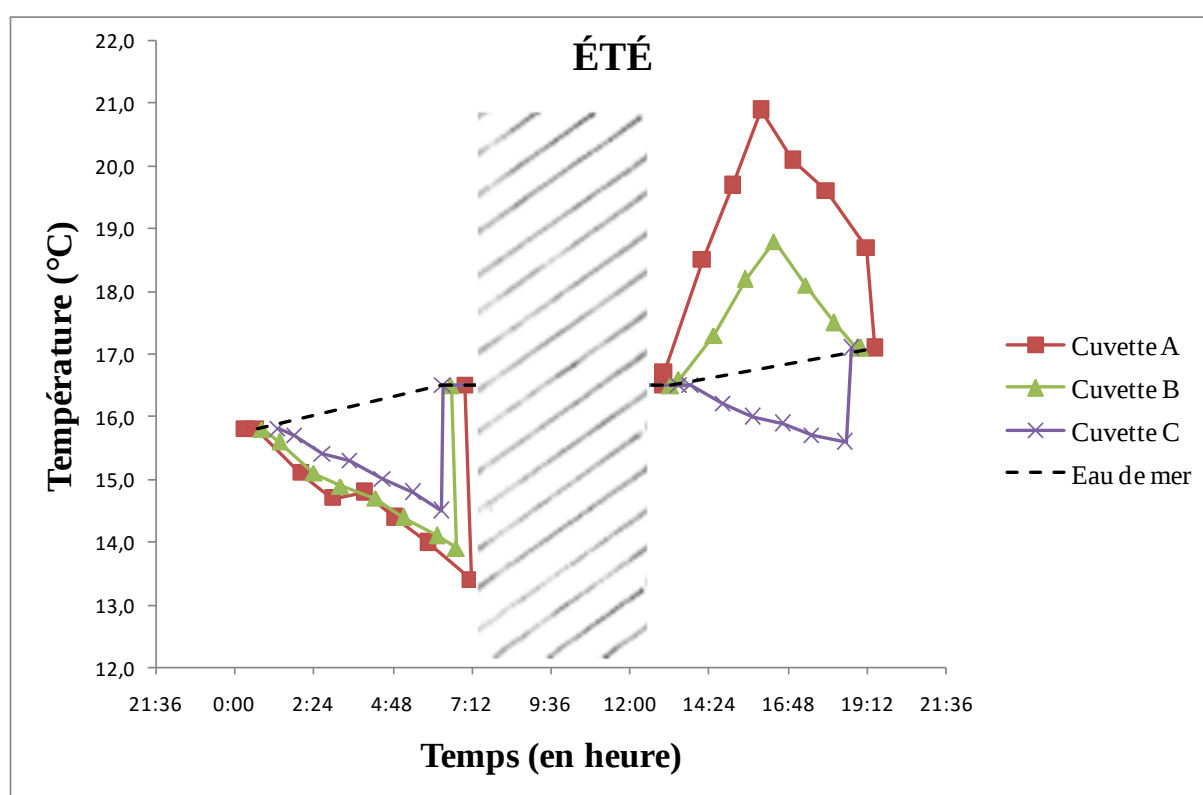


Figure 13: Evolution de la température en été dans les cuvettes au cours d'une journée

La figure 14 représente la variation de la température (en °C) durant la phase d'émersion des cuvettes de nuit et de jour en hiver. La nuit il y a une diminution de la température d'intensités différentes pour les 3 cuvettes. La cuvette C à une température qui reste assez proche de celle de l'eau de mer (+ - 0,1). Pour les 2 autres cuvettes la température diminue graduellement pour atteindre 8,1 °C pour B et 7,2 pour A à la fin de l'émersion. En journée, la température des cuvettes A et B augmentent, elles passent respectivement de 10°C à 12 et 11°C avant l'immersion. La température de la cuvette C augmente légèrement en

début de la phase d'émersion (+0,4°C) puis sa température s'approche de celle de l'eau de mer.

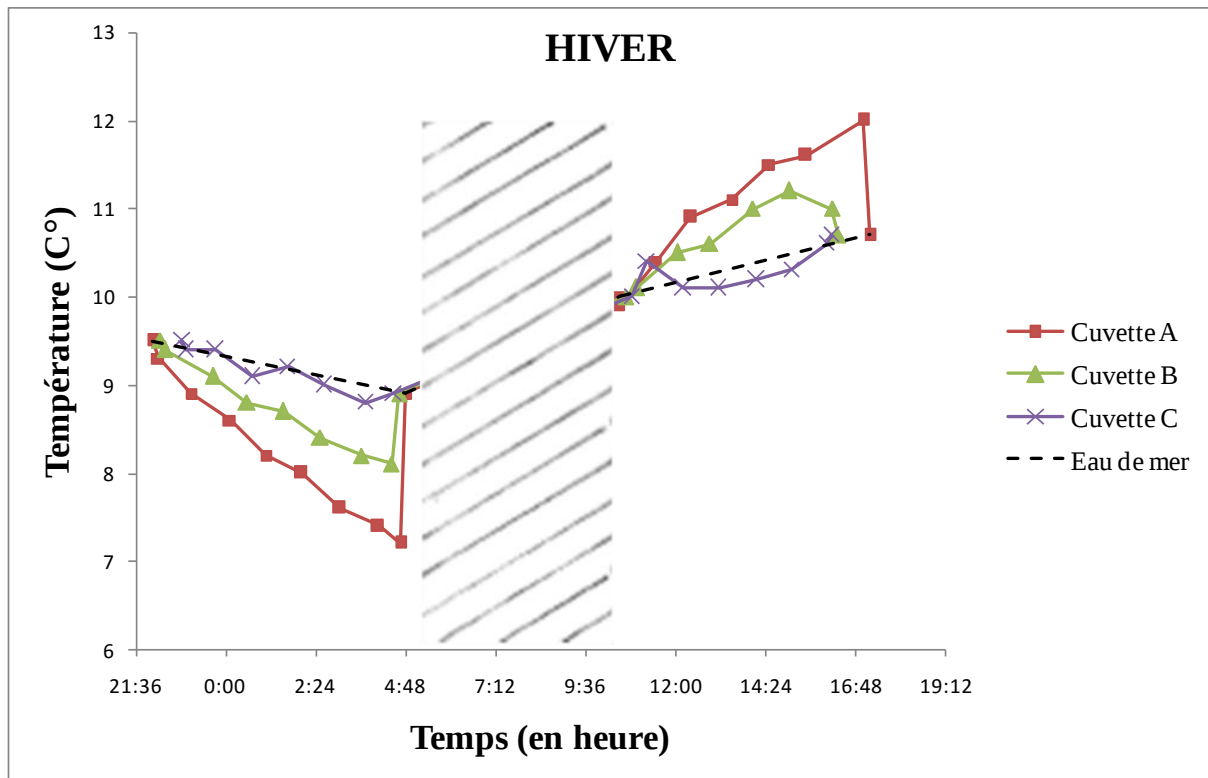


Figure 14: Evolution de la température en hiver dans les cuvettes au cours d'une journée

La nuit la température des cuvettes est déterminée par la température de l'air mais aussi par l'énergie stockée dans la roche environnante au cours de la journée (Daniel & Boyden, 1975). La nuit la température de l'air baisse, diminuant également la température des cuvettes. Les différences observées sont dues aux caractéristiques physiques des cuvettes, leur volume, surface et profondeur maximale (III.B.1). Le jour, seule la cuvette C voit sa température diminuer. Les 2 autres cuvettes se réchauffent jusqu'à atteindre 21°C pour la cuvette A. Cela est due à l'importante quantité d'énergie lumineuse perçue par les cuvettes A et B, ainsi que de leur faible profondeur (25cm et 31cm) et de leur faibles surface (<1m²). La cuvette C enclavée entre les rochers, l'abritant du soleil une partie de la journée. Toutes ces cuvettes ont un substrat rocheux qui facilite leur réchauffement. En hiver la température extérieure est plus basse qu'en été ce qui explique la température plus faible de l'eau de mer (16°C en été contre 9,5°C en hiver) et donc celle des cuvettes. En hiver, la cuvette C conserve une température proche de celle de l'eau de mer. On observe cependant une augmentation de la température pour les cuvettes A et B en hiver le jour, mais avec une amplitude moins forte qu'en été (Hiver : +2°C, Été : +4°C).

2. Evolution de la concentration en oxygène

La figure 15 représente la variation du taux d'O₂ dissous en mg.L⁻¹ durant la phase d'émersion des cuvettes de nuit et de jour en été. La nuit, le taux de dioxygène dissous diminue d'une valeur de 7,92 mg.L⁻¹ à une valeur approchant le zéro (0,31 mg.L⁻¹) pour les cuvettes A et B et diminue seulement jusqu'à 2,73 mg.L⁻¹ pour la cuvette C. Le jour le taux d'O₂ dissous augmente rapidement dans la cuvette A jusqu'à une valeur optimale de 30,56 mg.L⁻¹ après 2h d'émersion puis diminue graduellement jusqu'à 10,41 mg.L⁻¹ avant la phase d'immersion. La cuvette B se comporte de la même façon mais avec une amplitude plus faible avec un pic à 23,43 mg.L⁻¹ après 4 h d'émersion puis atteint la valeur de 19,82 mg.L⁻¹ juste avant la phase d'immersion. La cuvette C se comporte différemment, ces valeurs d'O₂ dissous restent autour de celle de l'eau de mer (8,46 mg.L⁻¹) avec une légère production au début de l'émersion puis le taux de dioxygène dissous diminue pour atteindre 6,08 mg.L⁻¹ en fin d'émersion.

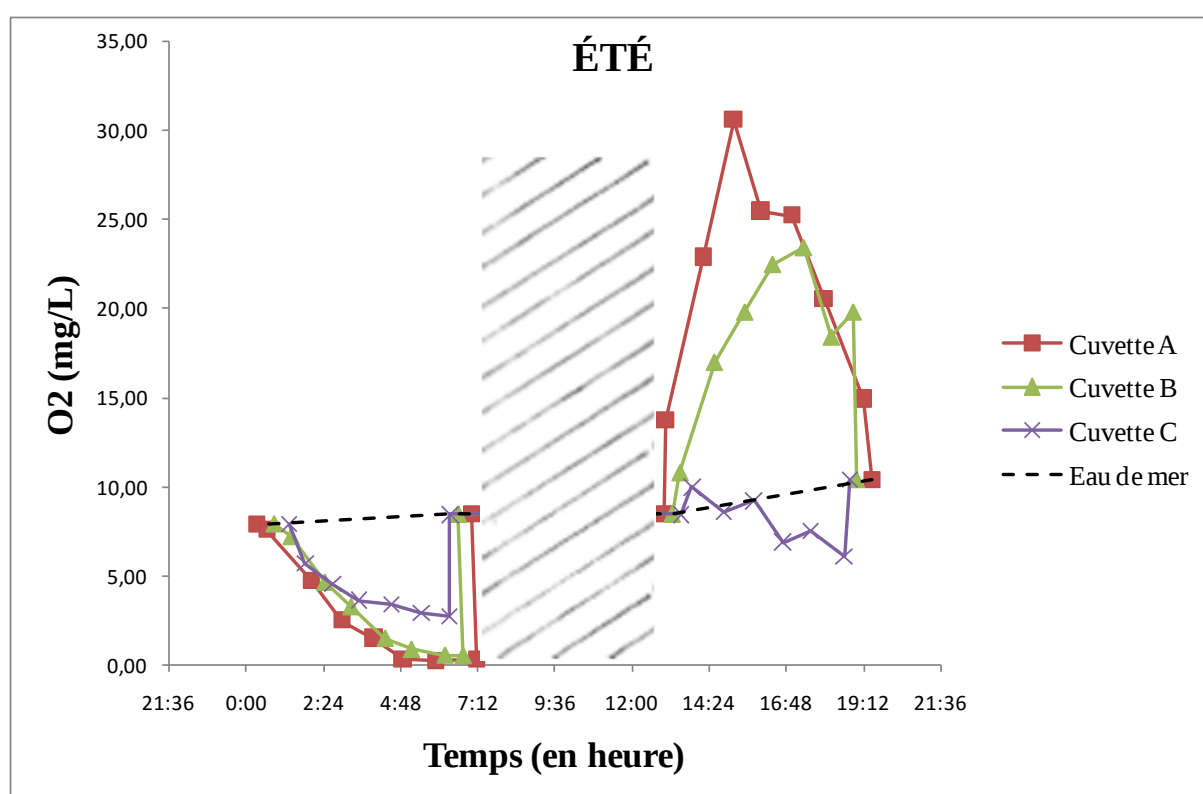


Figure 15 : Evolution de la concentration en dioxygène en été dans les cuvettes au cours d'une journée

La figure 16 représente la variation du taux O₂ dissous en mg.L⁻¹ durant la phase d'émersion des cuvettes de nuit et de jour en hiver. La nuit, le taux de dioxygène dissous diminue graduellement durant toute la phase d'émersion d'une valeur de 8,55mg.L⁻¹ à une valeur de 1,7 mg.L⁻¹ pour la cuvette A, 3,53mg.L⁻¹ pour la cuvette B et 5,89 mg.L⁻¹ pour la cuvette C. De jour le taux d'O₂ dissous augmente rapidement dans les cuvettes A et jusqu'à une valeur de 26,4mg.L⁻¹ pour la cuvette A et 29,2 mg.L⁻¹ pour la cuvette B après 6h

d'émersion juste avant l'immersion. La cuvette C se comporte différemment, ces valeurs d'O₂ dissous restent autour de celle de l'eau de mer (8,63mg.L⁻¹), avec une légère augmentation de 1,2 mg.L⁻¹ après 5h d'émersion.

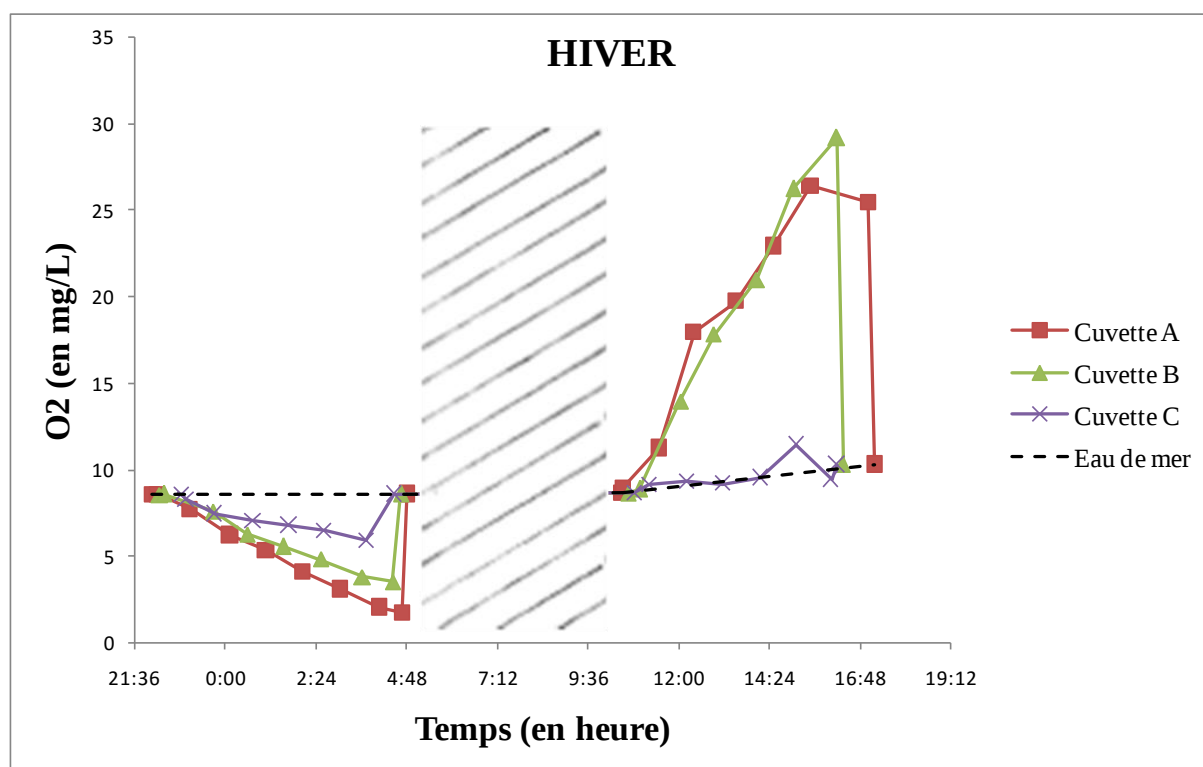


Figure 16 : Evolution de la concentration en dioxygène en hiver dans les cuvettes au cours d'une journée

Les différences observées durant la phase d'émersion peuvent être expliquées par la composition floristique et faunistique de chaque cuvette. En effet, de nuit la respiration exercée par la faune et la flore colonisant les cuvettes diminue la concentration en oxygène et augmente celle en dioxyde de carbone. Les températures plus fortes en été qu'en hiver ont également un rôle majeur sur les organismes colonisant les cuvettes, augmentant leur respiration. Le jour la production photosynthétique des algues consomme le dioxyde de carbone et produit du dioxygène augmentant la concentration dans le milieu. La production primaire exercée par les algues est étroitement liée à la quantité de lumière perçue. Plus la quantité de lumière reçue par l'algue est importante, plus la production photosynthétique augmente. Ceci jusqu'à un certain seuil où la photosynthèse diminue en rapport à une trop forte exposition à la lumière : c'est la photo inhibition.

Les différences que l'on observe la nuit entre les cuvettes peuvent s'expliquer en grande partie par leur biomasse algale et animale. Plus une cuvette possède une biomasse élevée, plus il y aura de respiration la nuit, diminuant la concentration en dioxygène, et de production primaire le jour, augmentant sa concentration. Le volume des cuvettes est également un élément important justifiant les différences observées entre les cuvettes. Les cuvettes les moins volumineuses, la A (63,1 L) et la B (175,5 L), ont un rapport volume/ biomasse totale plus élevé que celui de la cuvette C. Le jour, en été comme en hiver, les cuvettes A et B sont des milieux hyperoxygènes, la photosynthèse est élevée (Figure 14 et 15) avec un pic dans

l'après-midi. Mais alors qu'en été ce pic de saturation arrive bien plus tôt (1h30 après le début de la phase d'émersion pour la cuvette A et après 3h50 pour la cuvette B), il n'est atteint qu'en toute fin d'émersion en hiver. L'ensoleillement supérieur en été stimule la photosynthèse jusqu'à atteindre la photo inhibition des algues. Une diminution du taux d'O₂ dissout est alors observée. Ce n'est pas le cas en hiver où l'ensoleillement est moindre. Pour la cuvette C en été une baisse de taux de dioxygène dissout est observée. La faible quantité lumineuse perçue par les algues colonisant la cuvette C engendre une faible production primaire, ne compensant pas la respiration.

3. Evolution du pH

La figure 17 représente la variation du pH (mesuré sur l'échelle totale, pH_T) durant la phase d'émersion des cuvettes de nuit et de jour en été. Les 3 cuvettes (A, B et C) ne présentent pas les mêmes variations pour la phase d'émersion de jour en été et en hiver mais elles varient de la même façon de nuit et cela peu importe la saison. Le pH_T au sein de la cuvette A varie avec une plus forte amplitude que le pH_T des autres cuvettes. De nuit de 0 :00 à 7 :12 on observe une diminution du pH_T de 0.5 unité pour la cuvette A et B et de 0.4 unité pour la cuvette C. Mais de jour entre 13 :00 et 19 :30 la cuvette A présente la plus forte augmentation de pH_T pour atteindre 9,9 unités de pH en 3 heures. La cuvette B réagit différemment, son pic de pH est atteint beaucoup plus tard après 6 heures d'émersion avec une valeur de pH de 9. La cuvette C se comporte encore autrement, au début de la phase d'émersion le pH augmente légèrement (+0.2 unité pH) puis il diminue pour atteindre un pH de 7,8 après 3h30 d'émersion pour ensuite remonter à un pH de 8.

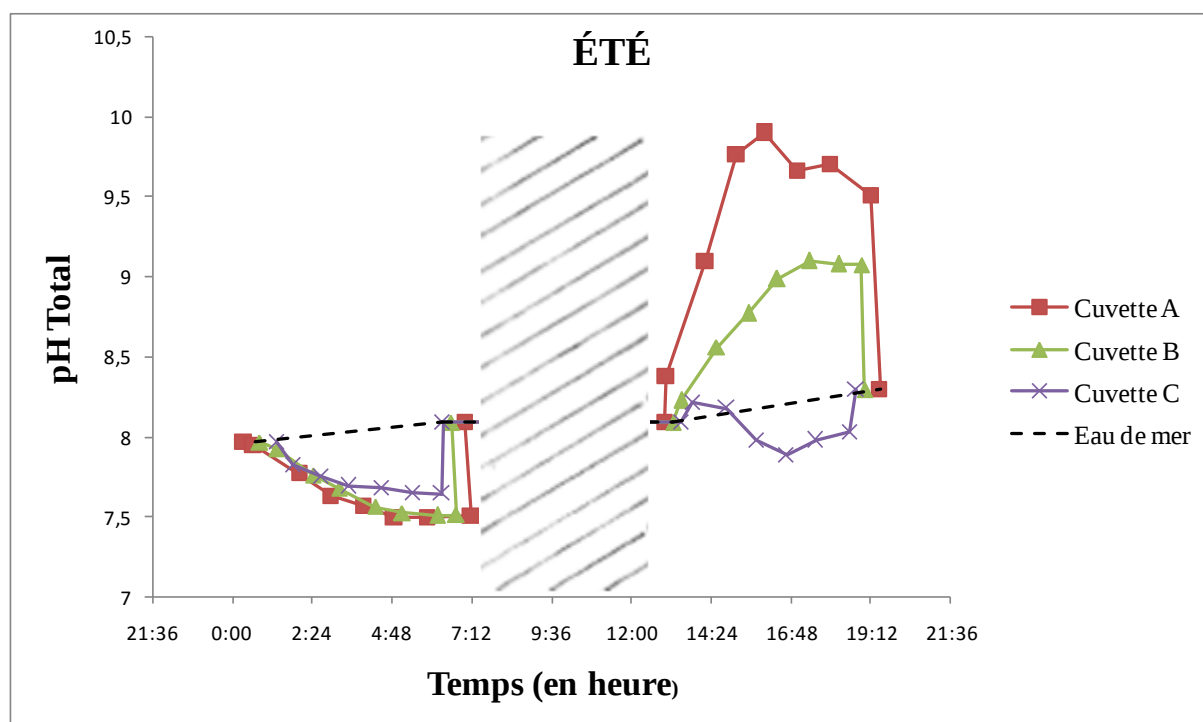


Figure 17 : Evolution du pH en été dans les cuvettes au cours d'une journée

La figure 18 représente la variation du pH_T durant la phase d'émersion des cuvettes de nuit et de jour en hiver. Le pH_T au sein de la cuvette A et B varie avec une plus forte amplitude (-0,5 unité) que le pH_T de la cuvette C (-0,2) durant la phase d'émersion de nuit. De jour la cuvette A présente la plus forte amplitude de variation, le pH_T augmente graduellement pour atteindre 9,1 unités de pH au bout de toute la durée d'émersion. La cuvette B réagit de la même façon, mais son pic de pH est plus faible avec une valeur de 8,9 unités pH. La cuvette C se comporte différemment, au début de la phase d'émersion le pH augmente légèrement (+0,1 unité pH) puis il diminue pour atteindre le pH de l'eau de mer, il augmente à nouveau de +0,1 unité pour encore diminuer et atteindre celui de l'eau de mer (8,2 unités pH).

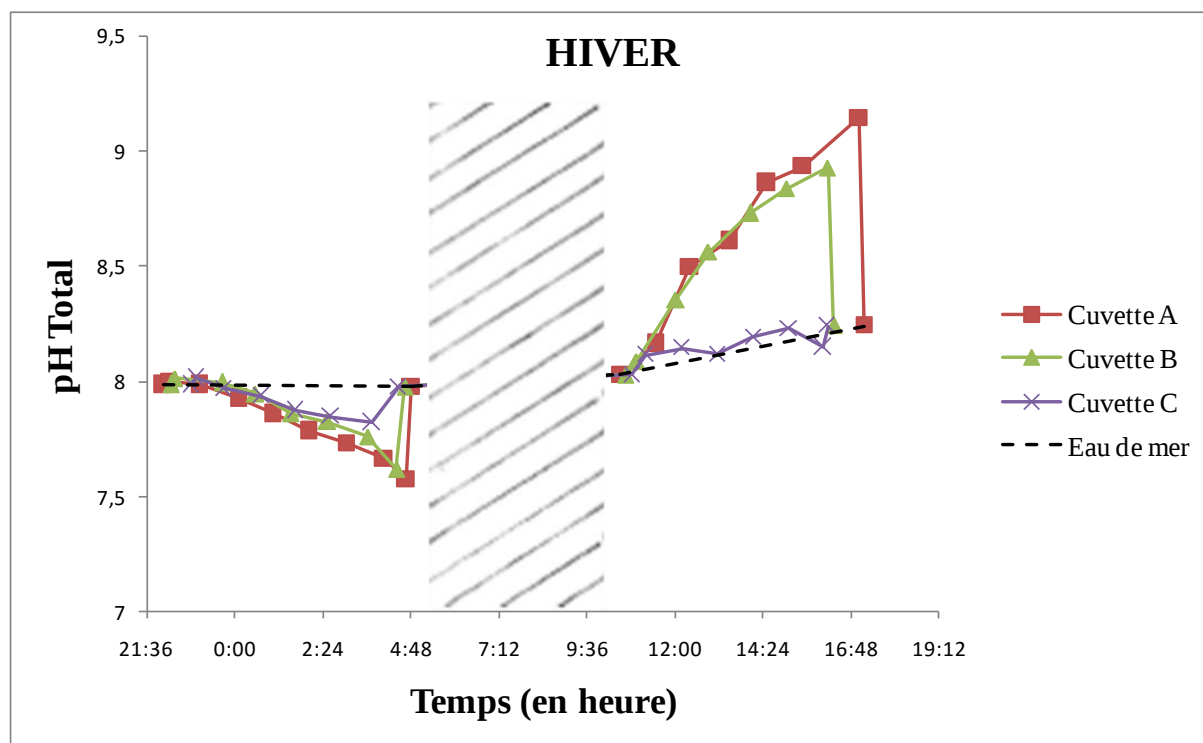


Figure 18 : Evolution du pH Total en été dans les cuvettes au cours d'une journée

Les variations de ces cuvettes sont étroitement liées à celle du dioxygène. De nuit, la diminution du pH_T peut s'expliquer par la respiration des algues et des animaux présents dans les cuvettes. En l'absence de photosynthèse, l'oxygène des cuvettes est consommé, libérant du CO_2 et induisant une baisse du pH_T . L'intensité de cette baisse de pH_T dépend de la biomasse algale et animale qui est différente dans chaque cuvette. De jour la photosynthèse diminue la concentration en CO_2 qui est assimilé augmentant ainsi le pH_T . L'exposition différente des cuvettes à l'ensoleillement affecte les taux de photosynthèse des algues. La cuvette A est celle qui possède les plus faibles volumes (63,1 L) et profondeur (25 cm), les algues profiteront donc de plus de lumière que celles de la cuvette B (volume : 175,5 ; profondeur : 31cm). La cuvette C, enclavé, n'est ensoleillée qu'une petite partie de la journée expliquant la faible variation de pH. C'est aussi la plus volumineuse (234,7 L) et la plus profonde (46cm). Son plus grand volume et la plus faible biomasse animale et végétale présentes peuvent également expliquer les variations observées. En hiver l'ensoleillement est

moindre qu'en été, les variations du pH sont de plus faibles amplitudes passant d'un pH de 8 à 9,2 contre 8 à 10 en été.

La principale différence entre les variations de pH en été et en hiver est la durée au bout de laquelle le pic de pH est atteint. Alors qu'en été le pic de pH est atteint après seulement 3h pour la cuvette A, il n'est jamais atteint avant l'immersion en hiver, en relation avec les variations en oxygène mesurées dans les cuvettes.

4. Evolution de l'alcalinité totale

La figure 19 représente la variation de l'Alcalinité Totale (AT en $\mu\text{mol de CaCO}_3.\text{L}^{-1}$) durant la phase d'émersion des cuvettes de nuit et de jour en été. De nuit pour les 3 cuvettes on observe une diminution de l'AT de 0,1 unité au début de la phase d'émersion, ensuite l'AT augmente graduellement pour atteindre un pic de $2,47 \mu\text{mol de CaCO}_3.\text{L}^{-1}$ juste avant la phase d'immersion. Le jour ces cuvettes se comportent différemment. L'AT de la cuvette C augmente avec un pic avant l'immersion à $2,47 \mu\text{mol de CaCO}_3.\text{L}^{-1}$. Alors que pour les cuvettes A et B l'AT diminue pour atteindre une valeur minimale de $1,90 \mu\text{mol de CaCO}_3.\text{L}^{-1}$ pour B et de $1,55$ pour A avant l'immersion.

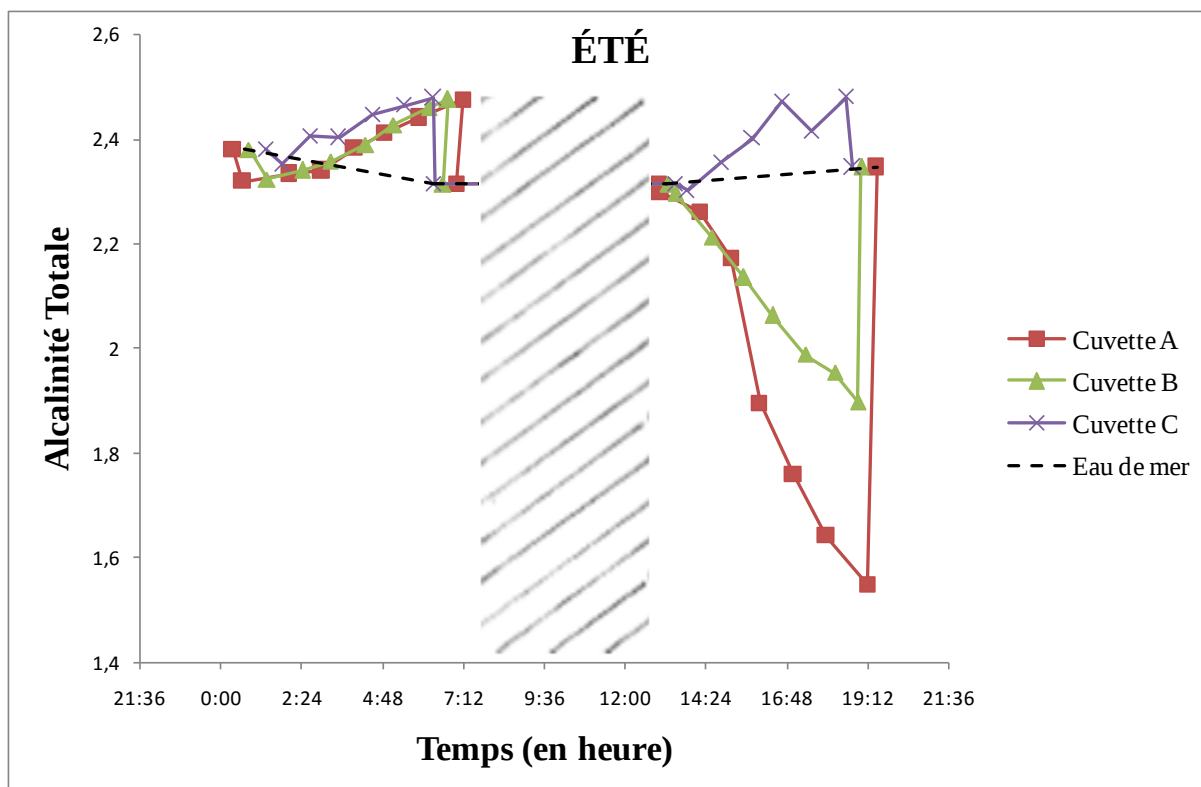


Figure 19 : Evolution de l'alcalinité totale en été dans les cuvettes au cours d'une journée

La figure 20 représente la variation de l'Alcalinité Totale (AT) durant la phase d'émersion des cuvettes de nuit et de jour en hiver. De nuit pour les 3 cuvettes on observe une diminution de l'AT de $0,01 \mu\text{mol de CaCO}_3.\text{L}^{-1}$ au début de la phase d'émersion, ensuite l'AT

augmente graduellement pour atteindre un pic de $2,62 \mu\text{mol de CaCO}_3\cdot\text{L}^{-1}$ pour la cuvette A et $2,52$ pour la cuvette B juste avant la phase d'immersion. L'AT de la cuvette C ne varie pas la nuit durant la phase d'émersion. Ensuite de jour ces cuvettes se comportent de façon similaire avec des amplitudes différentes. En effet l'AT de la cuvette A et B diminue avec un pic à $2,15 \mu\text{mol de CaCO}_3\cdot\text{L}^{-1}$ avant l'immersion. Alors que pour la cuvette C l'AT diminue pour atteindre une valeur minimale de $2,42 \mu\text{mol de CaCO}_3\cdot\text{L}^{-1}$ avant l'immersion.

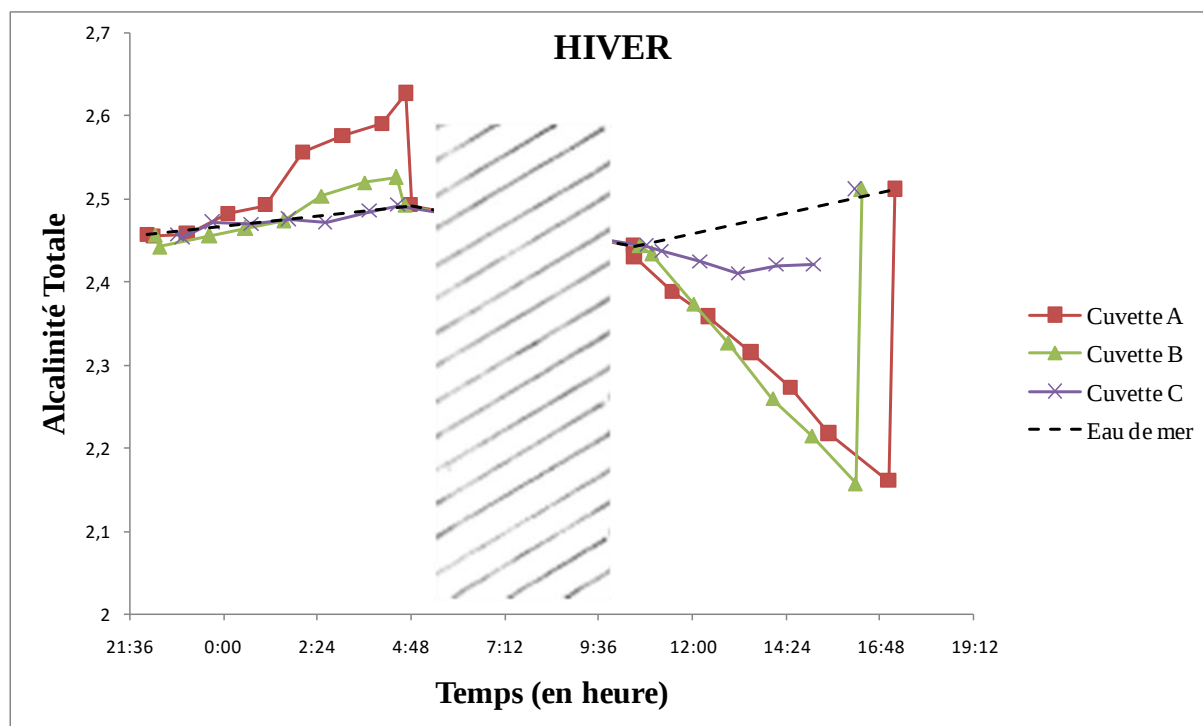


Figure 20 : Evolution de l'alcalinité totale en hiver dans les cuvettes au cours d'une journée

De manière générale l'AT augmente de nuit pour A, B et C et diminue de jour sauf pour la cuvette C ou l'AT augmente en été. De nuit, la respiration produit du CO_2 ce qui fera diminuer le pH induisant à une dissolution des ions carbonates CO_3^{2-} . Ainsi, de nuit en été, les trois cuvettes voient leur alcalinité augmenter de façon similaire. En hiver, l'alcalinité de la cuvette A augmente de manière plus importante, traduisant une plus forte dissolution des carbonates. Le jour c'est l'inverse qui se produit, la photosynthèse induit une diminution du CO_2 , ce qui fera augmenter le pH et favorisera la calcification. Le jour en été comme en hiver, l'alcalinité des cuvettes A et B diminue très fortement, traduisant d'une précipitation des carbonates plus importante. L'augmentation du pH des cuvettes favorise la calcification des algues et des animaux calcifiants en augmentant l'état de saturation des carbonates. De plus, chez les algues calcifiantes, le processus de calcification est étroitement lié à celui de la photosynthèse. De jour, la photosynthèse de l'algue induit une augmentation du pH au niveau des parois cellulaires, favorisant la précipitation des carbonates. Les cuvettes A, B et C possèdent une forte biomasse en algues calcaires corallinacées : *Corallina officinalis* et *Lithophyllum incrustans*. L'exposition importante à la lumière des cuvettes A et B sont à l'origine d'une forte production photosynthétique par les algues calcaires, augmentant le pH

intracellulaire. La précipitation des carbonates est donc favorisée expliquant la forte diminution de l'alcalinité totale observée.

B. Analyse du métabolisme des algues non calcaires sous différentes conditions expérimentales

1. *Chondrus crispus*

La figure 21 représente la production primaire et la respiration liée à la variation du dioxygène dissout en $\mu\text{mol h}^{-1} \text{gPS}^{-1}$ sous différentes conditions de pH et de température chez l'espèce *Chondrus crispus*. La production brute varie de $32,34 \mu\text{mol h}^{-1} \text{gPS}^{-1}$ pour la condition avec un pH de 7,98 et une température de 10°C à $18,18 \mu\text{mol h}^{-1} \text{gPS}^{-1}$ pour un pH de 7,62 et une même température. La production brute sous un pH de 7,98 et une température 13°C est de $26,32 \mu\text{mol h}^{-1} \text{gPS}^{-1}$ et sous un pH de 7,62 et la même température elle est de 25,97. La respiration varie de $-8,09 \mu\text{mol h}^{-1} \text{gPS}^{-1}$ pour la condition avec un pH de 7,98 et une température de 10°C à $-9,96 \mu\text{mol h}^{-1} \text{gPS}^{-1}$ pour un pH de 7,62 et une même température. La respiration sous un pH de 7,98 et une température 13°C est de $-5,93 \mu\text{mol h}^{-1} \text{gPS}^{-1}$ et sous un pH de 7,62 avec la même température elle est de $-13,87 \mu\text{mol h}^{-1} \text{gPS}^{-1}$.

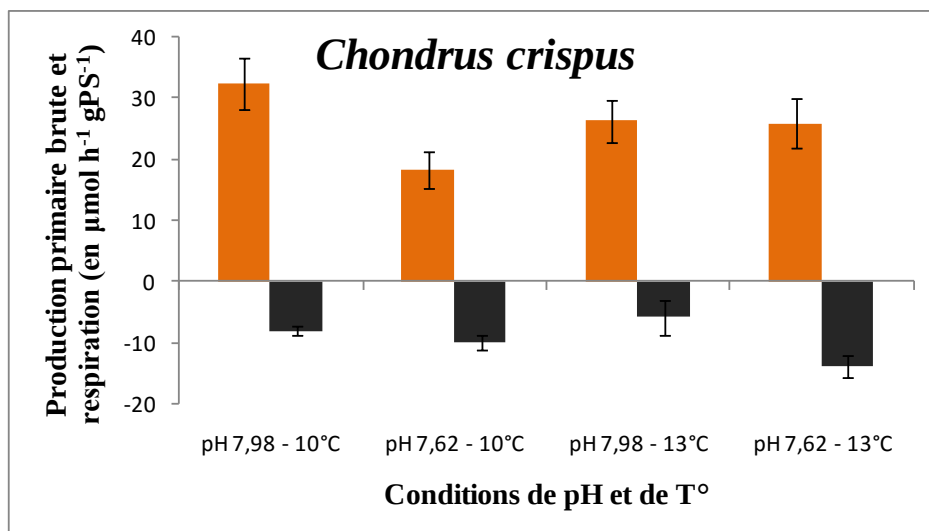


Figure 21 : Production primaire brute et respiration de *Chondrus crispus* sous différentes conditions de pH et de température à la lumière (couleur orange) et à l'obscurité (couleur noire).

On n'observe pas d'effet du pH sur la production primaire brute (ANOVA 2 facteurs, p-valeur = 0,0622) mais un effet très significatif du pH sur la respiration (p-valeur = 0,00987). La production primaire brute n'est pas affectée par la température (ANOVA 2 facteurs, p-valeur = 0,8224). La respiration n'est pas affectée par la température (ANOVA 2 facteurs, p-valeur = 0,42139). Il n'y a pas d'effet significatif de la température et du pH combinés ni sur la production primaire brute ni sur la respiration. Le fait qu'il n'y est pas d'effet significatif du pH sur la production primaire brute pourrait être expliqué par l'hypothèse qu'il doit y avoir

des mécanismes de concentration du carbone (CCM) qui feraient que l'algue n'est pas limitée en carbone à pH ambiant (7,98). L'effet significatif du pH sur la respiration pourrait être expliqué par le fait que l'algue subit un stress ce qui augmente son métabolisme.

2. *Ulva sp*

La figure 22 représente la production primaire brute et la respiration chez l'algue *Ulva sp*. La production brute varie de $70,60 \mu\text{mol h}^{-1} \text{gPS}^{-1}$ pour la condition avec un pH de 7,98 et une température de 10°C à $57,28 \mu\text{mol h}^{-1} \text{gPS}^{-1}$ pour un pH de 7,62 et une même température. La production brute sous un pH de 7,98 et une température 13°C est de $60,57 \mu\text{mol h}^{-1} \text{gPS}^{-1}$ et sous un pH de 7,62 et la même température elle est de $40,61 \mu\text{mol h}^{-1} \text{gPS}^{-1}$. La respiration varie de $-30,05 \mu\text{mol h}^{-1} \text{gPS}^{-1}$ pour la condition avec un pH de 7,98 et une température de 10°C à $-9,26 \mu\text{mol h}^{-1} \text{gPS}^{-1}$ pour un pH de 7,62 et une même température. La respiration sous un pH de 7,98 et une température 13°C est de $-16,32 \mu\text{mol h}^{-1} \text{gPS}^{-1}$ et sous un pH de 7,62 avec la même température elle est de $-7,62 \mu\text{mol h}^{-1} \text{gPS}^{-1}$.

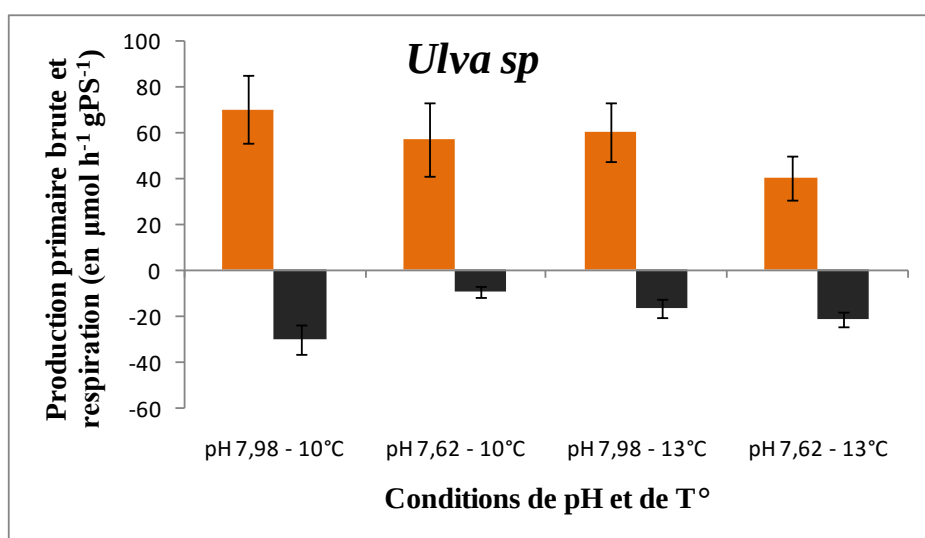


Figure 22 : Production primaire brute et respiration d'*Ulva sp* sous différentes conditions de pH et de température à la lumière (couleur orange) et à l'obscurité (couleur noire).

Aucun effet du pH ni de la température n'a été détecté sur la production primaire brute (respectivement, p-valeur = 0,368 et p-valeur = 0,235) ainsi que sur la respiration (respectivement, p-valeur = 0,93237 et p-valeur = 0,10344). Un effet très significatif du pH et de la température combinés a été constaté pour la respiration (ANOVA 2 facteurs, 0,00655). Les effets d'une diminution du pH et d'une augmentation de la température sont différents selon les espèces d'Ulves (Kang and Kim, 2016). Dans notre cas les stress combinés de la température et du pH ont un effet sur la respiration d'*Ulva sp*.

3. *Bifurcaria bifurcata*

La figure 23 représente la production primaire et la respiration chez l'algue *Bifurcaria bifurcata*. La production brute varie de $27,34 \mu\text{mol h}^{-1} \text{gPS}^{-1}$ pour la condition avec un pH de 7,98 et une température de 10°C à $30,62 \mu\text{mol h}^{-1} \text{gPS}^{-1}$ pour un pH de 7,62 et une même température. La production brute sous un pH de 7,98 et une température 13°C est de $26,60 \mu\text{mol h}^{-1} \text{gPS}^{-1}$ et sous un pH de 7,62 et la même température elle est de $40,52 \mu\text{mol h}^{-1} \text{gPS}^{-1}$. La respiration varie de $-10,23 \mu\text{mol h}^{-1} \text{gPS}^{-1}$ pour la condition avec un pH de 7,98 et une température de 10°C à $-12,03 \mu\text{mol h}^{-1} \text{gPS}^{-1}$ pour un pH de 7,62 et une même température. La respiration sous un pH de 7,98 et une température 13°C est de $-7,55 \mu\text{mol h}^{-1} \text{gPS}^{-1}$ et sous un pH de 7,62 avec la même température elle est de $-5,79 \mu\text{mol h}^{-1} \text{gPS}^{-1}$.

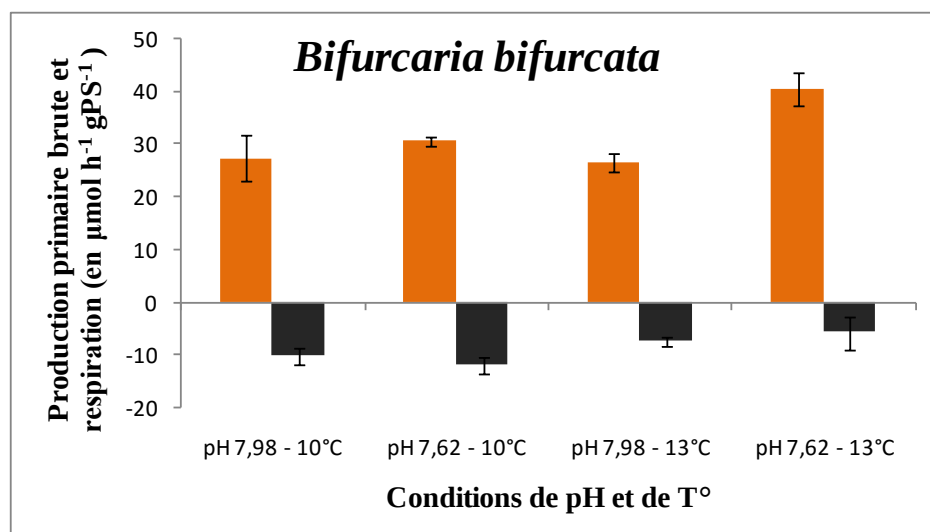


Figure 23 : Production primaire brute et respiration de *Bifurcaria bifurcata* sous différentes conditions de pH et de température à la lumière (couleur orange) et à l'obscurité (couleur noire).

Un effet positif du pH a été observé sur la production primaire brute (Scheirer-Ray-Hare test, p-valeur = 0,010165). Ceci pourrait être expliqué par le fait que cette algue utilise préférentiellement le CO_2 présent dans l'eau pour sa photosynthèse. Ainsi, en conditions ambiantes, l'algue serait limitée en carbone et bénéficierait de l'augmentation de la pCO_2 prévue pour la fin du siècle. Une diminution de la respiration a été constaté à 13°C (ANOVA 2 facteurs, p-valeur = 0,0375). On peut émettre l'hypothèse que la condition de pH égale à 7.62 avec une température de 13°C est la plus proche de l'optimum écologique de *Bifurcaria bifurcata*. Il n'y a pas d'effet combinés du pH et de la température ni sur la production primaire brute (Scheirer-Ray-Hare test, p-valeur = 0,256839) ni sur la respiration (ANOVA 2 facteurs, p-valeur = 0,3592).

V. Conclusion

Les cuvettes marines sont des environnements hyper variables. Les organismes qui y vivent ont donc dû mettre en place des mécanismes pour faire face à ces variations. Les variations de température des cuvettes sont en lien avec la quantité de lumière reçue, ainsi qu'avec des paramètres physiques tels que le volume, la profondeur, la surface des cuvettes. La température est un facteur abiotique majeur agissant sur le métabolisme des organismes qui y vivent. Les fluctuations diurnes de dioxygène, de dioxyde de carbone, de pH et d'alcalinité totale sont directement reliées à l'activité photosynthétique des algues et à la respiration à la fois de la faune et de la flore. La journée la forte production primaire induit une hyper-saturation dans les cuvettes en dioxygène. La nuit en revanche, en l'absence de photosynthèse, la respiration de la faune et de la flore consomme rapidement ce dioxygène disponible et la concentration en dioxyde de carbone augmente. Les variations les plus extrêmes ont été observées dans la cuvette A qui est la plus haute sur l'estran et donc plus isolée de la mer. L'emplacement des cuvettes sur l'estran est un élément majeur à l'origine de la variabilité inter-cuvettes. Les organismes sont répartis selon un gradient spatial en fonction de l'emplacement des cuvettes. Dans le contexte de changement climatique on a pu observer un effet contrasté chez les algues. Il y a peu d'effet du pH sur la production primaire brute, excepté pour *B. bifurcata* qui semble en bénéficier. Un effet négatif du pH a été mis en évidence sur la respiration seulement chez *C. crispus*. Cette espèce se retrouve plus bas sur l'estran, elle subit donc moins de variations naturelles dans les cuvettes, qui sont soumises moins longtemps à l'émersion que des cuvettes situées plus haut. Cette espèce est donc potentiellement plus sensible face aux changements climatiques futurs. L'algue *B. bifurcata* est peu affectée, elle semble même bénéficier des changements futurs. On retrouve cette algue plus haut sur l'estran, elle se trouve donc dans un environnement très variable. Cette tolérance face à l'hyper-variabilité naturelle au sein des cuvettes lui confère potentiellement une plus forte tolérance face aux changements climatiques futurs. C'est aussi le cas d'*Ulva sp* qui est peu affecté par les variations de pH et de température prévues pour la fin du siècle. Dans la mesure où il s'agit d'une étude préliminaire, de nombreuses perspectives d'études complémentaires sont cependant possibles telles que l'étude de cet environnement à l'échelle communautaire et étudier les interactions entre les espèces.

VI. Références bibliographiques

- Daniel, M. J. and Boyden, C. R. 1975 Diurnal variation in physico-chemical conditions within intertidal rockpools. *Field Studies* 4, 164-176.
- Gattuso J.-P., Hansson L. & Gazeau F., 2014. Acidification des océans et ses conséquences. In : Monaco A. & Prouzet P. (eds.), *Mer et océan : vulnérabilité du système océanique*, pp. 131-185. London: Hermès Sciences Publishing.
- Gazeau, F., L. Urbini, T. E. Cox, S. Alliouane, and J. P. Gattuso, 2015, Comparison of the alkalinity and calcium anomaly techniques to estimate rates of net calcification: *Marine Ecology Progress Series*, v. 527, p. 1-12.
- Kang, E. J., and K. Y. Kim, 2016, Effects of future climate conditions on photosynthesis and biochemical component of *Ulva pertusa* (Chlorophyta): *Algae*, v. 31, p. 49-59.
- Morris, S. and Taylor, A. C. 1983. Diurnal and seasonal variation in physico-chemical conditions within intertidal rock pools. *Estuarine, Coastal and Shelf Science, Mar. Sci.* 17: 339 – 355.
- Perkins, R. 2013 *The Effects of climate Change and Ocean Acidification on Corallina Seaweeds*, Cardiff Case Studies, Cardiff University.
- Stengel, D. B., R. Conde-Alvarez, S. Connan, U. Nitschke, F. Arenas, H. Abreu, J. Bonomi Barufi, F. Chow, D. Robledo, E. J. Malta, M. Mata, T. Konotchick, C. Nassar, A. Perez-Ruzafa, D. Lopez, R. Marquardt, F. Vaz-Pinto, P. S. M. Celis-Pla, M. Hermoso, E. Ruiz, G. Ordonez, P. Flores, M. Zanolla, E. Banares-Espana, M. Altamirano, N. Korbee, K. Bischof, and F. L. Figueroa, 2014, Short-term effects of CO₂, nutrients and temperature on three marine macroalgae under solar radiation: *Aquatic Biology*, v. 22, p. 159-176.

VII. Webographie

www.sb-roscoff.fr/

<http://bernard.pironin.pagesperso-orange.fr/aquatech/alcalinite.htm>

www.fao.org

www.doris.ffesm.fr/

www.somlit.epoc.u-bordeaux1.fr/

VIII. Annexe

Annexe 1



Figure 24: Photo de la cuvette A

Annexe 2



Figure 25 : Photo de la cuvette B

Annexe 3



Figure 26 : Photo de la cuvette C

Annexe 4



Figure 27 : Photo du dispositif expérimental

Annexe 5



Figure 28 : Photo de la pastille rose au-dessus du numéro de couvercle servant à mesurer le dioxygène dissout avec une fibre optique

Annexe 6

Espèce d'algues + conditions	pH	Température	pH + Température
Chondrus lumiere	0.0622 .	0.8224	0.0897 .
Chondrus obscurite	0.00987**	0.42139	0.07771.
Ulve lumiere	0.235	0.368	0.811
Ulve obscurite	0.10344	0.93237	0.00655**
Bifurcaria lumiere	0.010165*	0.289918	0.256839
Bifurcaria obscurite	0.8862	0.0375*	0.3592

Tableau 2 : Résultats de l'analyse statistique (* significatif) (**très significatif)

IX. Résumé

Les activités humaines telles que la combustion des énergies fossiles et la déforestation ont un impact important sur les océans. Elles augmentent la concentration des gaz à effet de serre, en particulier du dioxyde de carbone, dans l'atmosphère terrestre. Certains effets se font déjà ressentir comme l'augmentation de la température moyenne des océans et l'acidification des océans. Ces modifications peuvent altérer les écosystèmes marins en bouleversant le métabolisme de certains organismes pouvant jouer un rôle écologique et économique majeur. Les environnements côtiers sont connus pour être des environnements variables qui présentent d'importantes fluctuations de température et de pH. C'est pourquoi au cours de cette étude nous nous sommes intéressés aux variations des paramètres physico-chimiques des cuvettes marines par le biais d'un suivi sur 24h sur deux saisons (hiver et été). Il s'est avéré que l'augmentation de la température et du pH était plus forte en été qu'en hiver. La température peut varier de 4.5 degrés et le pH peut varier de 1.8 unité pendant l'émersion. Les cuvettes qui sont les plus hautes sur l'estran sont aussi les plus variables. En parallèle de cette étude, notre expérimentation sur le métabolisme de trois algues majeures peuplant ces cuvettes dans plusieurs conditions de pH (7.98 et 7.62) ainsi que de température (10°C et 13°C) a permis d'observer la réponse de ces organismes. Les algues telles que *Ulva sp* et *C. crispus* sont affectées par la diminution du pH et l'augmentation de la température alors que *B. bifucaria* semble au contraire en bénéficier. L'intérêt de cette étude a été d'une part de quantifier les variations des cuvettes marines et d'étudier la réponse de certaines algues à des conditions futures de pH et de température.

Mots-clés : Océans ; Cuvettes ; Acidification ; métabolisme ; mésocosme ; Algues ; calcification ; dissolution ; réchauffement