

L'Institut Agro Rennes-Angers

Site d'Angers Site de Rennes

<p><u>Année universitaire</u> : 2022 -2023</p> <p><u>Spécialité</u> : Ingénieur agronome</p> <p><u>Spécialisation (et option éventuelle)</u> :</p> <p>Sciences halieutiques et aquacoles (Aquaculture)</p>	<p>Mémoire de fin d'études</p> <p><input type="checkbox"/> d'ingénieur de l'Institut Agro Rennes-Angers (Institut national d'enseignement supérieur pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement)</p> <p><input type="checkbox"/> de master de l'Institut Agro Rennes-Angers (Institut national d'enseignement supérieur pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement)</p> <p><input type="checkbox"/> de l'Institut Agro Montpellier (étudiant arrivé en M2)</p> <p><input type="checkbox"/> d'ingénieur de VetAgro Sup</p>
--	---

Étude du rôle des macroalgues dans l'atténuation des effets de l'acidification sur l'huître creuse *Crassostrea gigas*.

Par : Valentin CAVARLÉ



Soutenu à Rennes le 13/09/2023

Devant le jury composé de :

Président et enseignant référent : Bastien SADOUL, UMR DECOD Institut Agro Rennes

Maitre de stage : PERNET Fabrice, cadre de recherche à Ifremer Plouzané avec la collaboration de DI POI Carole, cadre de recherche et KOEHLIN Hugo, ingénieur en zootechnie, de la station expérimentale d'Argenton.

Autres membres du jury : Mr Hervé LE BRIS, UMR DECOD Institut Agro Rennes et Mr Joel AUBIN, UMR SAS INRAE

Les analyses et les conclusions de ce travail d'étudiant n'engagent que la responsabilité de son auteur et non celle de l'Institut Agro Rennes-Angers L'Institut Agro Rennes-

Ce document est soumis aux conditions d'utilisation «Pate mité-Pas d'Utilisation Commerciale-Pas de Modification 4.0 France» disponible en ligne <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.fr>



Fiche de confidentialité et de diffusion du mémoire

Confidentialité

Non Oui si oui : 1 an 5 ans 10 ans

Pendant toute la durée de confidentialité, aucune diffusion du mémoire n'est possible ⁽¹⁾.

Date et signature du maitre de stage ⁽²⁾ : 
(ou de l'étudiant-entrepreneur)

A la fin de la période de confidentialité, sa diffusion est soumise aux règles ci-dessous (droits d'auteur et autorisation de diffusion par l'enseignant à renseigner).

Droits d'auteur

L'auteur ⁽³⁾ Nom Prénom CAVARELÉ Valentin.....

autorise la diffusion de son travail (immédiatement ou à la fin de la période de confidentialité)

Oui Non

Si oui, il autorise

la diffusion papier du mémoire uniquement⁽⁴⁾

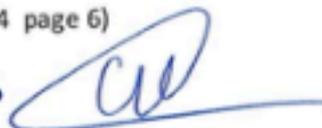
la diffusion papier du mémoire et la diffusion électronique du résumé

la diffusion papier et électronique du mémoire (joindre dans ce cas la fiche de conformité du mémoire numérique et le contrat de diffusion)

(Facultatif) accepte de placer son mémoire sous licence Creative commons CC-By-Nc-Nd (voir Guide du mémoire Chap 1.4 page 6)

Date et signature de l'auteur :

07/09/23



Autorisation de diffusion par le responsable de spécialisation ou son représentant

L'enseignant juge le mémoire de qualité suffisante pour être diffusé (immédiatement ou à la fin de la période de confidentialité)

Oui Non

Si non, seul le titre du mémoire apparaîtra dans les bases de données.

Si oui, il autorise

la diffusion papier du mémoire uniquement⁽⁴⁾

la diffusion papier du mémoire et la diffusion électronique du résumé

la diffusion papier et électronique du mémoire

Date et signature de l'enseignant :

14 sept 2023



(1) L'administration, les enseignants et les différents services de documentation de l'Institut Agro Rennes-Angers s'engagent à respecter cette confidentialité.

(2) Signature et cachet de l'organisme

(3) Auteur = étudiant qui réalise son mémoire de fin d'études

(4) La référence bibliographique (= Nom de l'auteur, titre du mémoire, année de soutenance, diplôme, spécialité et spécialisation/Option) sera signalée dans les bases de données documentaires sans le résumé

Sommaire

REMERCIEMENTS.....	4
LISTE DES FIGURES.....	5
LISTE DES ABREVIATIONS.....	6
LISTE DES ANNEXES.....	7
I. INTRODUCTION.....	1
A. LA CO NCHYLICULTURE DANS UN MONDE RICHE EN CO ₂	1
B. EFFET DE L'ACIDIFICATION SUR LA PHYSIOLOGIE DES ORGANISMES CALCIFIANTS.....	2
C. LES MACROALGUES EN CO-CULTURE POUR ATTENUER ET S'ADAPTER A L'ACIDIFICATION DES OCEANS.....	3
D. OBJECTIF DU PROJET DE MASTER.....	4
II. MATERIEL ET METHODES.....	5
A. CHOIX DU MATERIEL BIOLOGIQUE ET MAINTENANCE.....	5
1. <i>Le matériel biologique animal</i>	5
2. <i>Le matériel biologique végétal</i>	5
B. DESIGNS EXPERIMENTAUX.....	6
1. <i>Expérience de co-culture (A)</i>	6
2. <i>Expérience de co-culture en cohabitation directe (B)</i>	8
3. <i>Expérience de co-culture avec trois algues (C)</i>	9
C. MESURE DES PARAMETRES PHYSICO-CHIMIQUES DE L'EAU DE MER.....	9
D. MESURES BIOMETRIQUES.....	10
E. ANALYSE STATISTIQUE DES RESULTATS.....	10
III. RESULTATS.....	11
A. RESULTATS DE L'EXPERIENCE A.....	11
1. <i>Effet de la végétalisation sur le pH de l'eau de mer</i>	11
2. <i>Effet de la végétalisation sur la croissance des huîtres</i>	12
B. RESULTATS DE L'EXPERIENCE B.....	13
1. <i>Effet de la végétalisation sur le pH de l'eau de mer</i>	13
2. <i>Effet de la végétalisation sur la croissance des huîtres</i>	14
C. RESULTAT DE L'EXPERIENCE C.....	16
1. <i>Effet de la végétalisation sur le pH de l'eau de mer</i>	16
2. <i>Effet de la végétalisation sur la croissance des huîtres</i>	17
IV. DISCUSSION.....	19
A. DEVELOPPEMENT DE LA ZOO-TECHNIQUE ET PHYCO-TECHNIQUE DE LA CO-CULTURE EN LABORATOIRE.....	19
B. LES BENEFICES APPORTES PAR LES ALGUES SUR LA CROISSANCE DES HUITRES.....	24
V. CONCLUSION.....	26
VI. BIBLIOGRAPHIE.....	27
A. ARTICLES ET REVUES.....	27
B. SITOGRAFIE.....	29
VII. ANNEXE.....	30

Remerciements

Je tiens à exprimer ma sincère reconnaissance envers IFREMER pour m'avoir offert l'opportunité de réaliser mon stage de fin d'études sur un sujet qui me passionne profondément. Je souhaite également adresser mes remerciements chaleureux à toute l'équipe de la station expérimentale d'Argenton pour m'avoir accueilli au sein de leur structure tout au long de mon stage.

Je tiens à commencer par toi, Fabrice, qui m'a encadré, soutenu, guidé et a eu confiance en moi à chaque étape de mon parcours. Je tiens à t'exprimer ma gratitude pour ta disponibilité, ta bienveillance, ta patience et tes nombreux conseils qui font de toi un encadrant compétent. Je ne saurais oublier Hugo et Carole, à qui je tiens à rendre hommage pour leur encadrement enthousiaste, leur participation active aux expériences même pendant les week-ends et les jours fériés. Leur assistance prompte lorsque je faisais face à des difficultés, ainsi que leur expertise, ont grandement contribué à ma progression.

Je tiens tout particulièrement à saluer Coline, qui m'a guidé avec bienveillance, m'a apporté un soutien précieux lors des périodes rudes, et m'a transmis son savoir et son regard en tant que doctorante, ce qui a sans doute renforcé mon désir de poursuivre en doctorat.

Je tiens à exprimer ma gratitude envers l'équipe de techniciens d'Argenton, Isabelle, Jacqueline, Moussa et Matthias, qui m'ont généreusement assisté dans la mise en place de la salle d'expérimentation et se sont investis pleinement pendant ces quatre mois d'expérience. Je souhaite également adresser mes remerciements à Sébastien et Stéphane, pour leurs conseils et jovialité. Merci également à Charlotte, Elodie, Christine, Claudie, Amand, José et Valérian de m'avoir accueilli à Plouzané. Je tiens à évoquer la rencontre remarquable avec Jamy Gourmand et son équipe de l'émission C Jamy, qui sont venus approfondir leur compréhension de la mitigation par les algues.

Un grand merci à ceux avec qui j'ai partagé d'agréables moments pendant les pauses ou en dehors du travail. Vous avez véritablement enrichi mon dernier stage tant sur le plan professionnel que personnel.

Je saisis également cette occasion pour adresser mes remerciements à mes amis de Bretagne, mes collègues ingénieurs et ma famille, qui m'ont continuellement apporté leur soutien dans toutes mes entreprises.

Liste des figures

FIGURE 1. PROCESSUS DE CALCIFICATION DE LA COQUILLE DES MOLLUSQUES.....	2
FIGURE 2. SCHEMA DE SYNTHESE DU POTENTIEL DES MACROALGUES A CREER DES REFUGES POUR LES ORGANISMES CALCIFIANTS (ICI HUITRES) CONTRE L'ACIDIFICATION DE L'OCEAN. LE PHENOMENE EST REPRESENTE LE JOUR (A GAUCHE) ET LA NUIT (A DROITE).....	4
FIGURE 3. REPRESENTATION SCHEMATIQUE DU PLAN EXPERIMENTAL DE L'EXPERIENCE A.....	7
FIGURE 4. REPRESENTATION DU pH_t MOYEN PAR TRAITEMENT : AMB ET AO EN FONCTION DE LA BIOMASSE ET PAR NIVEAU : 1 (ROUGE ; A GAUCHE) ET 2 (BLEU ; A DROITE).....	11
FIGURE 5. SUIVI TEMPOREL MASSES HUMIDES TOTALES MOYENNES DES HUITRES PAR TRAITEMENT SUR LES 30 JOURS DE L'EXPERIENCE A. UNE REPRESENTATION DES MASSES MOYENNES A T _{FINAL} A ETE INCLUS DANS LA FIGURE.....	12
FIGURE 6. SUIVI TEMPOREL DU PH PAR TRAITEMENT PENDANT 21 JOURS D'EXPERIENCE (A) ET REPRESENTATION DU PH MOYEN PAR TRAITEMENT SUR LA DUREE EXPERIMENTALE (B). LES VALEURS AFFICHEES SONT LES pH_t MOYENS ASSOCIES.....	13
FIGURE 7. SUIVI TEMPOREL DES MASSES HUMIDES TOTALES MOYENNES DES HUITRES PAR TRAITEMENT SUR LES 22 JOURS DE L'EXPERIENCE B.....	14
FIGURE 8. RELATIONS DES MASSES, LONGUEURS DE CRASSOSTREA GIGAS PAR RAPPORT AUX TRAITEMENTS ; AVEC (A) LA MASSE COQUILLERE, (B) LA LONGUEUR COQUILLIERE, (C) LA MASSE DU POOL DE CHAIR HUMIDE (N=40 INDIVIDUS), (D) LA MASSE INDIVIDUELLE TOTALE.....	15
FIGURE 9. SUIVI TEMPOREL DU pH_t PAR TRAITEMENT PENDANT 22 JOURS D'EXPERIENCE (A) ET REPRESENTATION DU pH_t MOYEN PAR TRAITEMENT SUR LA DUREE EXPERIMENTALE (B). LES VALEURS AFFICHEES SONT LES pH_t MOYENS ASSOCIES.....	16
FIGURE 10. SUIVI TEMPOREL DES MASSES HUMIDES TOTALES MOYENNES DES HUITRES PAR TRAITEMENT SUR LES 21 JOURS DE L'EXPERIENCE C.....	17
FIGURE 11. RELATIONS DES MASSES, LONGUEURS DE CRASSOSTREA GIGAS PAR RAPPORT AUX TRAITEMENTS ; AVEC (A) LA MASSE INDIVIDUELLE TOTALE, (B) LA MASSE DU POOL DE CHAIR HUMIDE (N=15 INDIVIDUS), (C) LA MASSE COQUILLIERE, (D) LA LONGUEUR DE COQUILLE.....	18

Liste des symboles

<i>Symbole</i>	<i>Description</i>	<i>Valeur (si pertinent)</i>	<i>Unité S.I.</i>
°C	Degré Celsius	NA	Degré Celsius
mm	Millimètre (dérivé USI)	NA	Mètre
g	Gramme	NA	Kilogramme

Liste des abréviations

<i>Abréviation</i>	<i>Description</i>
AO	<i>Acidification des océans</i>
AMB	<i>Ambiante</i>
Ca ²⁺	<i>Ion calcium</i>
CaCO ₃	<i>Carbonate de calcium</i>
CO ₂	<i>Dioxyde de carbone</i>
CO ₃ ²⁻	<i>Ion carbonate</i>
EXP. A	<i>Expérience A</i>
EXP. B	<i>Expérience B</i>
EXP. C	<i>Expérience C</i>
GIEC	<i>Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat</i>
H ⁺	<i>Ion hydrogène</i>
H ₂ O	<i>Eau</i>
H ₂ CO ₃	<i>Acide carbonique</i>
HCO ₃ ⁻	<i>Ion bicarbonate</i>
pCO ₂	<i>Pression partielle de dioxyde de carbone</i>
pH NBS	<i>Potentiel hydrogène National Bureau of Standard</i>
pH _T	<i>Potentiel hydrogène total</i>
UE	<i>Unité expérimentale</i>

Liste des annexes

ANNEXE I – EXPÉRIENCE « CHOIX DE L'ALGUE »

ANNEXE II – EXPÉRIENCE « CHOIX DU DÉBIT »

ANNEXE III – EXPÉRIENCE « CHOIX DE LA BIOMASSE »

ANNEXE IV – PLAN DE SALLE DE L'EXPÉRIENCE A

ANNEXE V – SCHÉMA EXPÉRIEMENTALE DE L'EXPÉRIENCE B

ANNEXE VI – PLAN DE SALLE DE L'EXPÉRIENCE B

ANNEXE VII – SCHÉMA EXPÉRIMENTALE DE L'EXPÉRIENCE C

ANNEXE VIII – PLAN DE SALLE DE L'EXPÉRIENCE C

ANNEXE IX – REPRÉSENTATION DES DONNÉES PONCTUELLES DE L'EXP. A

ANNEXE X – REPRÉSENTATION DES DONNÉES PONCTUELLES DE L'EXP. B

ANNEXE XI – REPRÉSENTATION DES DONNÉES EN HAUTE FRÉQUENCE DE L'EXP. B

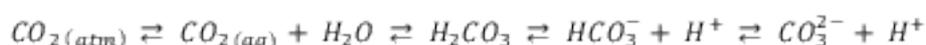
ANNEXE XII – REPRÉSENTATION DES DONNÉES EN HAUTE FREQUENCE DE L'EXP. C

I. Introduction

A. La conchyliculture dans un monde riche en CO₂

La Terre a été témoin de nombreuses variations climatiques naturelles au cours de son histoire, mais actuellement, les écosystèmes subissent un dérèglement sans précédent. Ces changements sont principalement attribuables aux activités humaines, notamment la combustion d'énergies fossiles. Elles ont entraîné une libération massive de dioxyde de carbone (CO₂) dans l'atmosphère, passant d'environ 280 ppm dans les années 1850 à plus de 400 ppm aujourd'hui (NOAA ; Observatoire Mauna Loa, Hawaii).

Chaque année, environ 25 % du CO₂ émis dans l'atmosphère est capté par les océans (Friedlingstein et al., 2022). Les différences de pression partielle de CO₂ (pCO₂) entre les deux environnements entraîne la diffusion passive du CO₂ atmosphérique dans l'océan. Le CO₂ dissous dans l'eau de mer se transforme selon l'équation suivante (Gattuso et Hansson, 2011) :



Ces formes de carbone existent en proportions variables dans l'eau de mer, avec des constantes de dissociation dépendantes du pH. À un pH de 8.1, l'ion bicarbonate (HCO₃⁻) constitue 91 % du carbone inorganique dissous (CID). L'augmentation de la pCO₂ atmosphérique entraîne l'acidification de l'océan (AO) (Feely et al., 2004) . La concentration en ions bicarbonate (HCO₃⁻) et ions H⁺ augmente et entraîne une baisse du pH (par la relation $pH = -\log[H^+]$). Par conséquent, la disponibilité des ions carbonate (CO₃²⁻) diminue.

Selon le scénario d'émission le plus probable (SSP3-7.0; GIEC, 2022), la concentration de CO₂ atmosphérique pourrait atteindre 800 ppm d'ici la fin du siècle, entraînant une baisse moyenne d'environ 0,032 unité de pH en surface. Une diminution de 60% des ions carbonates est alors à prévoir (Orr et al., 2005).

L'élevage des coquillages est désormais confronté à ces chamboulements climatiques. Cependant, l'impact de l'acidification sur la conchyliculture est encore inconnu. De nombreuses études mettent en évidence l'urgence d'agir pour faire face à l'acidification des océans et développer des outils d'anticipation face à ses effets sur la production conchylicole.

B. Effet de l'acidification sur la physiologie des organismes calcifiants

L'acidification des océans est problématique pour les organismes calcifiants possédant un squelette ou une coquille en CaCO_3 , tels que les coraux, les foraminifères, les algues calcaires et les mollusques (Gazeau et al., 2013). La croissance de ces structures calcaires repose sur la calcification ($\text{Ca}^{2+} + \text{CO}_3^{2-} \rightleftharpoons \text{CaCO}_3$) et la disponibilité en ions CO_3^{2-} (cf. figure 1).

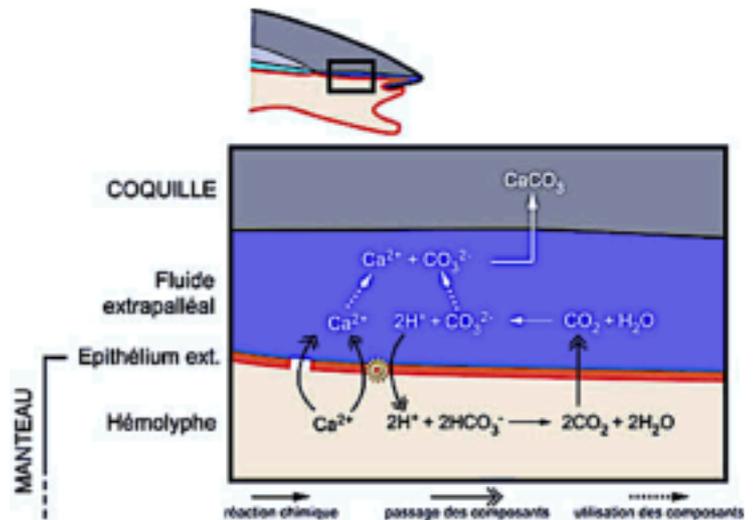


Figure 1. Processus de calcification de la coquille des mollusques (C. E. LAZARETH 2006).

Selon les espèces, leur corps mou est protégé par une coquille composée d'aragonite et de calcite, deux isoformes du carbonate de calcium (Gazeau et al., 2007). La calcification est dépendante des états de saturation (Ω) de ces deux éléments (Ω_{calcite} et $\Omega_{\text{aragonite}}$), eux-mêmes sensibles au pH de l'eau de mer (chap1, Gattuso et Hansson, 2011). Le rapport Ω représente l'état de saturation de l'eau de mer en CaCO_3 . Ω contrôle les processus de précipitation et de dissolution. Une valeur $\Omega > 1$ indique une sursaturation, favorisant la précipitation du CaCO_3 . Lorsque $\Omega < 1$, les eaux deviennent corrosives et entraînent la dissolution de la coquille. Sous des conditions de sous-saturation ($\Omega < 1$), l'organisme compense la dissolution en allouant plus d'énergie à la calcification, au détriment d'autres fonctions physiologiques comme la croissance et la reproduction (Gazeau et al., 2013). Gobler et al. (2014) ont montré qu'une eau à pH 7,5 réduit la croissance de 60% chez des pétoncles et palourdes juvéniles et inhibe la métamorphose de 50%. Welladsen et al. (2010) ont également observé sur l'huître perlière *Pinctada fucata*, une réduction de la résistance de la coquille de 26%, les rendant plus vulnérables à la prédation. Les activités métaboliques essentielles pour les organismes, telles que la respiration et l'ingestion, peuvent également être affectées (Gazeau et al., 2013). L'AO selon sa sévérité, peut induire un stress physiologique qui peut conduire jusqu'à 22% de mortalité chez l'huître creuse *Crassostrea gigas* (Caillon et al., non publié).

Depuis l'Accord de Paris en 2016, les solutions apportées pour réduire l'impact du changement global sur l'océan s'orientent majoritairement vers des mesures d'atténuation, c'est-à-dire la réduction des émissions de gaz à effet de serre, mais en attendant, il est urgent d'envisager des mesures d'adaptation aux changements en cours.

C. Les macroalgues en co-culture pour atténuer et s'adapter à l'acidification des océans

Bien que l'augmentation du CO_2 dissous ait des effets négatifs sur les animaux calcifiants, cela peut profiter aux espèces autotrophes marines. Les producteurs primaires marins contribuent à 50% au piégeage mondiale de l'excès de CO_2 via la photosynthèse (Chung et al., 2011). Les algues peuvent utiliser HCO_3^- comme sources de CID pour le convertir en carbone organique (Surif et Raven, 1989 ; Kubler et Raven, 1994 ; Zou et Gao, 2010 ; Fernández et al., 2014).

De nombreuses recherches ont identifié des cycles diurnes du pH de l'eau de mer environnante à une végétation macroalgale. La photosynthèse (jours) et la respiration (jours + nuits) conduisent à une amplitude de 1,2 à 1,5 unité pH, en fonction de la densité algale (Duarte et al., 2005 ; Middelboe et Hansen, 2007 ; Wahl et al., 2018). En milieu naturel, ces fluctuations du pH sont modulées par la répartition spatiale des algues (ex. bassines, lagunes et baies), leur densité (ex. forêt d'algue) et influencée par des facteurs environnementaux, tels que l'hydrologie de l'habitat (marée, courant) et la saisonnalité. Par exemple, les zones côtières, peu profondes connaissent des élévations du pH plus forte (Middelboe et Hansen, 2007 ; Hurd 2015). Un exemple de ce phénomène en milieu contrôlé et fermé a été testé sur *Saccharina latissima* par Young et al. (2022). Le jour, les niveaux de pH ont augmenté d'environ 0,4 unité pH, atteignant un maximum d'environ 8,8 au bout de 7 jours ($\text{pH}_{\text{initial}}=7,2$).

Les macroalgues, grâce à leur capacité à influencer la chimie de l'eau environnante, sont des candidates prometteuses en tant que refuges chimiques potentiels pour les organismes calcifiants (cf. figure 2). Wahl et al. (2018) ont montré que la moule *Mytilus edulis*, grâce à l'augmentation de pH pendant le jour, était capable de maintenir son taux de calcification normal (condition témoin). De plus, les moules ont profité d'un refuge temporel en déplaçant leur processus de calcification pendant les périodes diurnes, à pH élevé. D'après les expériences de Young et al. (2022) et Gobler et al. (2018), la croissance des huîtres, placées en milieu acidifiés et fermé, augmente de 50% et 20% en présence de *Saccharina* et *Ulva*, respectivement. Elles sont désormais considérées comme des outils d'atténuation au changement climatique (Duarte et al., 2017).

Au sein de la filière conchylicole, scientifiques et producteurs (Culture d'algues et conchyliculture en Normandie ; Étude de l'environnement de la culture de PORPHYRA) s'accordent à dire que le système de co-culture (ex. sur tables ostréicoles) peut apporter, par la diversification des espèces élevées, des avantages importants. En plus d'accroître le potentiel de culture des macroalgues à grande échelle (29% des produits de l'aquaculture

mondiale en milieu marin avec 35,1 millions de tonnes en 2020) (FAO, 2022), cela pourrait favoriser le développement précoce et la croissance des mollusques d'élevage tout en contrant les effets néfastes de l'acidification des océans.

D. Objectif du projet de master

Le sujet d'étude s'inscrit dans le projet FEAMPA Coco rCO₂, dont un des axes vise à évaluer des techniques de végétalisation pour limiter les effets de l'acidification.

L'objectif de ce stage est d'évaluer le bénéfice du partenariat macroalgues/bivalves pour remédier aux effets de l'acidification des océans sur l'huître creuse *Crassostrea gigas*. Le stage a été conçu avec deux sous-objectifs. Le premier visait à analyser l'influence des macroalgues sur les paramètres physico-chimiques de l'eau de mer. Ensuite, le second objectif était d'étudier les effets des macroalgues sur la réponse physiologique de l'huître creuse confrontée à l'acidification. Trois hypothèses ont été avancées : (1) L'activité métabolique des macroalgues provoque des changements de pH en fonction de la biomasse, de l'espèce et du débit ; (2) Ces fluctuations de pH favorisent la croissance de *C. gigas* en milieu acidifié ; (3) Les effets de ces variations de pH sur la croissance augmentent avec la biomasse algale.

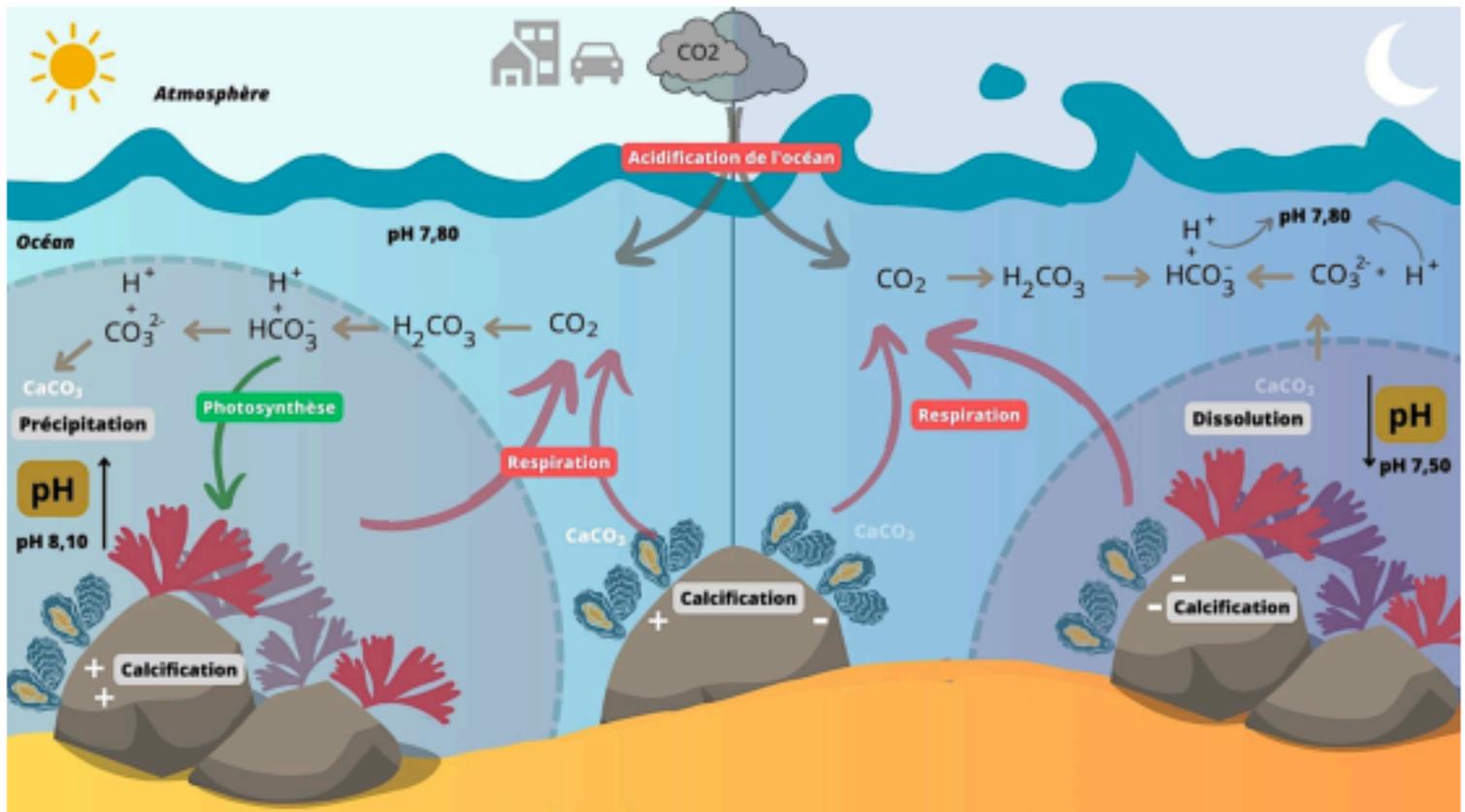


Figure 2. Schéma de synthèse du potentiel des macroalgues à créer des refuges pour les organismes calcifiants (ici huîtres) contre l'acidification de l'océan. Le phénomène est représenté le jour (à gauche) et la nuit (à droite). Les valeurs de pH sont tirées des expériences réalisées par Wahl et al. (2018)

II. Matériel et méthodes

A. Choix du matériel biologique et maintenance

1. Le matériel biologique animal

Les huîtres creuses du Pacifique *Crassostrea gigas* (Thunberg, 1793) ont été produites dans des conditions contrôlées (Petton et al., 2015). Le NSI (Naissain Standardisé Ifremer) est issu d'une reproduction massive de 106 animaux géniteurs (sex-ratio = 0.19 MF), initialement captés en Charente Maritime (Marennes-Oléron, France; 46°0'43"N, 1°7'3'O) entre 2012 et 2020 et stockés à l'Aber Benoit (Nord de la Bretagne, France; 48°34'30"N, 4°36'18"O). En juillet 2022, les géniteurs ont été transférés à la station marine de l'Ifremer située à Argenton (Bretagne, France ; 48°31'16"N, 4°46'2"O, France) dans des bassins à flux ouvert de 500 L à 17°C et alimentés *ad libitum* pendant 6 semaines. Les gamètes ont été prélevés et fécondés le 16 août 2022 (Petton, Boudry et al., 2015). Âgés de 45 jours, les naissains ont ensuite été transférés à la station marine de l'Ifremer située à Bouin (France) pour poursuivre la phase de grossissement dans des conditions d'alimentation optimisée (ajout de microalgues *Skeletonema marinoi*) et de température du milieu naturel. Le 29/03/2023, environ 2 000 NSI de la cohorte ont été transférés sur le site d'Argenton pour l'expérimentation.

Avant l'expérience, les huîtres étaient maintenues à 15 °C dans des bassins à flux ouvert de 500 L, alimentés en eau de mer filtrée à 5 µm et exposés à l'irradiation UV. Les animaux étaient nourris *ad libitum* avec un mélange de deux espèces de phytoplancton, la diatomée *Chaetoceros muelleri* (CCAP 1010/3) et la *Prymnesiophyceae Tisochrysis lutea* (CCAP 927/14; 1:1 en poids sec). La concentration des aliments a été mesurée quotidiennement à l'aide d'un compteur à particules électroniques (Coulter Multisizer 3) équipé d'un tube d'ouverture de 100 µm et maintenu à environ 1 500 µm³/µl dans de l'eau de mer à la sortie des bassins. La température (15°C), la salinité (34–35 g/L), le pH_{NBS} et l'oxygène ont été contrôlés quotidiennement avec les sondes WTW xi310 1, cond340, pH 3310 et FDO 925, respectivement (Fisher scientific, Illkirch-Graffenstaden, France).

2. Le matériel biologique végétal

Des algues ont été récoltées le 3 avril 2023, le 5 juin 2023 et le 2 juillet 2023 à la presqu'île du vivier à Argenton alors que la température de l'eau de mer était d'environ 11°C, 15°C et 16°C. Nous avons récupéré l'algue verte *Ulva* sp. (Hayden, 2003), l'algue brune *Saccharina latissima* (C.E. Lane, C. Mayes, Druehl & G.W. Saunders, 2006) et l'algue rouge *Palmaria palmata* (Weber & Mohr, 1805). Bien que *S. latissima* et *P. palmata* soient des

espèces facilement identifiables visuellement, ce n'est pas le cas des espèces du genre *Ulva* qui présentent plusieurs phénotypes et nécessitent un séquençage de l'ADN. Comme nous n'avons effectué aucune analyse moléculaire, l'identification de l'ulve est limitée au genre *sp.*

Les algues rouges et vertes prospèrent sur l'étage médio-littoral de la zone intertidale tandis que les algues brunes proviennent du niveau infra-littoral. Les espèces d'algues rouges (*Porphyra* et *Palmaria*) et vertes coexistent naturellement avec les huîtres, tandis que les espèces d'algues brune (*Laminaria* et *Saccharina*) se trouvent à proximité, dans des zones plus profondes. Ces algues ont été sélectionnées en raison de leur capacité à être cultivées dans des conditions similaires à celles des huîtres en termes de température, de pH et de salinité. En outre, des études antérieures mettent en évidence que parmi les algues vertes et rouges, *Ulva* et les espèces *Porphyra* et *P. palmata* présentent une efficacité photosynthétique supérieure (Chung et al., 2011). L'algue *P. palmata* s'est avérée être la plus efficace pour augmenter le pH de l'eau en conditions expérimentales (cf. Annexe I). Elle a été sélectionnée comme sujet d'expérimentation pour la co-culture.

Elles ont été collectées à pied durant les marées de vives eaux et maintenues vivantes pendant toute la durée de l'expérience. Les thalles les plus pigmentés et non reproductifs ont été coupés au plus proche du crampon. Toutes les algues sont ensuite nettoyées et placées en quarantaine. Avant l'expérimentation, elles subissent une augmentation de la température (0,5 °C/jour) pour atteindre la température des conditions expérimentales (15°C) dans un bassin à flux ouvert de 500 L. Notre étude ne nécessitait pas d'approbation éthique.

B. Designs expérimentaux

1. Expérience de co-culture (A)

L'eau de mer était acidifiée par une injection de CO₂ gazeux dans deux colonnes (cf. figure 3 ; niveau 1), contrôlée par un régulateur de pH (ProFlora[®] u403 JBL, Ludwigshafen, Allemagne) activant une électrovanne. Ce régulateur était connecté à une sonde de pH (pH-sensor Cal+, JBL), préalablement calibrée à l'aide de deux solutions tampons Certipur[®] Merck (pH de 4,0 et 7,0), mesurant le pH dans les deux colonnes d'eau. La dissolution du CO₂ dans l'eau de mer des colonnes était assurée par un réacteur à bulle (Taifun M JBL[®] Ludwigshafen, Allemagne). Une colonne d'eau a été conservée pour les conditions de pH ambiant.

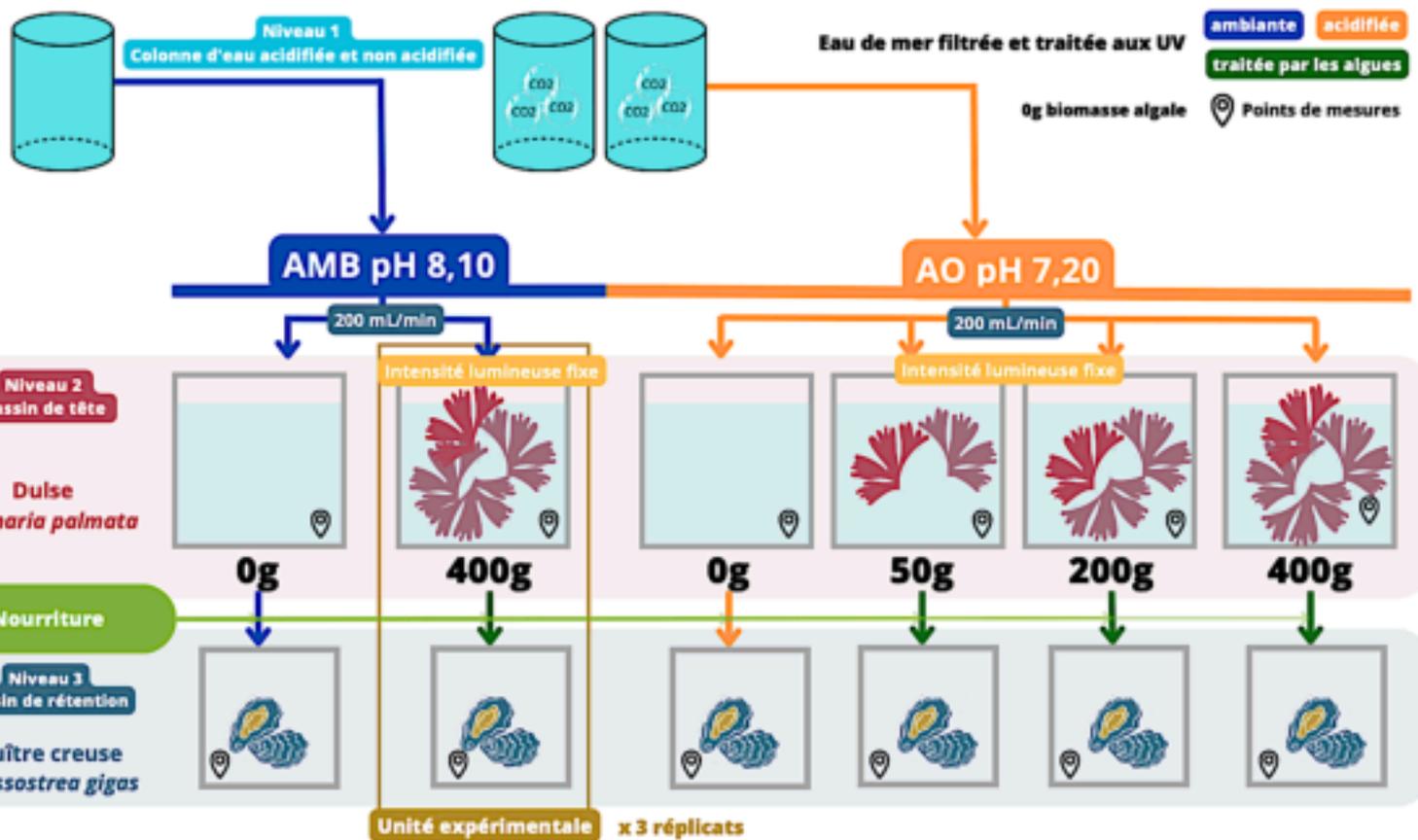


Figure 3. Représentation schématique du plan expérimental de l'expérience A. Un seul réplica sur trois est représenté. Les flèches indiquent la direction de l'écoulement de l'eau. Chaque unité expérimentale consiste en un bassin de tête contenant des algues et un bassin de rétention contenant les huîtres.

L'eau de mer non acidifiée et acidifiée a été ensuite répartie uniformément dans 6 et 12 unités expérimentales, respectivement, chacune consistant en un bassin de tête contenant les algues (cf. figure 3 ; niveau 2) ou laissée vide comme témoin relié à un bassin de rétention contenant les huîtres (cf. figure 3 ; niveau 3). Chaque unité expérimentale (UE) a été répliquée trois fois et répartie sur deux blocs pour la condition acidifiée et un bloc pour la condition ambiante (plan de salle ; cf Annexe IV). Le débit d'eau de mer a été fixé à un débit optimal de 200 mL/min^{-1} à l'entrée de chaque UE (cf. Annexe II). Tous les bassins étaient de 45 L ($60 \times 40 \times 19 \text{ cm}$) et éclairés à une intensité de $80 \mu\text{mol photons.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ par des LED (EHEIM powerLED+), couvrant tout le spectre de la lumière du soleil pour soutenir la croissance des algues. La durée d'éclairage a été réglée à 14 heures de lumière et 10 heures d'obscurité pour imiter les conditions naturelles. Des pompes d'homogénéisation (3W) étaient également positionnées dans les bassins d'algues et d'huîtres afin d'assurer le mélange d'eau. Les aquariums sont vidés et les parois sont nettoyées, à une fréquence de 1 fois par semaine, pour retirer l'encrassement des algues et les fèces des huîtres.

L'eau de mer circulait du bassin de tête vers le bassin receveur contenant les huîtres grâce à une pompe de transfert (Proflow[®] u500 JBL Ludwigshafen, Allemagne) réglée à un débit de 200 mL/min¹. Chaque bassin receveur était relié à l'approvisionnement alimentaire par des tubes flexibles. L'apport de phytoplancton était assuré par une pompe péristaltique (Ismatec[®] de 20W, Suisse) en amont du bassin receveur. L'eau de mer a été échantillonnée quotidiennement à l'entrée et à la sortie de chaque bassin receveur pour déterminer la consommation de phytoplancton à l'aide du compteur de particules électronique.

Les algues et les huîtres ont été placées dans les bassins de tête et des bassins de rétention, respectivement, le 6 avril 2023 (cf. figure 3). Les macroalgues sont exposées à 2 conditions de pH maintenues constantes : pH ambiant à 8,15 (AMB ; n=6) ou acidifié 7,20 (AO ; n=12). Les UE en condition acidifiée contiennent différentes biomasses algales : 50g, 200g et une biomasse optimale de 400g (cf. Annexe III). Pour des raisons logistiques, nous choisissons d'exposer les huîtres en condition de pH ambiant seulement à la biomasse d'algue optimale. Le plan d'expérience est de type « factoriel réduit », c'est-à-dire que toutes les combinaisons possibles ne sont pas testées. La biomasse des huîtres, âgées de 7 mois, était en moyenne de 90,05 g ± 0,24 g dans chaque bassin, ce qui correspond à 75 individus. Chaque lot d'huître a été alloué aléatoirement à une unité expérimentale. L'expérience a duré 29 jours jusqu'au 2 mai 2023.

2. Expérience de co-culture en cohabitation directe (B)

Un système expérimental en flux ouvert à 2 niveaux a été utilisé (cf. annexe V). Les huîtres sont placées en cohabitation dans les bassins avec les algues. Ce plan expérimental s'inspire de système de co-culture dans lequel les algues poussent dans les structures d'élevage des huîtres. De manière similaire à la méthode précédente, les deux types d'eau de mer, acidifiée et non acidifiée, ont été répartis de manière uniforme dans 12 et 4 unités expérimentales respectivement. Les unités expérimentales avec de l'eau acidifiée comprenaient trois traitements distincts : un contrôle avec seulement des algues, une co-culture d'huîtres et d'algues, ainsi qu'un contrôle avec seulement des huîtres (cf. annexe V ; niveau 2). En raison de limitations matérielles, la condition de végétalisation en milieu non acidifié n'a pas été incluse dans l'expérience. Chaque traitement a été répliqué quatre fois et positionné selon le plan de salle en annexe VI.

Le 7 juin 2023, les algues et les huîtres ont été placées dans les bassins, soit individuellement soit en cohabitation, et soumises à deux conditions de pH maintenues constantes, similaires à l'expérience précédente. Chaque unité expérimentale avec végétalisation contenait 200 g d'algues. Les huîtres juvéniles âgées de 9 mois ont été divisées

en 12 lots de $90,05 \text{ g} \pm 0,24 \text{ g}$, correspondant à 40 individus chacun. Chaque lot d'huîtres a été attribué de manière aléatoire à une unité expérimentale. L'eau de mer entrante a été acheminée à un débit de $200 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$ et à une température de 16°C . Toutes les unités expérimentales ont été soumises à une photopériode de 16 heures de lumière et 8 heures d'obscurité, reproduisant les conditions naturelles. L'expérience s'est poursuivie pendant 22 jours, jusqu'au 28 juin 2023.

3. Expérience de co-culture avec trois algues (C)

Le système expérimental est identique à l'expérience B (cf. Annexe VII). Cette expérience permet d'identifier les effets de trois espèces d'algue, *Palmaria palmata*, *Ulva* sp. et *Saccharina latissima*, sur la croissance des huîtres en condition acidifiée. L'eau de mer acidifiée a été réparties de manière homogène dans 16 unités expérimentales. Chaque unité expérimentale était constituée d'un bassin où algues et huîtres cohabitaient ou d'un bassin témoin avec les huîtres seules. Chaque traitement a été répétée quatre fois et positionné selon le plan de salle en Annexe VII. Les algues et les huîtres ont été placées dans les bassins le 2 juillet 2023. Ils sont exposés à une condition de pH maintenues constantes, 7,10 ($n=16$). Chaque UE végétalisée contenait une biomasse algale fixe de 200 g. Les huîtres NSI âgés de 7 mois ont été réparties en 16 lots de biomasse de $90,06 \text{ g} \pm 0,25 \text{ g}$, avec un nombre d'individus équivalents de 70 individus. Chaque lot d'huître a été alloué aléatoirement à une unité expérimentale. Le débit, la température et la photopériode sont identiques à l'expérience B. L'expérience a duré 21 jours jusqu'au 25 juillet 2023.

C. Mesure des paramètres physico-chimiques de l'eau de mer

Le pH total (pH_T) de l'eau de mer, la température, la saturation en oxygène dissous et la salinité ont été mesurés une fois par jour après 7h de lumière dans tous les bassins à l'aide d'une sonde multiparamétrique portable (MultiLine® Multi 3630 IDS - WTW : électrode de pH SenTix® 940, sonde d'oxygène FDO® 925, électrode de conductivité TetraCon® 925 ; Xylem Analytics, Weilheim in Oberbayern, Allemagne). Des sondes multiparamètres ont été placées sur plusieurs cycles de 24h en enregistrement toutes les 15min dans les différents traitements afin d'obtenir des suivis temporels du pH à haute fréquence.

La précision de l'électrode de pH a été vérifiée une fois par semaine avec des tampons Certipur® NBS (pH 4,0, 7,0 et 9,0 ; Merck, Darmstadt, Allemagne) et étalonné sur l'échelle totale (pH_T) avec un tampon certifié Tris/HCl à une salinité de 35,0 (fourni par A. G. Dickson, Scripps Institution of Oceanography, San Diego, États-Unis). Des échantillons d'eau de mer

(150 ml) ont été prélevés trois fois au cours de l'expérience A et B pour des analyses d'alcalinité totale (AT). L'eau de mer a été filtrée à travers des filtres en microfibre de verre GF/F de 0,7 μm (Whatman®, Florham Park, États-Unis) et immédiatement empoisonnée avec une solution saturée de chlorure mercurique à 0,05% avant le stockage. L'AT a été mesurée à l'Institut de la mer (Villefranche-sur-Mer, Alpes-Maritimes, France).

D. Mesures biométriques

La masse corporelle moyenne totale (coquille + tissu), la longueur et la masse de la coquille, et la masse humide moyenne de chair ont été mesurées individuellement sur un sous-échantillon de 15-30 huîtres au début et à la fin de chaque expérience dans chaque bassin.

E. Analyse statistique des résultats

Les tests statistiques ont tous été réalisés avec le logiciel *Rstudio*. Le logiciel R v.4.2.2, avec les progiciels « lme », ont été utilisés pour toutes les analyses ANOVA. La normalité des résidus a été vérifiée grâce à des diagnostics graphiques et le test de normalité de Shapiro-Wilk.

Le modèle mixte linéaire général (GLMM) a été utilisé afin d'évaluer l'effet des conditions sur les paramètres physico-chimiques de l'eau de mer et sur les paramètres biométriques des huîtres. Le bassin a été considéré comme une variable aléatoire. Nous avons assumé que les variables dépendantes (ex. pH) peuvent aléatoirement varier entre les bassins, et notre intention était d'intégrer cette variabilité dans notre modèle. Ceci représente une méthodologie statistique puissante qui intègre à la fois les effets constants (le traitement) et les effets aléatoires (le bassin). La méthode utilisée pour estimer les paramètres du modèle est le Maximum de Vraisemblance Restreint (REML). Cette méthode permet une estimation plus précise des paramètres lorsqu'il y a des effets aléatoires dans le modèle. Une analyse de variance (ANOVA) à un facteur a été employé pour évaluer la significativité du modèle. Elle permet de tester si le facteur "Traitement" a un effet significatif sur les variables dépendantes. Pour finir, le test « emmeans », avec un seuil de significativité de $\alpha = 0,05$, calcule les moyennes estimées pour chaque niveau du facteur « Traitement ». Toutes les données sont représentées sous forme de moyennes \pm SE. Nous utilisons l'argument « pairwise » afin d'effectuer des comparaisons multiples entre les niveaux du facteur. Les résultats ont fourni les comparaisons deux à deux entre les traitements, ainsi que leurs différences estimées et les intervalles de confiance. Les graphiques ont été effectués avec le progiciel « ggplot2 ». Toutes les variables descriptives chimiques et biologiques ont été représentées graphiquement par rapport au temps et aux traitements. Les barres d'erreur sont les erreurs standards SE, représentant la variabilité entre les bassins.

III. Résultats

A. Résultats de l'expérience A

1. Effet de la végétalisation sur le pH de l'eau de mer

Les pH_T de l'eau de mer sur la période expérimentale pour chaque traitement sont résumés dans la figure 4. Il n'y avait pas de différence de température ($16,04^\circ\text{C} \pm 0,14$, $p = 0,312$), et de salinité ($34,76 \text{ psu} \pm 0,08$, $p = 0,2977$) entre les traitements. Le pH en condition AO était en moyenne de $7,244 \pm 0,04$ et stable pendant les 29 jours d'exposition (cf. figure 4 et Annexe IX ; $p < 0,0001$).

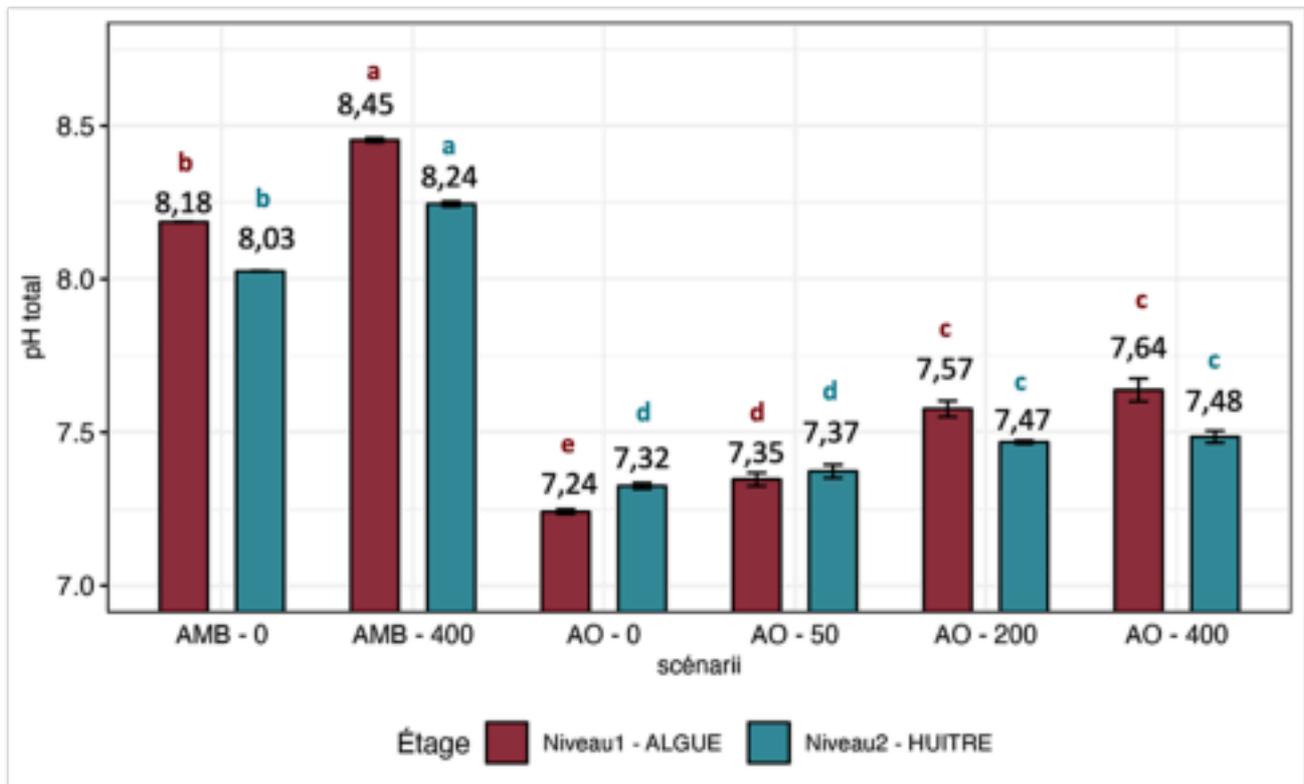


Figure 4. Représentation du pH_T moyen par traitement : AMB et AO en fonction de la biomasse et par niveau : 1 (rouge ; à gauche) et 2 (bleu ; à droite). Les valeurs affichées sont les pH_T moyens associés. Des lettres distinctes indiquent des différences significatives par niveau à $p < 0,001$.

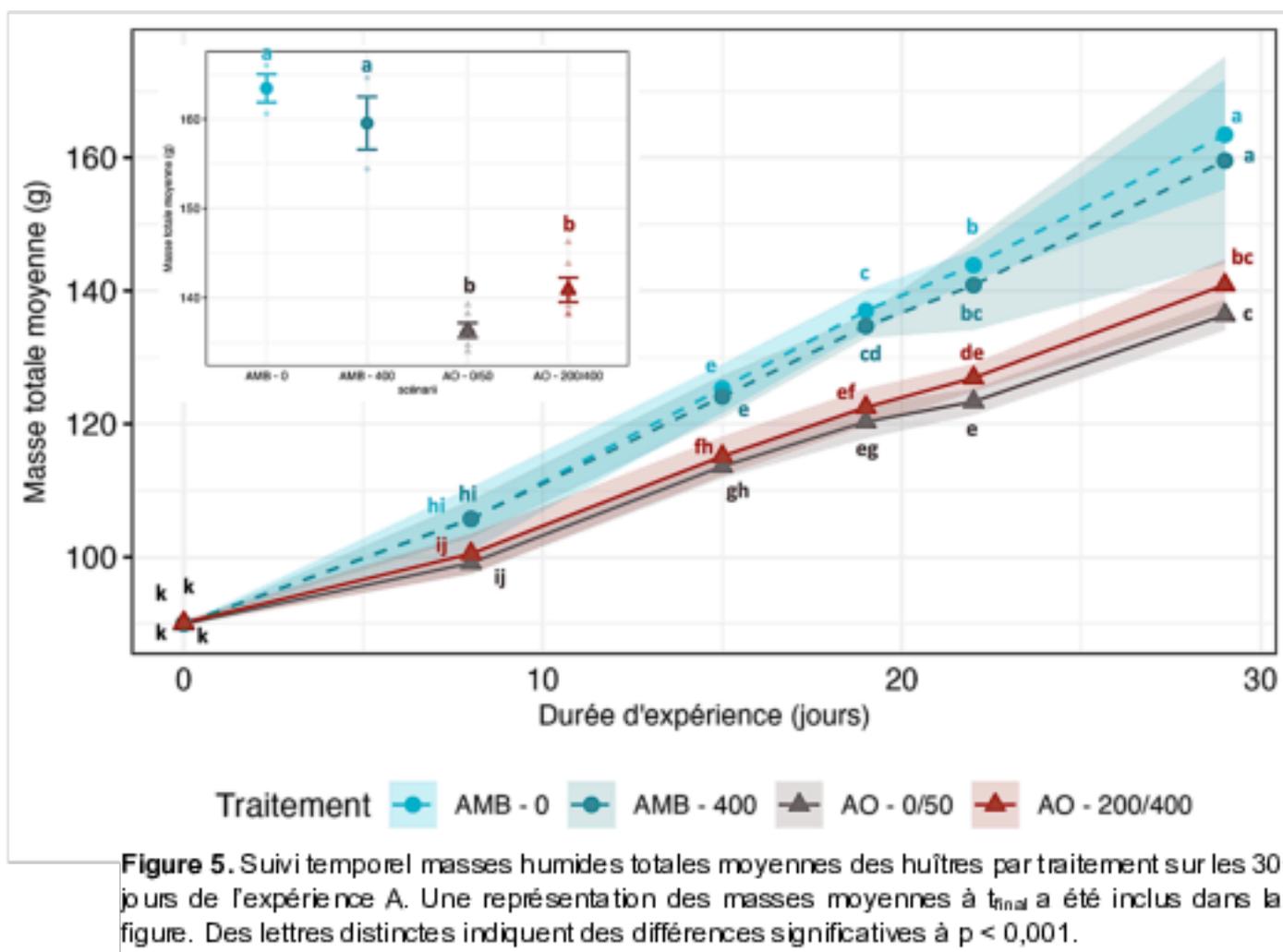
Au niveau 1 (cf. figure 4 ; en rouge), le pH_T est différent significativement entre les traitements (ANOVA Traitement ; $p < 0,0001$), à l'exception des traitements à biomasse 200g et 400g ($p = 0,19$). Les résultats ont montré que les algues en condition AMB remontent significativement le pH de 0,26 unité par rapport à la condition sans algue ($p < 0,0001$). En

condition AO, une biomasse de 50g, 200g et 400g augmente significativement le pH de 0,11, 0,33 et 0,40, respectivement, par rapport au traitement sans algue.

Au niveau 2 (cf. figure 4 ; en bleu), aucune différence significative n'a été observée entre les traitements sans algue et avec 50 g d'algue ($p = 0,18$). De même, aucune différence significative n'a été constatée entre le traitement avec 200 g d'algue et celui avec 400 g d'algue ($p = 0,86$). Par conséquent, les huîtres ont été soumises à des traitements identiques. Les 4 traitements peuvent être regroupés par pH_T en deux catégories : AO-0_50 (pH_T moyen = $7,35 \pm 0,02$) et AO-200_400 (pH_T moyen = $7,47 \pm 0,03$).

2. Effet de la végétalisation sur la croissance des huîtres

Durant la période d'expérimentation, en conditions AMB et AO, l'introduction de la végétalisation n'a pas eu d'effet discernable sur la croissance des huîtres juvéniles (ANOVA mixte à deux facteurs "Traitement" et "Durée d'expérience").



À la suite de 29 jours d'expérimentation (cf. figure 5), en condition acidifiée, une augmentation non significative de 4% été constatée entre le traitement « avec algue » (AO-200_400 ; masse moyenne = 141 g) et le traitement « sans algue » (AO-0_50 ; masse moyenne = 136 g) ($p = 0,11$). Aucune distinction significative n'a été décelée dans les masses et les longueurs moyennes de coquille, les masses individuelles moyennes, ainsi que les masses moyennes de chair humide.

B. Résultats de l'expérience B

1. Effet de la végétalisation sur le pH de l'eau de mer

Les pH_T de l'eau de mer sur la période expérimentale pour chaque traitement sont résumés dans la figure 6. Il n'y avait pas de différence de température ($17,39^\circ\text{C} \pm 0,40$, $p = 0,1072$), et de salinité ($35,58 \text{ psu} \pm 0,05$, $p = 0,2553$) entre les traitements. Le pH_T en condition AO était en moyenne de $7,18 \pm 0,03$ et stable pendant les 21 jours d'exposition (cf. figure 6A ; $p < 0,0001$).

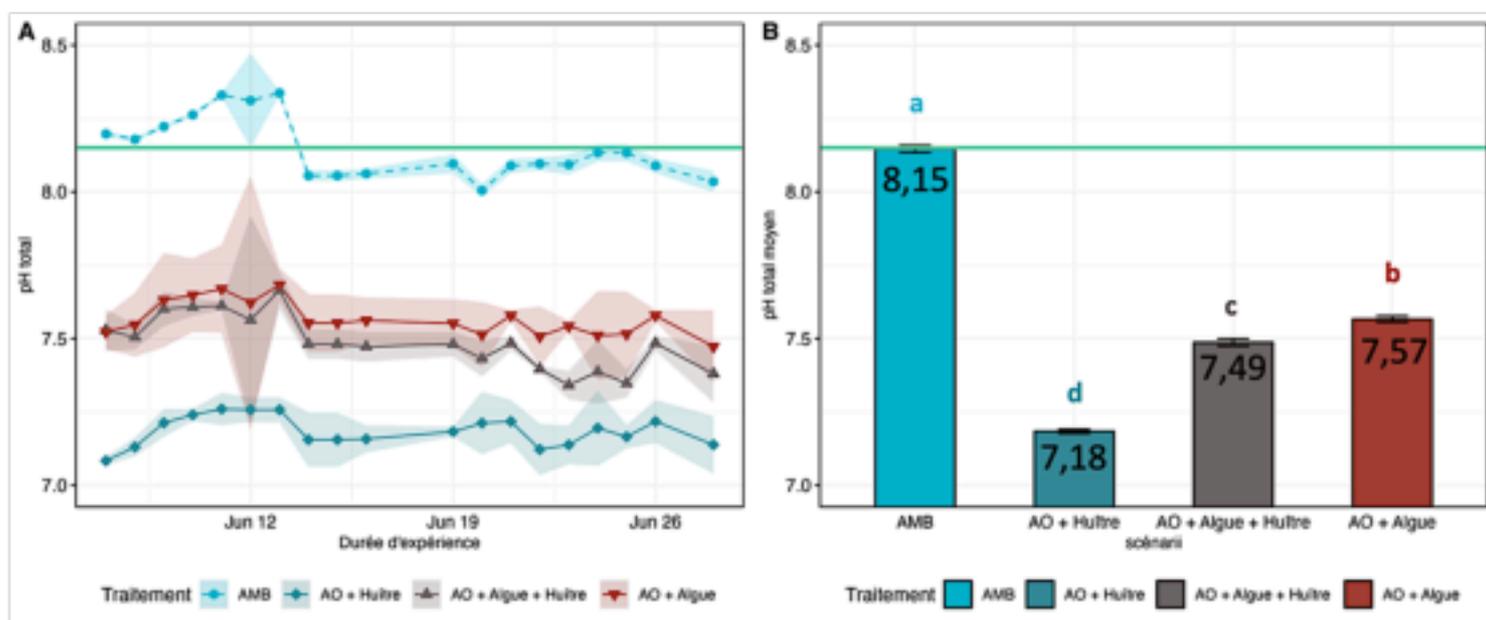


Figure 6. Suivi temporel du pH_T par traitement pendant 21 jours d'expérience (A) et représentation du pH_T moyen par traitement sur la durée expérimentale (B). Les valeurs affichées sont les pH_T moyens associés. Une ligne verte a été tracée pour représenter le pH_T en condition sans algue, $pH_T = 8,15$. Des lettres distinctes indiquent des différences significatives à $p < 0,001$.

Selon la figure 6B, le pH_T était significativement plus élevé de 0,39 et 0,31, dans les traitements végétalisés par rapport au traitement sans algues (ANOVA "Traitement"; $p < 0,0001$, $p < 0,0001$). De plus, les traitements végétalisés différaient significativement ($p =$

0,0076). Dans un bassin de co-culture, une amplitude jour/nuit de 0,45 unité pH a été observé sur les données hautes fréquences (cf. Annexe XI).

2. Effet de la végétalisation sur la croissance des huîtres

À partir du jour 6 et 9 (cf. figure 7), l'effet de l'acidification et de la végétalisation sont significatif par rapport aux contrôles (ANOVA mixte à deux facteur « Traitement » et « Durée d'expérience » ; $p < 0,0001$; $p = 0,004$).

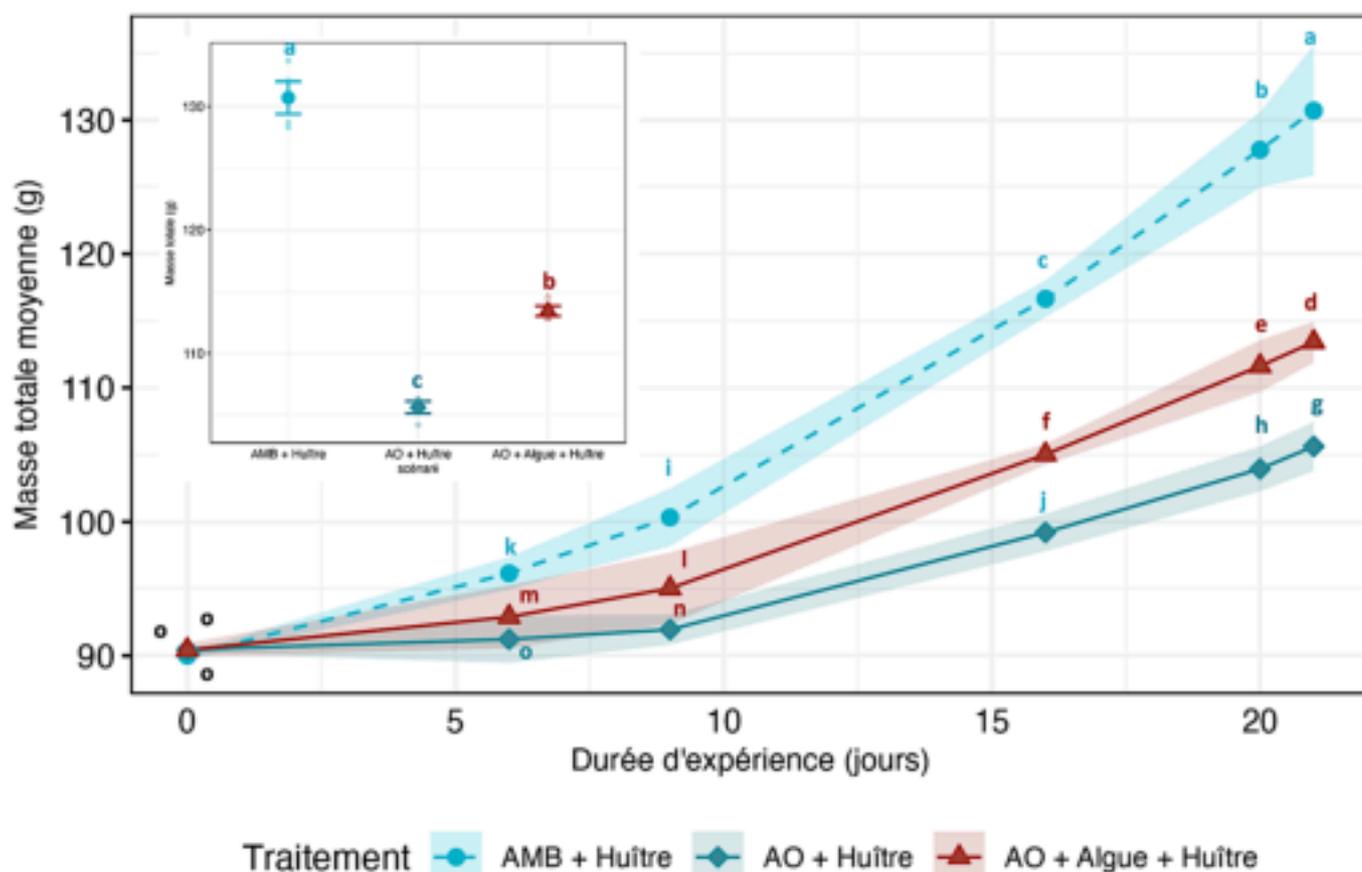


Figure 7. Suivi temporel des masses humides totales moyennes des huîtres par traitement sur les 22 jours de l'expérience B. Une représentation des masses moyennes à t_{final} a été inclus dans la figure. Des lettres distinctes indiquent des différences significatives à $p < 0,001$.

Après une exposition de 22 jours (cf. figure 7) à un milieu acidifié (AO+Huître ; masse moyenne = 106g), la masse humide des huîtres diminue significativement (Anova « Traitement » ; $p < 0,0001$) de 16% par rapport au milieu ambiant (AMB+Huître ; masse moyenne = 131g). Dans un milieu acidifié et végétalisé (AO+Algues+Huître ; masse moyenne = 113g), la masse humide moyenne est significativement plus élevée de 7% ($p = 0,0003$) comparé à la condition acidifiée dépourvue d'algues.

Les résultats des paramètres biométriques (cf. figure 8) reflètent les observations concernant la masse totale moyenne humide. Lorsque nous considérons la masse de chair sèche, aucune différence significative n'a été mise en évidence entre les traitements (Anova "Traitement"; pvalue = 0,1160). Cependant, la végétalisation en environnement acidifié permet de se différencier significativement, en augmentant la masse individuelle moyenne de 7% (cf. figure 8D), la masse coquillière de 7,5% (cf. figure 8A) ainsi que la longueur de coquille de 4,6% (cf. figure 8B).

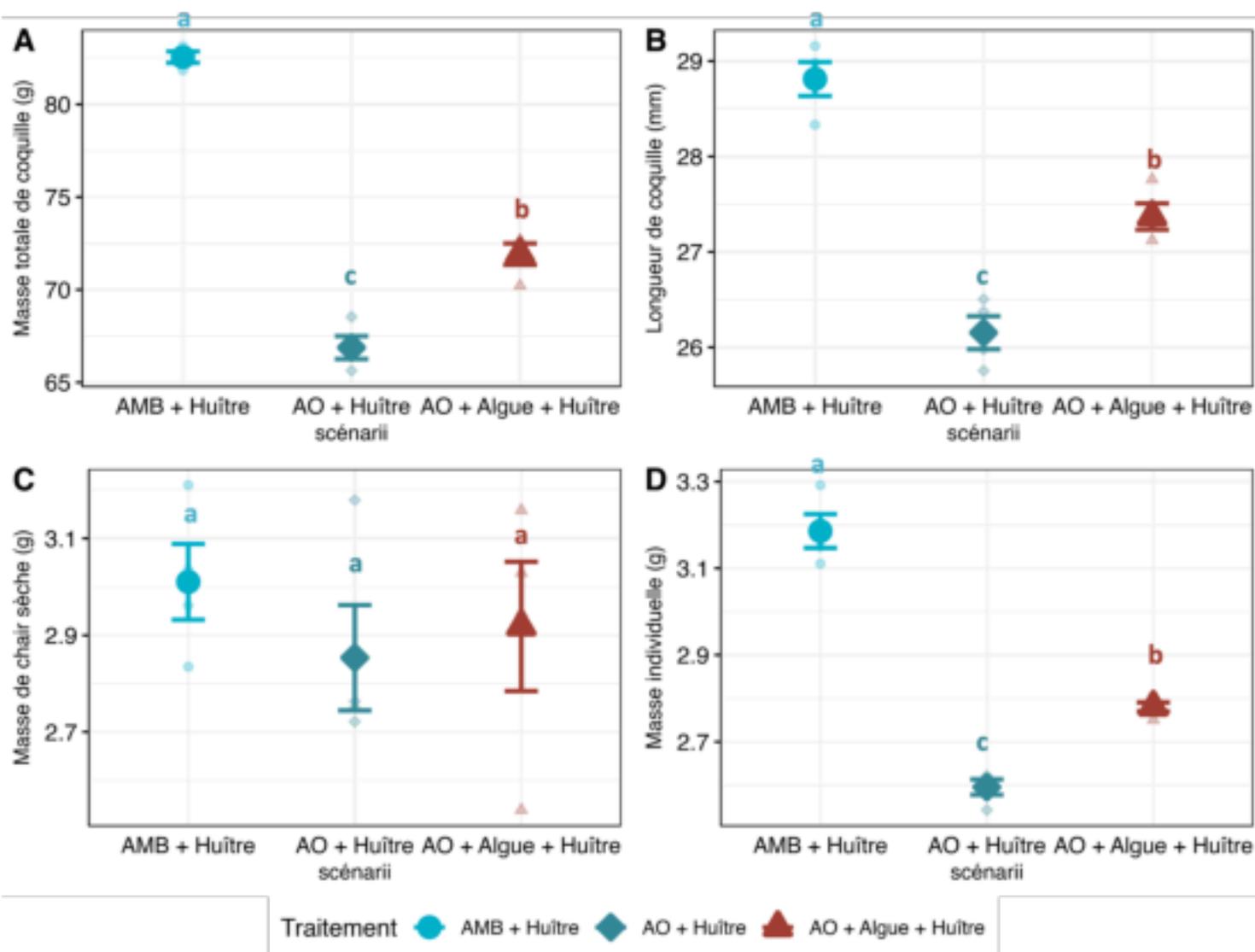


Figure 8. Relations des masses, longueurs de *Crassostrea gigas* par rapport aux traitements ; a vec (A) la masse coquillière, (B) la longueur coquillière, (C) la masse du pool de chair humide (n=40 individus), (D) la masse individuelle totale. Chaque point est la moyenne de 40 individus prélevés pour chaque condition, à l'exception du pool de chair humide. Des lettres distinctes indiquent des différences significatives à $p < 0,001$.

C. Résultat de l'expérience C

1. Effet de la végétalisation sur le pH de l'eau de mer

Les pH_T de l'eau de mer sur la période expérimentale pour chaque traitement sont résumés dans la figure 9. Il n'y avait pas de différence de température ($16,63^\circ\text{C} \pm 0,18$, $p = 0,0336$), et de salinité ($35,70 \text{ psu} \pm 0,04$, $p = 0,5506$) entre les traitements. Le pH en condition AO était en moyenne de $7,09 \pm 0,07$ et stable pendant les 22 jours d'exposition (cf. figure 9A ; $p < 0,0001$).

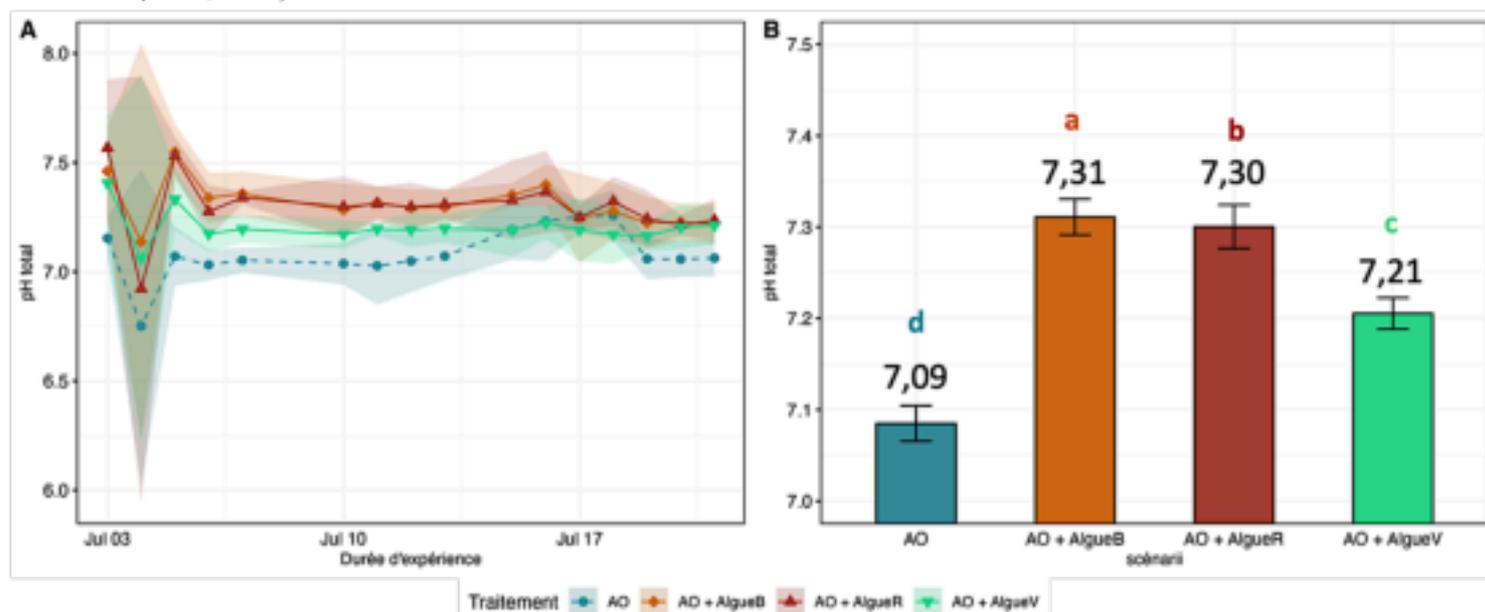


Figure 9. Suivi temporel du pH_T par traitement pendant 22 jours d'expérience (A) et représentation du pH_T moyen par traitement sur la durée expérimentale (B). Les valeurs affichées sont les pH_T moyens associés. Une ligne verte a été tracé pour représenter le pH_T en condition sans algue, $pH_T = 8,15$. Des lettres distinctes indiquent des différences significatives à $p < 0,001$.

Selon la figure 9B, les traitements végétalisés augmentent significativement le pH de 0,22, 0,21 et 0,12 unité dans les bassins avec algue brune, rouge et verte, respectivement, par rapport au traitement sans algue (ANOVA unidirectionnelle "Algue", valeur $p < 0,0001$).

Au jour 3 de l'expérience, un dysfonctionnement du système d'acidification a entraîné une forte baisse du pH dans 6 bassins d'une étagère. Cette perturbation a persisté pendant plus de 24 heures et a provoqué une diminution de la croissance dans le groupe témoin et celui avec *Palmaria*, entraînant un biais dans l'analyse. Afin de minimiser l'effet de ce dysfonctionnement, les bassins touchés par la période de forte acidification ont été exclus des analyses de croissance ainsi que des représentations graphiques.

2. Effet de la végétalisation sur la croissance des huîtres

À partir du 14^{ème} jour (cf. figure 10), l'effet de la végétalisation est significatif sur les masses humides des huîtres (ANOVA mixte à deux facteur; $p = 0,0450$).

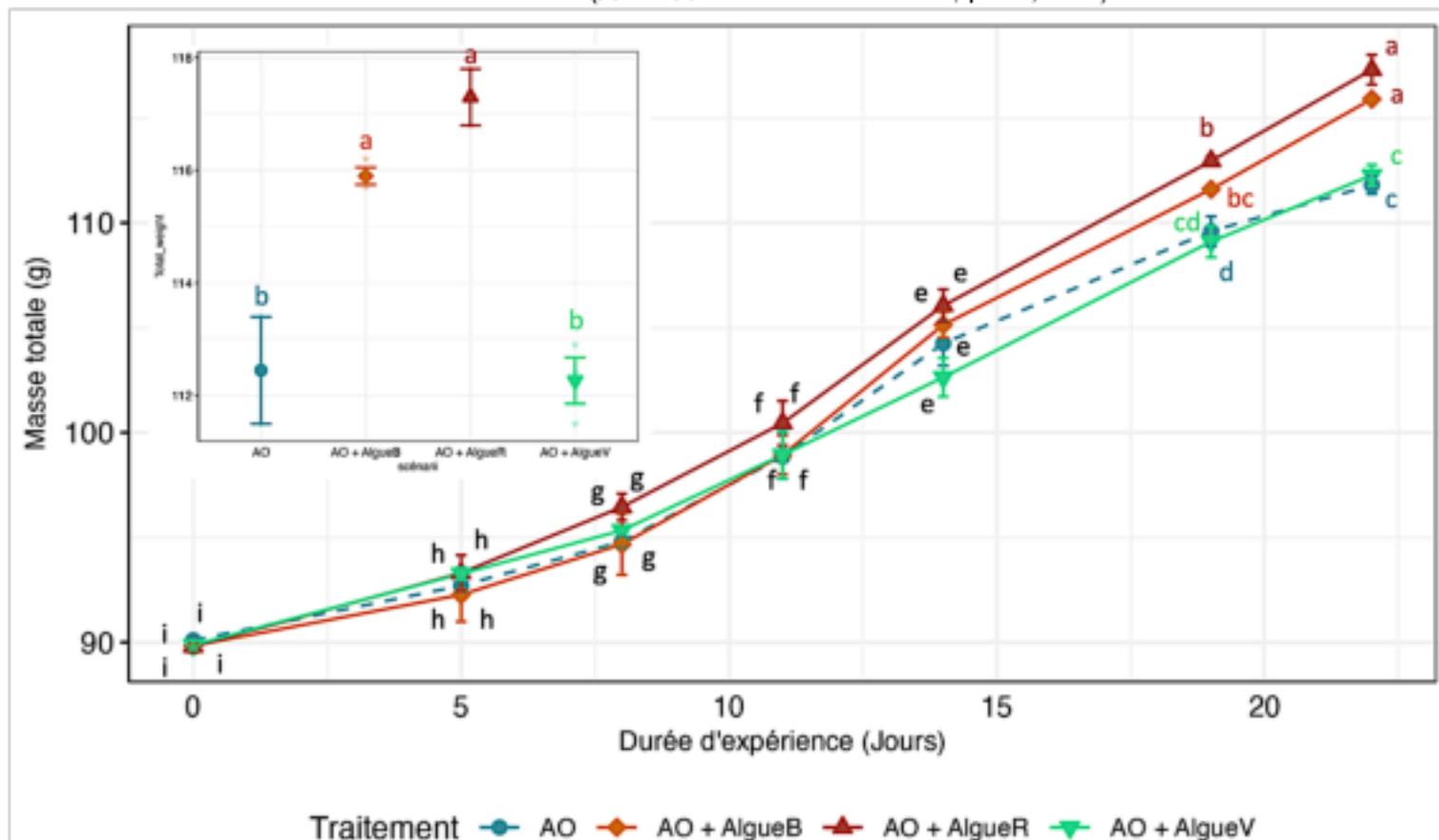


Figure 10. Suivi temporel des masses humides totales moyennes des huîtres par traitement sur les 21 jours de l'expérience C. Une représentation des masses moyennes à t_{final} a été inclus dans la figure. Des lettres distinctes indiquent des différences significatives à $p < 0,001$.

Après 22 jours d'expérience (cf. figure 10), aucune différence significative (Anova « Traitement » ; $pvalue = 0,9928$) n'est observée entre le traitement sans algue (AO ; masse moyenne = 112g) et la co-culture avec *Ulva* (AO + AlguesV ; masse moyenne = 112g). De même, aucune différence significative n'est identifiée entre les traitements de co-culture avec *Palmaria* et *Saccharina* (AO + AlguesR, masse moyenne = 117g ; AO + AlguesB, masse moyenne = 116g) ($pvalue = 0,2778$). Cependant, la masse des huîtres, exposées à *Palmaria* et *Saccharina*, est significativement plus élevée de 4,5% par rapport aux traitements sans algue et avec algue verte ($pvalue = 0,0028$).

Lorsque l'on considère la masse de chair humide (cf. figure 11B), aucune différence significative n'a été mise en évidence entre les divers traitements ($p = 0,0994$). En co-culture avec *Ulva* (cf. figure 11A), une diminution significative de 3 % de la masse individuelle a été

constatée par rapport au traitement sans algue ($p = 0,0357$). Il n'y a aucune différence pour la masse individuelle ($p = 0,1820$) et la longueur de coquille ($p = 0,9995$).

Par ailleurs, la co-culture avec *Palmaria* présente une augmentation significative ($p = 0,0015$) de la masse sèche de la coquille (cf. figure 11 C), atteignant 13 %, ce qui se révèle plus marqué qu'avec *Saccharina* (6 %) ($p = 0,0401$). Les co-cultures *Palmaria* et *Saccharina* affichent une longueur de coquille moyenne (cf. figure 11 D) ainsi qu'une masse individuelle moyenne (cf. figure 11 A) significativement supérieures de respectivement 8 % et 5 % par rapport aux huîtres élevées sans algue.

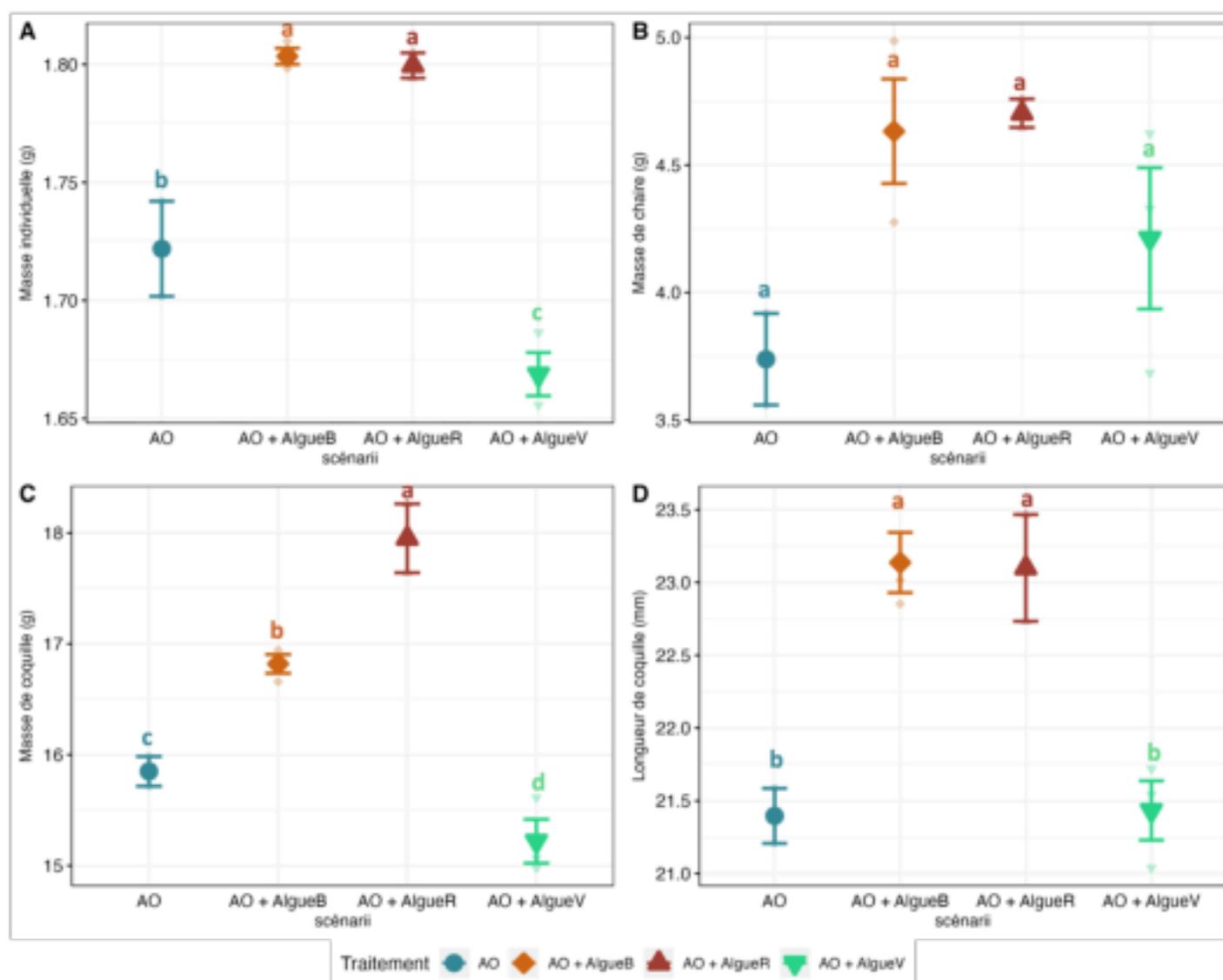


Figure 11. Relations des masses, longueurs de *Crassostrea gigas* par rapport aux traitements ; avec (A) la masse individuelle totale, (B) la masse du pool de chair humide ($n=15$ individus), (C) la masse coquillière, (D) la longueur de coquille. Chaque point est la moyenne de 15 individus prélevés pour chaque condition, à l'exception du pool de chair humide. Des lettres distinctes indiquent des différences significatives à $p < 0,001$.

IV. Discussion

Au cours de cette étude, l'exposition des huîtres creuses *Crassostrea gigas* à un pH acide de 7,20 a entraîné une réduction significative de 20% (exp. A) et de 16% (exp. B) de leur masse individuelle moyenne (coquille + chair) par rapport aux conditions ambiantes. Par ailleurs, lorsqu'elles ont été élevées en co-culture avec *Palmaria palmata*, une amélioration par rapport aux effets négatifs de l'acidification a été observée, avec une augmentation de 4% (non significative, exp. A) et de 7% (significative, exp. B) de la masse individuelle moyenne des huîtres. Dans l'ensemble, ces résultats fournissent un aperçu de la capacité des macroalgues à atténuer les effets négatifs de l'acidification des océans sur ce bivalve d'aquaculture. Après une étude approfondie sur trois types d'algues différentes - *Ulva*, *Saccharina* et *Palmaria* - pour améliorer la croissance des coquillages, nous avons identifié l'algue rouge et brune comme étant plus appropriées pour une utilisation en co-culture. La cohabitation avec la dulse (*Palmaria*) et le kombu (*Saccharina*) a entraîné une augmentation significative de 5% et 4%, respectivement, par rapport au groupe témoin, tandis que la cohabitation avec *Ulva* n'a montré aucune augmentation significative.

A. Développement de la zoo-technie et phyco-technie de la co-culture en laboratoire

L'effet de la température, luminosité et photopériode

Il est important de noter que les performances des algues peuvent varier en fonction de facteurs environnementaux appliqués.

L'intensité lumineuse, la photopériode et la température ont été maintenues constantes au long de l'expérimentation. Pour maximiser la photosynthèse, nous avons placé les algues dans leurs conditions de croissance optimales, selon les recherches de Fortez et Lunez (1980). La température optimale de croissance se situe généralement autour de 15 °C pour la majorité des algues (*Palmaria*; Morgane et Simpson., 1981). Dans leur étude, la croissance des algues était à son optimum lorsque les densités de flux photoniques dépassaient 70 $\mu\text{E m}^{-2}.\text{s}^{-1}$. Les espèces d'algues eulittorales (par ex. *Ulva* et *P. palmata*) n'ont pas montré de diminution significative de leur taux de croissance à une forte luminosité (250 $\mu\text{E m}^{-2}.\text{s}^{-1}$). En revanche, le taux de croissance des algues brunes sublittorales (par ex. *S. latissima*) a diminué d'environ 50%. C'est pourquoi nous avons choisi d'appliquer une intensité lumineuse de 80 $\mu\text{E m}^{-2}.\text{s}^{-1}$. Les algues rouges et brunes ont montré une amélioration de leur croissance avec une photopériode croissante, pouvant aller jusqu'à 24 h. En revanche, les algues vertes

ont démontré une diminution de performance au-delà de 16 h de lumière. Nous avons donc choisi de reproduire la photopériode de l'environnement naturel, en ne dépassant pas 16 heures de lumière pour chacune de nos expérimentations.

Bien que ces paramètres soient ajustés pour refléter les conditions environnementales extérieures, ils ne capturent pas l'entière complexité retrouvée dans les écosystèmes naturels (par ex. la météo, marée, saison). D'autres algues pourraient avoir des performances différentes ou équivalentes dans des conditions variées de température et de luminosité.

L'influence des performances des algues

Notre sélection s'est focalisée sur trois catégories d'algues : les algues vertes, rouges et brunes.

Dans un contexte naturel non contrôlé, l'étude menée par Young et al. (2021) a montré des variations de pH sur un site de production d'algues *Saccharina latissima*. À l'intérieur des installations aquacoles, le pH moyen s'est avéré supérieur d'environ 0,15 unité pH. Ces fluctuations ont présenté des variations significatives au cours de la journée, atteignant jusqu'à 1 unité pH de différence. Ces constatations sont vérifiées par les recherches menées par Wahl et al. (2018) a use ind'une forêt marine de *Fucus*. Ces études confirment la capacité des algues à servir de refuges chimiques pour la faune environnante. Cependant, la littérature ne fournit pas de clarifications évidentes sur les performances spécifiques des différentes espèces d'algues quant à leur capacité à offrir un refuge optimal. Notre choix d'utiliser *Palmaria palmata* repose principalement sur sa capacité à réduire les fluctuations nocives du pH nocturne.

Nos résultats concernant *Ulva* ont démontré qu'en dépit de sa capacité à augmenter significativement le pH de 0,12 unité en présence de lumière (exp. C), elle présentait des variations nocturnes du pH susceptibles de compromettre la croissance des huîtres, dues à une acidification nocturne de 0,13 unité pH (cf. Annexe XII). En revanche, *Palmaria palmata* a affiché une efficacité optimale en élevant le pH de 0,22 unité pendant la journée (exp. C), tout en minimisant la réduction nocturne de 0,04 unité pH. De même, l'algue brune *Saccharina latissima* a obtenu des résultats similaires aux algues rouges en augmentant le pH diurne de 0,21 unité (exp. C) et en maintenant des niveaux nocturnes de pH plus élevés. Ces conclusions sont renforcées par les expériences préliminaires réalisées dans des conditions de pH ambiant (cf. Annexe I).

De plus, il est essentiel de prendre en considération des facteurs tels que les interactions potentielles avec d'autres organismes (microfaune et macrofaune¹) lors du choix d'une algue. Par exemple, les résultats de l'étude menée par Dugeny et al. (2021) nous informent que *Ulva sp.* a induit une perturbation du microbiote bactérien de l'huître, altérant ainsi sa réponse immunitaire, ce qui a ultimement rendu les huîtres plus vulnérables à la maladie. Par conséquent, nous avons pris la décision d'éliminer complètement l'utilisation d'*Ulva* en co-culture avec les huîtres.

L'effet densité-dépendant

Dans notre étude, nous avons exploré l'effet de différentes **biomasses** d'algues sur les fluctuations du pH. Le choix des 400 g comme biomasse optimale pour l'exp. A a été guidé par notre objectif de maintenir un pH diurne élevé sans induire une acidification significative la nuit, à un débit fixe. En effet, au-delà de 400 g, nous avons observé que le pH se stabilisait (cf. Annexe III). Le phénomène de photo-ombrage, où les algues à la surface limitaient la photosynthèse des algues situées en dessous, est probablement à l'origine de cette stabilisation. De même, les algues ont entraîné une faible acidification de l'eau à partir de 400 g, supposant une respiration nocturne plus importante.

Ces fluctuations du pH diurne peuvent être relativement importantes, dépassant parfois 1 unité de pH selon plusieurs études (Middelboe et Hansen, 2007 et Wahl, 2013 ; Hurd, 2015 ; comme indiqué dans les expériences menées au cours de cette étude). Nos résultats ont montré que la capacité des algues à moduler le pH était directement liée à leur biomasse. À 400 g d'algue, le pH a enregistré une élévation de 0,40 unité (cf. figure 4). Une étude menée par Wahl et al. (2018) a illustré comment une diminution du pH due à des niveaux élevés de pCO₂ (pH = 7,74) a été entièrement compensée par seulement deux individus (masse humide = 40 g) de *Fucus vesiculosus*. Cependant, dans le cadre de notre expérience, réalisée à un pH considérablement plus bas (pH = 7,24), la photosynthèse n'a pas suffi à restaurer le pH de l'eau aux conditions ambiantes.

Il est important de noter que le choix de la biomasse d'algue peut varier en fonction des espèces d'algues utilisées et des choix zootechniques du système expérimental (débit, volume d'eau).

¹ Ensemble des animaux benthiques dont la taille est supérieure à 1 millimètre, taille suffisante pour être facilement distingué à l'œil nu. Son contraire est la microfaune (non visible à l'œil nu).

L'effet débit-dépendant

Dans notre étude, nous avons examiné l'effet de différents **débits** sur le pH afin d'évaluer comment ces variations pourraient influencer la réussite de la co-culture. Dans nos conditions expérimentales, les résultats ont révélé que des débits supérieurs à 400 mL.min⁻¹ pourraient ne pas être suffisants pour permettre aux algues de remonter efficacement le pH diurne par rapport au pH initial. En effet, le pH diurne apparaît être une fonction décroissante du débit, suggérant qu'une diminution du débit favorise une meilleure élévation du pH pendant les heures de lumière. Sur la base de nos observations, un débit de 200 mL.min⁻¹ a été considéré comme optimal. Ce choix a été guidé par la nécessité de maintenir un équilibre entre les besoins physiologiques des huîtres et les effets des algues sur le pH. Un débit trop élevé aurait minimisé l'élévation du pH. D'un autre côté, un débit trop faible aurait pu entraver la distribution adéquate du phytoplancton dans le système, ce qui aurait été défavorable pour la croissance des huîtres.

En utilisant un débit de 40 mL.min⁻¹, Wahl et al. (2018) montrent que la présence de 5 individus de *Fucus vesiculosus* (poids humide = 100 g) a conduit à une élévation 0,70 unité pH. Bien que la biomasse ait été augmentée de quatre fois, nos variations observées (exp. A ; delta pH = 0,40 pour 400 g) restent relativement moins prononcées en raison de notre débit également supérieur de quatre fois. L'approche in situ et en mésocosme, telle que décrite par Jiang et al. (2022), a mis en lumière la réaction du pH de l'eau de mer circulant à un débit de 1000 mL.min⁻¹. Un individu de *Saccharina japonicus* (200 g en biomasse humide), a été en mesure d'augmenter le pH de 0,11 unité pH dans ces conditions. Nos propres résultats (exp. B ; figure 6) quant à eux, ont démontré une élévation du pH de 0,40 unité pour une biomasse équivalente, malgré un débit cinq fois plus faible. Ces conclusions s'accordent parfaitement avec notre analyse des effets du débit sur l'élévation du pH d'origine biogénique. Elles soulignent clairement la corrélation significative entre les variables de biomasse et de débit lors de la mise en place d'un système de co-culture.

Une approche prudente basée sur une compréhension approfondie des besoins des organismes impliqués est essentielle pour choisir le débit optimal. Il est donc important de noter que le débit peut être spécifique à notre système expérimental de co-culture.

L'influence du système d'élevage

Un aménagement de culture efficace est essentiel pour obtenir des effets significatifs sur la croissance de l'huître. Les régimes hydrodynamiques et mélange d'eau sont importants dans la conception d'une co-culture optimale.

Des études menées sur *Posidonia* ont révélé que l'effet tampon des plantes aquatiques en réponse à l'acidification peut être détecté à une distance d'environ 10 mètres à partir de la limite de la prairie (Hendriks et al., 2014). De plus, la croissance des macroalgues peut être restreinte par l'atténuation verticale de la lumière solaire. La profondeur joue un rôle limitant qui restreint la productivité aux premiers mètres (Beer et al., 2016). L'adoption d'un système de filières alternant entre huîtres et algues devient pertinente pour contourner les problèmes liés à la limitation de la lumière et pour exploiter les effets tampon. C'est pourquoi nous proposons la mise en place d'un système de co-culture en filière pour notre première expérience. Néanmoins, une vitesse du courant faible ($200 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$) a influencé le maintien d'un pH homogène entre le bassin des algues et le bassin des huîtres (cf. figure 4). La quantité d'eau traitée par les algues s'est avérée insuffisante pour parvenir à une homogénéisation complète du volume total du bassin d'huître, même après l'ajout d'une pompe d'homogénéisation. De plus, étant donné que l'expérience a été menée en interaction avec l'atmosphère, il est possible qu'un phénomène de dégazage du CO_2 se soit produit entre les deux niveaux. Cela a entraîné une hausse du pH dans le bassin d'huîtres. Le dégazage pourrait expliquer l'origine de la faible différence observée entre les bassins témoins AO et ceux contenant 50 g d'algues. En raison du temps de rétention prolongé (3h30min) de l'eau dans le bassin d'huître, il est présumé que la respiration des huîtres ait induit une diminution du pH. Cette circonstance justifie la similitude des résultats entre les traitements à 200g et 400g d'algues.

En conséquence, nous avons décidé d'expérimenter un système de cohabitation où les algues et les huîtres sont élevées dans le même bassin. Nous avons limité ainsi le dégazage et renforçons le contact de l'eau traitée par les algues avec les huîtres. Avec ce système, nous exploitons la couche limite de diffusion des macrophytes, décrite par Cornwall et al. (2014) et Wahl et al. (2016). Dans les petites zones d'habitat de *Zostera* et *Fucus* (environ 1-2 m^2), Wahl et al. (2018) n'ont pas détecté d'impact significatif des macrophytes sur la chimie des carbonates. Il est probable que les habitats sélectionnés étaient trop petits et le rapport biomasse/volume d'eau trop faible pour modifier de manière substantielle le pH de l'eau de mer environnante.

Ainsi, l'expérience B illustre comment l'atténuation biogénique de l'acidification peut être importante à l'échelle d'un bassin de 40L en flux ouvert, tout en dépendant fortement d'un rapport biomasse/volume d'eau fort.

L'effet des huîtres sur le pH

Dans l'expérience en mésocosme de Jiang et al., (2022), l'algue *S. japonica* a atténué le risque d'auto-acidification causé par *C. gigas*. En effet, les huîtres peuvent modifier le pH par leur activité respiratoire et le processus de calcification. Cependant dans notre étude, l'exp. B met en valeur ce phénomène (cf. figure 6). Le pH moyen dans le traitement de cohabitation est significativement plus faible de 0,08 unité par rapport au traitement avec des algues seules. Ces résultats sont à nuancer avec la biomasse utilisée, l'âge des huîtres ainsi que la quantité de nourriture distribuée. Les huîtres nourries ad libitum possèdent une activité respiratoire accrue afin d'assurer l'ingestion. Ainsi, en phase nocturne, le CO₂ produit par les algues et les huîtres peut-être responsable d'une forte acidification, si le ratio biomasse algue et huître est trop faible.

B. Les bénéfices apportés par les algues sur la croissance des huîtres

L'effet d'une pCO₂ élevée sur les huîtres creuses

Les effets négatifs de l'acidification sur la croissance et la survie des bivalves ont été bien documentés. La diminution du pH entraîne une croissance plus lente et un potentiel risque de prédation (Thomsen et al., 2013).

Conformément aux études précédentes qui ont évalué la réponse des bivalves juvéniles à des niveaux élevés de pCO₂ (Gazeau et al., 2013 ; Luttier et al., 2022), les huîtres creuses dans la présente étude ont connu des diminutions de la masse moyenne totale de 20% (exp. A ; 30j) et 16% (exp. B ; 22j) dans les traitements non végétalisés. Au-delà de la réduction des masses totales, la masse et la longueur de coquille ont également été réduites par rapport aux traitements ambiants. Cette observation est cohérente avec les résultats de Coline et al., (non publiée) qui ont démontré que tous les paramètres de la coquille sont impactés rapidement dès les premières diminutions de pH.

Les réponses de l'huître à l'acidification peuvent cependant être plus nuancées et complexes à des stades ultérieurs de la vie et à travers les générations. De plus, l'acclimatation varie selon les espèces d'huîtres (Gazeau et al., 2013 ; Coline et al., non publiée). D'autres recherches sont nécessaires pour déterminer si les résultats de la présente étude se traduiraient à des stades ultérieurs de la vie ou à travers les générations.

La végétalisation facilite la croissance coquillère des huîtres

Dans nos expériences, la présence de végétalisation a remonté le pH moyen de 0,1 à 0,4 unité pH par rapport au pH initial. Cette augmentation du pH pourrait être bénéfique pour la calcification.

Selon la littérature, les macroalgues peuvent affecter le pH dans les écosystèmes peu profonds et modifier la performance des organismes calcifiant. Une étude réalisée par Anthony et al. (2013) a révélé qu'en présence de végétaux marins, la disponibilité en carbonates augmentait pendant la journée. De plus, Wahl et al. (2018) ont démontré que les augmentations diurnes du pH provoqués par *Fucus vesiculosus* fournissaient un refuge contre les conditions acidifiées pour *M. edulis*. Le taux de calcification de *M. edulis* augmentait de 40% par 0,5 unité de pH.

Dans la présente étude, *P. palmata* a produit une augmentation de la croissance de *C. gigas* dans les deux premières expériences réalisées. Les résultats de l'exp. A n'ont pas permis de conclure sur les bénéfices de la végétalisation. Le choix zootechnique de compartimenter les huîtres et les algues a provoqué un rapprochement des pH de la condition témoin et de la condition végétalisée. Dans l'exp. B, les masses totales moyennes des huîtres étaient significativement plus élevées de 7% dans les traitements à haute teneur en CO₂ avec végétalisation par rapport à ceux sans algues. Par ailleurs, la masse et longueur coquillère sont plus élevées en présence de végétalisation. Les algues facilitent indirectement le processus de formation de la coquille en augmentant le pH environnant. Des études plus précises du système des carbonates pourraient être engagées afin d'observer l'impact de la végétalisation sur la disponibilité en CO₃²⁻.

Young et al., (2021) montrent qu'en présence de *S. latissima* le taux de croissance de *C. virginica* est meilleure de 40%. Une étude plus ancienne de Young et Gobler (2018) indique qu'en présence d'*Ulva*, le taux de croissance *C. virginica* est supérieur de 20%. Ces expériences sont réalisées en milieu fermé et reflètent difficilement les fluctuations jour/nuit du pH. Néanmoins, l'algue brune semble imposer des conditions de pH moins acides que l'algue verte. Pas extension, nous pouvons assimiler ce résultat à l'exp. C de notre étude. Nous avons montré qu'il n'y a aucun avantage à disposer *Ulva* avec les huîtres car cette condition expérimentale ne se différencie pas du traitement témoin. Au contraire, *P. palmata* et *S. latissima* placées en association avec les huîtres permettent une augmentation de la masse totale moyenne de 5% et 4%, respectivement.

L'interprétation de ces résultats doit prendre en compte la variabilité provoquée par la zootechnique du système. Pour l'exp. C, un incident technique a provoqué une forte acidité et a fortement impacté la croissance des traitements impactés. Ici, nous soulignons

l'importance d'avoir des temps d'expérience plus long afin de capturer les effets sur le long terme et témoigner de la résilience des organismes face à des stress environnementaux.

V. Conclusion

L'étude a montré que les macroalgues ont la capacité d'augmenter le pH moyen et de provoquer une forte fluctuation diurne par son cycle de photosynthèse/respiration.

De plus, la croissance de *Crassostrea gigas* diminue avec le pH. De manière intéressante, les impacts de l'acidification sur les traits macro-physiologiques des huîtres peuvent être neutralisés et/ou améliorés par l'élévation diurne du pH entraînés par les macroalgues. L'augmentation du pH moyen et l'augmentation de l'amplitude des fluctuations du pH diurne dépend des paramètres techniques sélectionnés. En somme, la force de cet effet bénéfique est liée au rapport entre la biomasse algale, le volume d'eau et la vitesse de son déplacement.

Cependant, les expériences en laboratoire ne reflètent pas toute la complexité du milieu marin. Les résultats de notre étude sont spécifiques aux conditions expérimentales, aux espèces, niveaux d'acidification et conditions environnementales. Afin de pouvoir généraliser les résultats, il nous faudrait étendre notre étude afin de quantifier la dépendance au contexte, en particulier à plus grande échelle aquacole. De plus, nos expériences ont été réalisées à court terme et n'ont possiblement pas capturé les effets à long terme des algues sur la croissance des huîtres. Les interactions biotiques entre les deux organismes peuvent avoir des effets spécifiques non identifiés dans notre étude.

À l'avenir, les avantages de l'algoculture pour les bivalves d'élevage pourraient devenir davantage contextualisés en fonction de l'habitat. Le réchauffement et l'acidification des océans constituent une double menace pour les écosystèmes côtiers (Agostini et al., 2021) et les bivalves en particulier (Talmage et Gobler, 2011 ; Matoo et al., 2013). Des études multifactorielles, abordant ces phénomènes en lien avec les effets de l'eutrophisation, pourraient contribuer à approfondir notre compréhension des services écosystémiques fournis par les macroalgues.

En conclusion, la pratique de la culture d'algues au sein de sites ostréicoles semble se présenter comme une stratégie avantageuse pour la protection des bivalves face à l'acidification présente et future.

VI. Bibliographie

A. Articles et revues

- Agostini**, Sylvain, et al. « Simplification, not "Tropicalization", of Temperate Marine Ecosystems under Ocean Warming and Acidification ». *Global Change Biology*, vol. 27, n° 19, 2021, p. 4771-84. *Wiley Online Library*, <https://doi.org/10.1111/gcb.15749>.
- Anthony**, K. R. N., et al. « Benthic Buffers and Boosters of Ocean Acidification on Coral Reefs ». *Biogeosciences*, vol. 10, n° 7, juillet 2013, p. 4897-909. *Copernicus Online Journals*, <https://doi.org/10.5194/bg-10-4897-2013>.
- Beer**, Sven, et al. *Photosynthesis in the Marine Environment*. John Wiley & Sons, 2014.
- Chung**, Ik Kyo, et al. « Using Marine Macroalgae for Carbon Sequestration: A Critical Appraisal ». *Journal of Applied Phycology*, vol. 23, n° 5, octobre 2011, p. 877-86. *Springer Link*, <https://doi.org/10.1007/s10811-010-9604-9>.
- « Culture d'algues et conchyliculture en Normandie. » *SMEL*, 3 décembre 2015, <https://www.smel.fr/2015/12/03/culture-dalgues-et-conchyliculture-en-normandie/>.
- Duarte**, C. M., et al. « Major Role of Marine Vegetation on the Oceanic Carbon Cycle ». *Biogeosciences*, vol. 2, n° 1, février 2005, p. 1-8. *Copernicus Online Journals*, <https://doi.org/10.5194/bg-2-1-2005>.
- Dugeny**, Elyne, et al. « Seaweeds Influence Oyster Microbiota and Disease Susceptibility ». *Journal of Animal Ecology*, vol. 91, n° 4, 2022, p. 805-18. *Wiley Online Library*, <https://doi.org/10.1111/1365-2656.13662>.
- « Étude de l'environnement de la culture de PORPHYRA ». *Capena*, 19 avril 2022, <https://www.ca-pe-na.fr/publications-spe/etude-de-lenvironnement-de-la-culture-de-porphyra/>.
- Feely**, Richard A., Christopher L. Sabine, Kitack Lee, Will Berelson, Joanie Kleypas, Victoria J. Fabry, et Frank J. Millero. « Impact of Anthropogenic CO₂ on the CaCO₃ System in the Oceans ». *Science* 305, n° 5682 (16 juillet 2004): 362-66. <https://doi.org/10.1126/science.1097329>
- Fernández**, Pamela A., et al. « Bicarbonate Uptake via an Anion Exchange Protein Is the Main Mechanism of Inorganic Carbon Acquisition by the Giant Kelp *Macrocystis Pyrifera* (Laminariales, Phaeophyceae) under Variable PH ». *Journal of Phycology*, vol. 50, n° 6, décembre 2014, p. 998-1008. *PubMed*, <https://doi.org/10.1111/jpy.12247>.
- Fortes**, M. D., et K. Lüning. « Growth Rates of North Sea Macroalgae in Relation to Temperature, Irradiance and Photoperiod ». *Helgoländer Meeresuntersuchungen*, vol. 34, n° 1, mars 1980, p. 15-29. *Springer Link*, <https://doi.org/10.1007/BF01983538>.
- Friedlingstein**, Pierre, et al. « Global Carbon Budget 2022 ». *Earth System Science Data*, vol. 14, n° 11, novembre 2022, p. 4811-900. *Copernicus Online Journals*, <https://doi.org/10.5194/essd-14-4811-2022>.
- Gattuso**, J.-P., Hansson, L. (Eds.), 2011. Ocean acidification. Oxford University Press, Oxford; New York.

- Gazeau**, Frédéric, Christophe Quiblier, et al. « Impact of Elevated CO₂ on Shellfish Calcification ». *Geophysical Research Letters*, vol. 34, n° 7, 2007. *Wiley Online Library*, <https://doi.org/10.1029/2006GL028554>.
- Gazeau**, Frédéric, Laura M. Parker, et al. « Impacts of Ocean Acidification on Marine Shelled Molluscs ». *Marine Biology*, vol. 160, n° 8, août 2013, p. 2207-45. *Springer Link*, <https://doi.org/10.1007/s00227-013-2219-3>.
- Gobler**, Christopher J., et al. « Hypoxia and Acidification Have Additive and Synergistic Negative Effects on the Growth, Survival, and Metamorphosis of Early Life Stage Bivalves ». *PLOS ONE*, vol. 9, n° 1, janvier 2014, p. e83648. *PLoS Journals*, <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0083648>.
- Hendriks**, I. E., et al. « Photosynthetic Activity Buffers Ocean Acidification in Seagrass Meadows ». *BIOGEOSCIENCES*, vol. 11, n° 2, 2014, p. 333-46. *Clarivate Analytics Web of Science*, <https://doi.org/10.5194/bg-11-333-2014>.
- Hurd**, Catriona L. « Slow-Flow Habitats as Refugia for Coastal Calcifiers from Ocean Acidification ». *Journal of Phycology*, vol. 51, n° 4, août 2015, p. 599-605. *PubMed*, <https://doi.org/10.1111/jpy.12307>.
- . « Slow-Flow Habitats as Refugia for Coastal Calcifiers from Ocean Acidification ». *JOURNAL OF PHYCOLOGY*, vol. 51, n° 4, août 2015, p. 599-605. *Clarivate Analytics Web of Science*, <https://doi.org/10.1111/jpy.12307>.
- Jiang**, Zengjie, et al. « The Potential of Kelp *Saccharina japonica* in Shielding Pacific Oyster *Crassostrea gigas* From Elevated Seawater pCO₂ Stress ». *Frontiers in Marine Science*, vol. 9, 2022. *Frontiers*, <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fmars.2022.862172>.
- Kübler**, Je, et Ja Raven. « Consequences of Light Limitation for Carbon Acquisition in Three Rhodophytes ». *Marine Ecology Progress Series*, vol. 110, 1994, p. 203-09. *DOI.org (Crossref)*, <https://doi.org/10.3354/meps110203>.
- Lutler**, Mathieu, et al. « Revisiting Tolerance to Ocean Acidification: Insights from a New Framework Combining Physiological and Molecular Tipping Points of Pacific Oyster ». *Global Change Biology*, vol. 28, n° 10, 2022, p. 3333-48. *Wiley Online Library*, <https://doi.org/10.1111/gcb.16101>.
- Matoo**, Omera B., et al. « Interactive effects of elevated temperature and CO₂ levels on metabolism and oxidative stress in two common marine bivalves (*Crassostrea virginica* and *Mercenaria mercenaria*) ». *Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Molecular & Integrative Physiology*, vol. 164, n° 4, avril 2013, p. 545-53. *ScienceDirect*, <https://doi.org/10.1016/j.cbpa.2012.12.025>.
- Middelboe**, Anne Lise, et Per Juel Hansen. « High PH in Shallow-Water Macroalgal Habitats ». *Marine Ecology Progress Series*, vol. 338, mai 2007, p. 107-17. *www.int-res.com*, <https://doi.org/10.3354/meps338107>.
- Morgan**, K. C., et F. J. Simpson. « Cultivation of *Palmaria* (*Rhodymenia*) *Palmata*: Effect of High Concentrations of Nitrate and Ammonium on Growth and Nitrogen Uptake ». *Aquatic Botany*, vol. 11, janvier 1981, p. 167-71. *ScienceDirect*, [https://doi.org/10.1016/0304-3770\(81\)90057-7](https://doi.org/10.1016/0304-3770(81)90057-7).
- Orr**, James C., et al. « Anthropogenic Ocean Acidification over the Twenty-First Century and Its Impact on Calcifying Organisms ». *Nature*, vol. 437, n° 7059, 7059, septembre 2005, p. 681-86. *www.nature.com*, <https://doi.org/10.1038/nature04095>.

- Petton**, Bruno, et al. « Factors influencing disease-induced mortality of Pacific oysters *Crassostrea gigas* ». *Aquaculture Environment Interactions*, vol. 6, mars 2015. *ResearchGate*, <https://doi.org/10.3354/ae00125>.
- Saderne**, Vincent, et Martin Wahl. « Differential Responses of Calcifying and Non-Calcifying Epibionts of a Brown Macroalga to Present-Day and Future Upwelling PCO₂ ». *PLoS ONE*, vol. 8, n° 7, juillet 2013, p. e70455. *Clarivate Analytics Web of Science*, <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0070455>.
- Surif**, Misni B., et John A. Raven. « Exogenous Inorganic Carbon Sources for Photosynthesis in Seawater by Members of the Fucales and the Laminariales (Phaeophyta): Ecological and Taxonomic Implications ». *Oecologia*, vol. 78, n° 1, janvier 1989, p. 97-105. *PubMed*, <https://doi.org/10.1007/BF00377203>.
- Talmage**, Stephanie C., et Christopher J. Gobler. « Effects of Elevated Temperature and Carbon Dioxide on the Growth and Survival of Larvae and Juveniles of Three Species of Northwest Atlantic Bivalves ». *PloS One*, vol. 6, n° 10, 2011, p. e26941. *PubMed*, <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0026941>.
- Thomsen**, J., et al. « Impact of Seawater Carbonate Chemistry on the Calcification of Marine Bivalves ». *BIOGEOSCIENCES*, vol. 12, n° 14, 2015, p. 4209-20. *Clarivate Analytics Web of Science*, <https://doi.org/10.5194/bg-12-4209-2015>.
- Wahl**, M., et al. « Macroalgae May Mitigate Ocean Acidification Effects on Mussel Calcification by Increasing PH and Its Fluctuations ». *Limnology and Oceanography*, vol. 63, n° 1, 2018, p. 3-21. *Wiley Online Library*, <https://doi.org/10.1002/lno.10608>.
- Welladsen**, Heather, et al. « The effects of exposure to near-future levels of ocean acidification on shell characteristics of *Pinctada fucata* (Bivalvia: Pteriidae) ». *Molluscan Research*, vol. 30, janvier 2010, p. 125-30.
- Young**, Craig S., et al. « Kelp (*Saccharina latissima*) Mitigates Coastal Ocean Acidification and Increases the Growth of North Atlantic Bivalves in Lab Experiments and on an Oyster Farm ». *Frontiers in Marine Science*, vol. 9, 2022. *Frontiers*, <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fmars.2022.881254>.
- Young**, Craig S., et Christopher J. Gobler. « The Ability of Macroalgae to Mitigate the Negative Effects of Ocean Acidification on Four Species of North Atlantic Bivalve ». *Biogeosciences*, vol. 15, n° 20, octobre 2018, p. 6167-83. *Copernicus Online Journals*, <https://doi.org/10.5194/bg-15-6167-2018>.
- Zou**, Dinghui, et Kunshan Gao. « Acquisition of inorganic carbon by *Endarachne binghamiae* (Scytosiphonales, Phaeophyceae) ». *European Journal of Phycology*, vol. 45, n° 1, février 2010, p. 117-26. *Taylor and Francis+NEJM*, <https://doi.org/10.1080/09670260903383909>.

B. Sitographie

- Impact of Anthropogenic CO₂ on the CaCO₃ System in the Oceans* | *Science*. <https://www.science.org/doi/10.1126/science.1097329>. Consulté le 23 mars 2023.
- La situation mondiale des pêches et de l'aquaculture 2022*. FAO, 2022. *DOI.org (Crossref)*, <https://doi.org/10.4060/cc0461fr>. Consulté le 7 juin 2023.
- US Department of Commerce, NOAA. *Global Monitoring Laboratory - Carbon Cycle Greenhouse Gases*. <https://gml.noaa.gov/ccgg/trends/>. Consulté le 12 avril 2023.

VII. Annexe

Annexe I - Expérience « Choix du type d'algue »

Afin de déterminer les conditions optimales pour l'élevage des huîtres, il est essentiel de caractériser les variations du pH en fonction du type d'algue. Dans cette optique, l'algue choisie a démontré la plus forte augmentation du pH durant la journée ainsi qu'une diminution minimale du pH pendant la nuit.

A. Choix du matériel biologique

Des algues ont été récoltées le 20 février 2023, le 6 mars 2023 à la presqu'île du Vivier à Argenton alors que la température de l'eau de mer était d'environ 11°C. Nous avons récupéré l'algue verte *Ulva* spp., l'algue brune *Saccharina latissima* et l'algue rouge *Palmaria palmata*. Les méthodes de récolte et de conditionnement post-récolte sont décrites dans la partie II « Matériel et méthode ».

B. Plan et système expérimentaux

Ici, nous avons utilisé un système à flux ouvert à 1 niveau où l'eau de mer est répartie uniformément dans 6 unités expérimentales, chacune consistant en un bassin contenant les des algues rouges, vertes ou brunes. Chaque unité expérimentale (UE) a été répliquée en deux exemplaires réparti sur 1 bloc. Les conditions de culture des algues sont décrites dans le matériel et méthode (cf. partie II). La photopériode a été fixée à 10h/14, afin de copier les conditions en milieu naturel. Les algues ont été placées dans les bassins, le 25 février 2023. Une biomasse algale arbitraire a été fixée à 500 g \pm 1,3 g dans chaque bassin. Chaque lot d'algue a été alloué aléatoirement à une unité expérimentale. L'expérience a duré 8 jours jusqu'au 27 février 2023.

C. Mesure des paramètres physico-chimiques de l'eau de mer

Le pH_{NBS} de l'eau de mer, la température, la saturation en oxygène dissous et la salinité ont été mesurés deux fois par jour et une fois en fin de nuit dans tous les bassins à l'aide du même dispositif décrit dans le matériel et méthode (cf. partie II). Des multiparamètres ont été placées pendant 26h en enregistrement à fréquence de 15min, dans les différents traitements afin d'obtenir des suivis temporels du pH.

D. Résultats

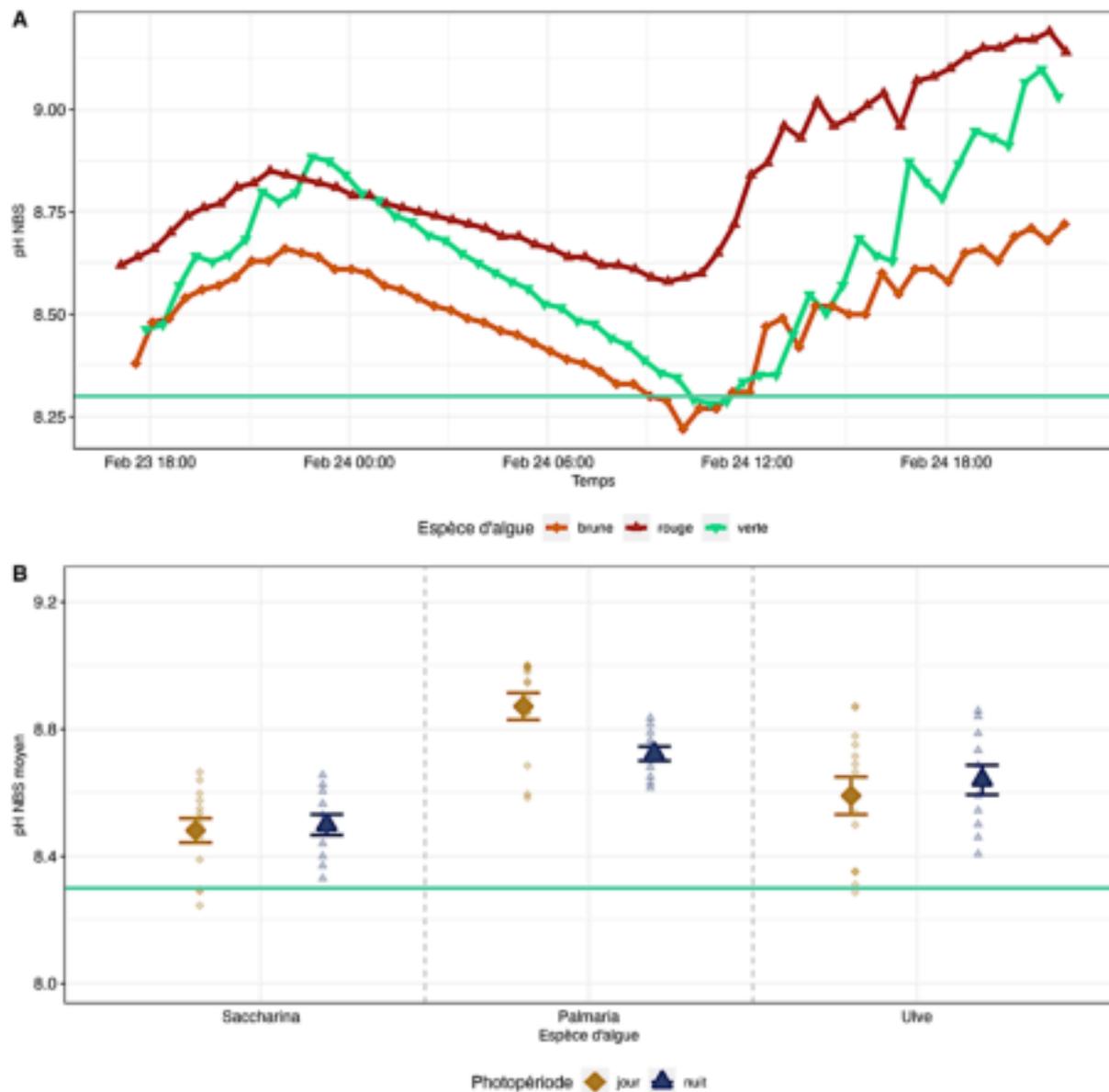


Figure 12. Relevé haute fréquence du pH NBS (A) pour trois espèces d'algue : *Saccharina latissima*, *Palmaria palmata* et *Ulva* sp., pendant une durée de 26h et de pH NBS moyen (B) des relevés HF en fonction de la phase de lumière pour les trois espèces d'algues. Une ligne verte a été tracée pour représenter le pH en condition sans algue, pH = 8,30

Par une analyse graphique (cf. figure 12A), *Palmaria palmata* se conforme le mieux à nos critères de sélection. Conformément à la figure 12B, c'est l'algue rouge qui génère le pH diurne le plus élevé (pH = $8,89 \pm 0,034$) et présente également le pH nocturne le moins bas (pH = $8,75 \pm 0,014$). L'efficacité de *Saccharina* et d'*Ulva* est moins prononcée.

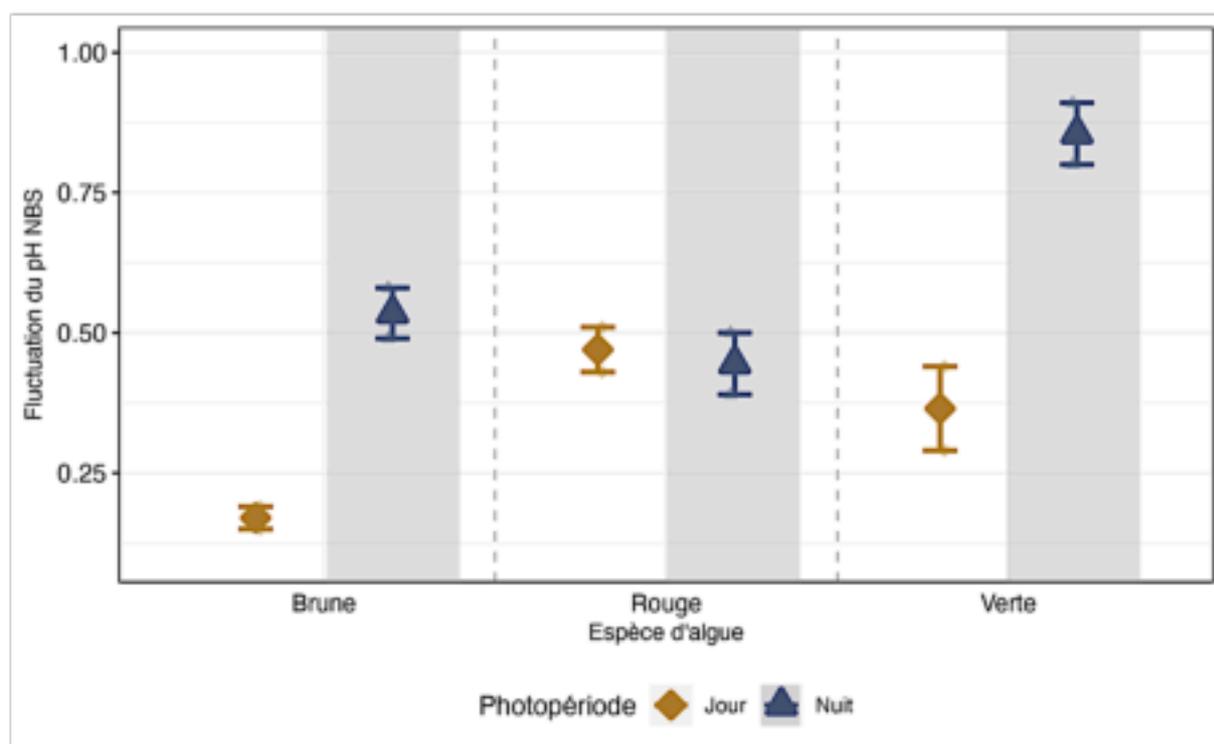


Figure 13. Représentation graphique des amplitudes Jour/Nuit du pH_{NBS} par rapport à un pH ambiant (8,15) en fonction de l'espèce d'algue : *Saccharina latissima*, *Palmaria palmata* et *Ulva* sp. Les données sont issues des relevés ponctuels suivant 7h de lumière et 12h de nuit.

L'effet de l'espèce d'algue est significatif sur le pH diurne et nocturne (Anova unidirectionnelle ; p value = 0,0056, p value = 0,0008).

Après 12 heures de nuit (cf. figure 13), *Ulva* entraîne une réduction significative (p value = 0,0006) de 0,85 unité de pH par rapport à un bassin sans algue (témoin ; $pH = 8,15$). Il n'y a pas de différences significatives entre *Palmaria* et *Saccharina* en ce qui concerne le pH nocturne (p value = 0,5518). *Palmaria* présente une diminution significative moins prononcée du pH nocturne (pH moyen = $7,71 \pm 0,064$ après 12 heures de nuit) et affiche la plus grande augmentation significative de 0,47 unité pH (pH moyen = $8,62 \pm 0,046$ après 7 heures de jour). En comparaison, *Saccharina* ne manifeste pas la même efficacité que *Palmaria*, en provoquant une réduction de 0,53 unité (brune ; $pH = 7,62 \pm 0,052$) et en induisant une élévation du pH de 0,17 unité (brune ; $pH = 8,32 \pm 0,023$).

Parmi les différentes algues évaluées dans notre système expérimental contrôlé, c'est *Palmaria palmata* qui a démontré le plus grand potentiel pour augmenter le pH diurne et minimiser la baisse du pH nocturne. En conséquence, nous avons choisi de continuer à utiliser cette algue pour les prochaines étapes de notre étude.

Annexe II - Expérience 2 : Choix du débit

Afin de déterminer les conditions optimales pour l'élevage des huîtres, il est essentiel de caractériser les variations du pH en fonction du débit. Le débit sélectionné doit trouver un équilibre entre répondre aux besoins physiologiques des huîtres tout en évitant de diluer les effets bénéfiques de la photosynthèse des algues.

A. Choix du matériel biologique

Des algues ont été récoltées le 6 mars 2023 et le 12 mars 2023 à la presqu'île du Vivier à Argenton alors que la température de l'eau de mer était d'environ 11°C. Nous avons récupéré l'algue rouge *Palmaria palmata*. Les méthodes de récolte et de conditionnement post-récolte sont décrites dans la partie II « Matériel et méthode ».

B. Plan et système expérimentaux

Nous avons mené deux expériences successives afin d'évaluer l'impact du débit sur le pH. Ici, nous avons utilisé un système à flux ouvert à 1 niveau où l'eau de mer est répartie uniformément dans 6 unités expérimentales (UE).

Pour la première expérience (exp.a), chaque UE était constituée d'un bassin contenant des algues rouges et soumis à des débits réglés à 0, 100, 250, 400, 700 ou 1300 mL.min⁻¹. Pour la seconde expérience (exp.b), le débit entrant était réglé à 0, 100, 250, 400 ou 700 mL.min⁻¹ avec un bassin laissée vide comme témoin à 400 mL.min⁻¹. Chaque unité expérimentale (UE) a été répliquée en un exemplaire réparti sur 1 bloc. La biomasse des algues a été fixée à environ 500 g ± 1,4 g dans chaque bassin. Les algues ont été placées dans les bassins le 10 et 15 mars 2023. L'expérience s'est déroulée sur 5 jours jusqu'au 15 et 20 mars 2023.

C. Mesure des paramètres physico-chimiques de l'eau de mer

Le pH_{NBS} de l'eau de mer, la température, la saturation en oxygène dissous et la salinité ont été mesurés deux fois par jour et une fois en fin de nuit dans tous les bassins à l'aide d'un dispositif multiparamétrique portable. Des multiparamètres ont été placés pendant 5 jours en enregistrement à fréquence de 15min, dans les traitements 0, 400 et 1300 mL.min⁻¹ (exp. a) et 0, 100 et 700 mL.min⁻¹ (exp. b).

D. Résultats

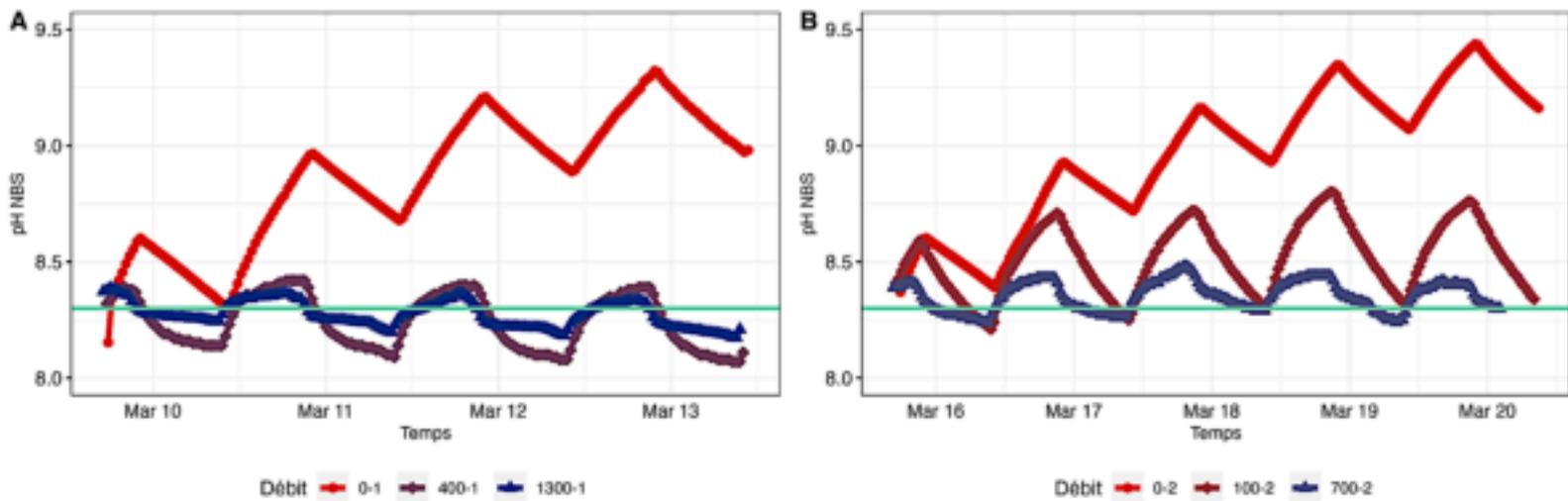


Figure 14. Suivi temporel haute fréquence du pH pour six débits pendant une durée de 120h : exp. a (A) et exp. b (B). Une ligne verte a été tracé pour représenter le pH en condition sans algue, pH = 8,30

Nous avons opté pour l'enregistrement séquentiel de la condition à 0 mL/min^{-1} dans l'exp. a et l'exp. b afin de faciliter la comparaison des résultats. Conformément à la figure 14A et 14B, les profils de pH 0 mL/min^{-1} suivent une cinétique similaire. Par conséquent, les deux expériences sont comparables (cf. figure 15).

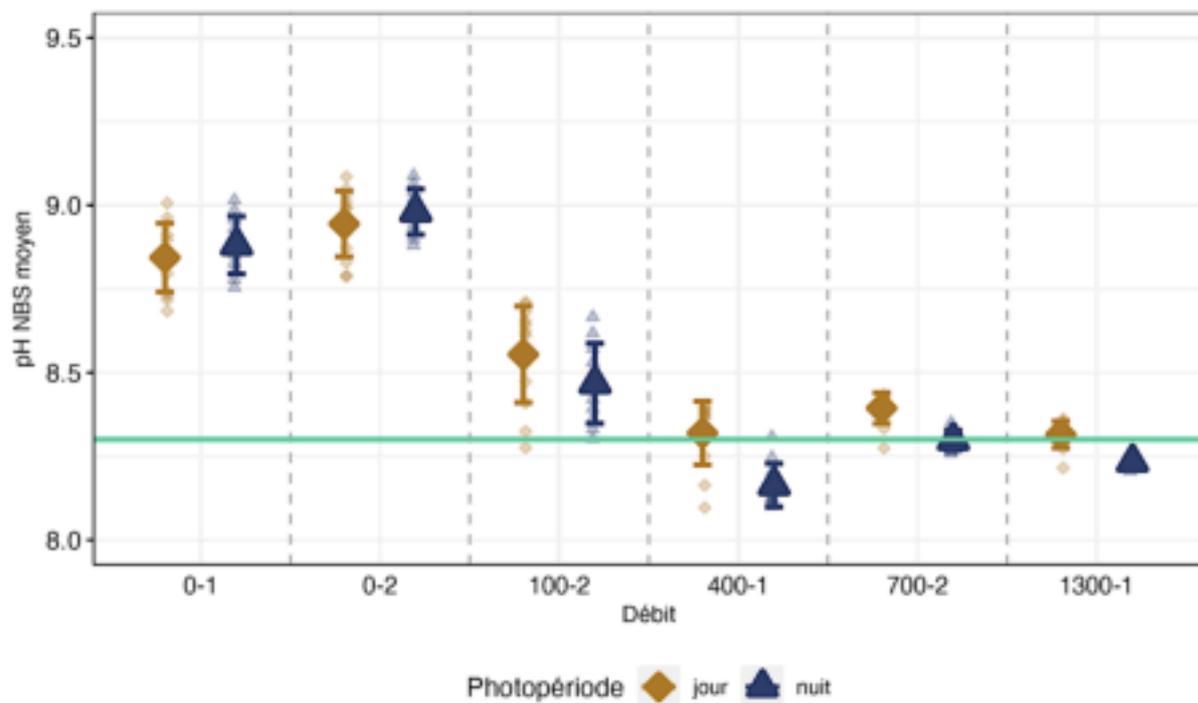


Figure 15. Représentation du pH NBS moyen des relevés haute fréquence en fonction de la phase de lumière pour les trois espèces d'algues. Une ligne verte a été tracée pour représenter le pH en condition sans algue, pH = 8,30

Les données à haute fréquence (cf. figure 14B et 15) mettent en évidence que lorsqu'un débit dépasse 700 mL/min^{-1} (courbe bleue), les effets de *Palmaria* sur le pH sont dilués. L'amplitude du pH est relativement faible entre le jour et la nuit (cf. figure 15).

Au-delà de 400 mL/min^{-1} (courbe violette), *Palmaria* semble ne pas pouvoir augmenter de manière significative le pH diurne par rapport au pH initial (8,15). De plus, à ce débit, des phases d'acidification nocturnes sont observées, conduisant à une réduction de 0,17 du pH moyen. Par conséquent, il est préférable d'utiliser des débits inférieurs à 400 mL/min^{-1} .

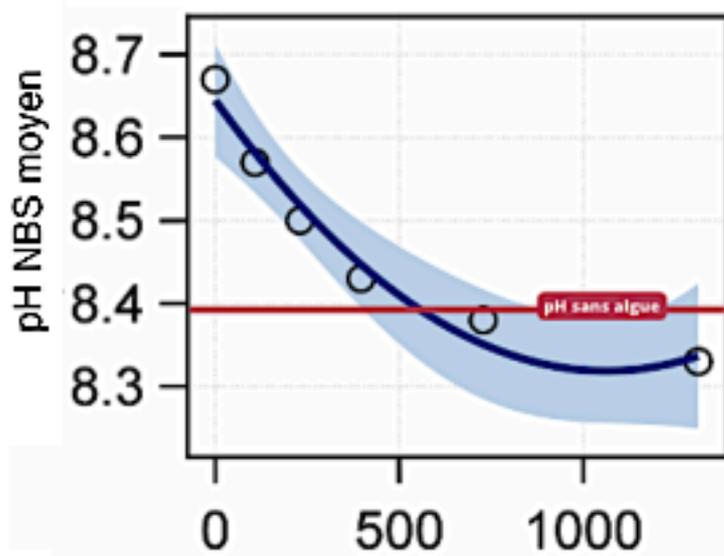


Figure 16. Représentation linéaire des pH NBS moyen par débit. La régression est réalisée sur les relevés ponctuels ($n=1$ pour chaque débit). La mesure a été effectuée après 7h de lumière, sur 120h d'enregistrement. Une ligne rouge a été tracée pour représenter le pH sans algue

Selon la figure 16, il est observé que le pH décroît significativement en fonction du débit (ANOVA « débit », $p < 0,005$). Conformément aux observations précédentes (cf. figure 15), les débits optimaux sont situés dans la plage de $[100 : 400] \text{ mL/min}^{-1}$, où une amélioration de $[0,2 : 0,03]$ unité pH est constatée.

En particulier, un débit de 200 mL/min^{-1} est identifié comme optimal et sera retenu pour notre système de co-culture.

Annexe III - Expérience 3 : Choix de la biomasse

Afin de déterminer les conditions optimales pour l'élevage des huîtres, il est essentiel de caractériser les variations du pH en fonction de la biomasse algale. La biomasse retenue a été celle qui a montré la plus grande capacité à augmenter le pH à un débit constant.

A. Choix du matériel biologique

Des algues ont été récoltées le 18 mars 2023 à la presqu'île du Vivier à Argenton alors que la température de l'eau de mer était d'environ 11°C. Nous avons récupéré l'algue rouge *Palmaria palmata*. Les méthodes de récolte et de conditionnement post-récolte sont décrites dans la partie II « Matériel et méthode ».

B. Plan et système expérimentaux

Nous avons mené une expérience afin d'évaluer l'impact de la biomasse sur le pH. Ici, nous avons utilisé un système à flux ouvert à 1 niveau où l'eau de mer est répartie uniformément dans 6 unités expérimentales (UE). Chaque UE était constituée d'un bassin contenant des algues rouges à des niveaux de biomasse différents. 0, 40, 120, 240, 400 et 560 g sont les biomasses que nous choisissons d'expérimenter. Chaque unité expérimentale (UE) a été répliquée en un exemplaire réparti sur 1 bloc. Le débit d'eau en entrée de bassin a été fixée à environ 200 mL·min⁻¹, selon l'exp. 2. Les algues ont été placées dans les bassins le 22 mars 2023. L'expérience s'est déroulée sur 5 jours jusqu'au 27 mars 2023.

C. Mesure des paramètres physico-chimiques de l'eau de mer

Le pH_{NBS} de l'eau de mer, la température, la saturation en oxygène dissous et la salinité ont été mesurés deux fois par jour et une fois en fin de nuit dans tous les bassins à l'aide d'un dispositif multiparamétrique portable. Des multiparamètres ont été placées pendant 5 jours enregistrement à fréquence de 15min, dans les traitements contenant 120, 240 et 400 g d'algue. Avant l'expérience, la précision de l'électrode de pH a été vérifiée une fois avec des tampons Certipur® NBS.

D. Résultat

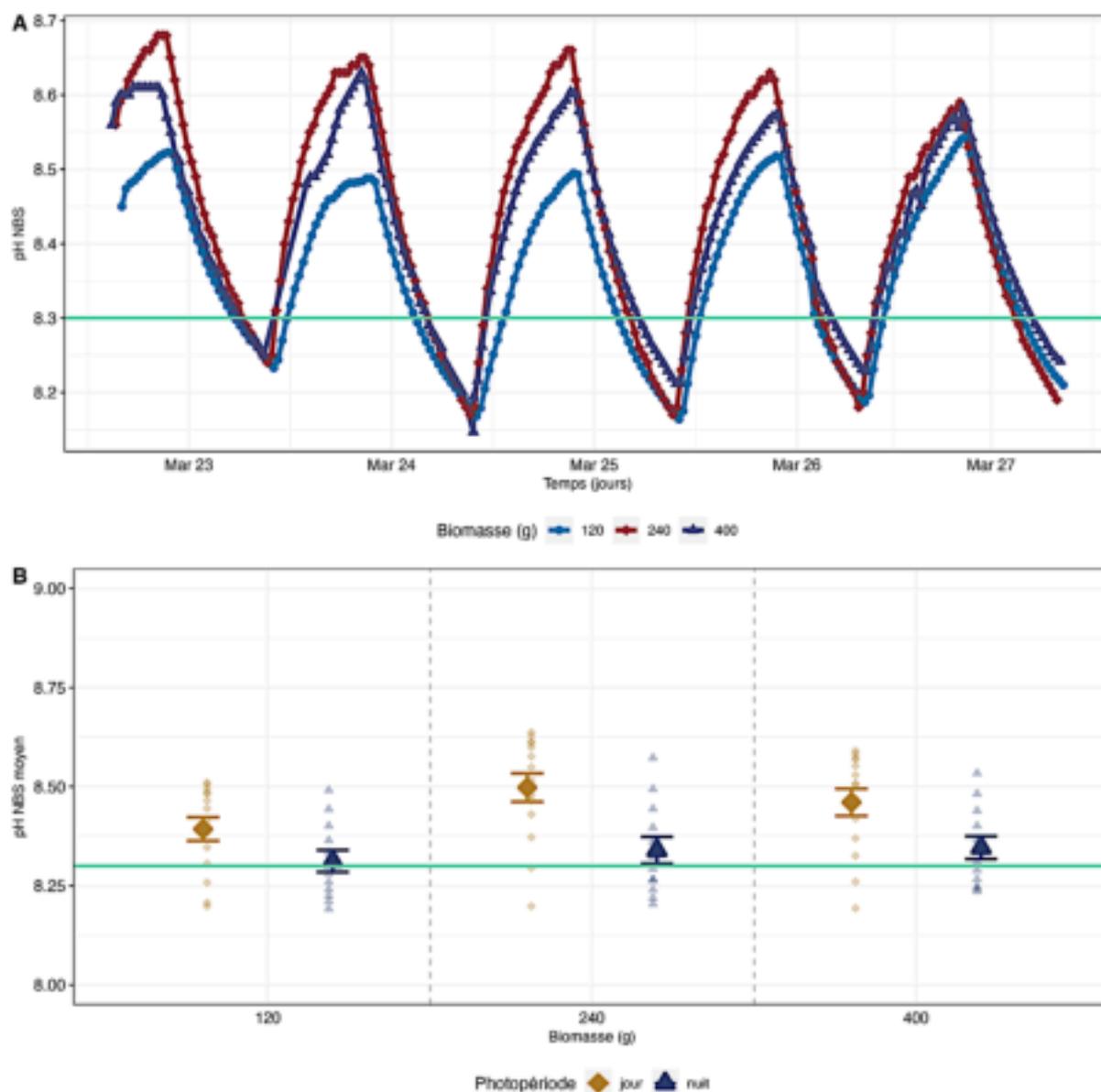


Figure 17. Relevés haute fréquence du pH NBS (A) pour les biomasses algales : 120g, 240g et 400g, pendant une durée de 120h et de pH NBS moyen (B) des relevés HF en fonction de la phase de lumière pour les trois biomasses. Une ligne verte a été tracée pour représenter le pH en condition sans algue, pH = 8,30

Aucun traitement n'abaisse l'acidité de l'eau plus bas que le pH sans algue (cf. figure 17B). Les données à haute fréquence démontrent que la biomasse de 240g produit les effets les plus favorables sur le pH (cf. figure 17A ; courbe rouge). Le pH moyen diurne s'élève à $8,52 \pm 0,01$. Le suivi met en évidence qu'à une biomasse de 120 g (cf. figure 17A ; courbe bleue), les effets des algues sur le pH sont significativement plus faibles (cf. figure 17B ; pH moyen diurne = $8,40 \pm 0,01$). À une biomasse de 400 g (cf. figure 17A ; courbe violette), il n'y a pas de différences significatives entre les pH moyens diurnes.

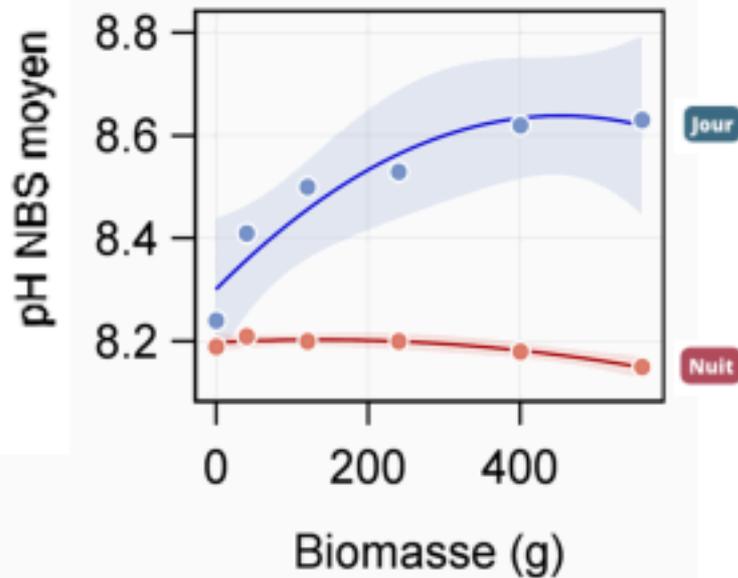


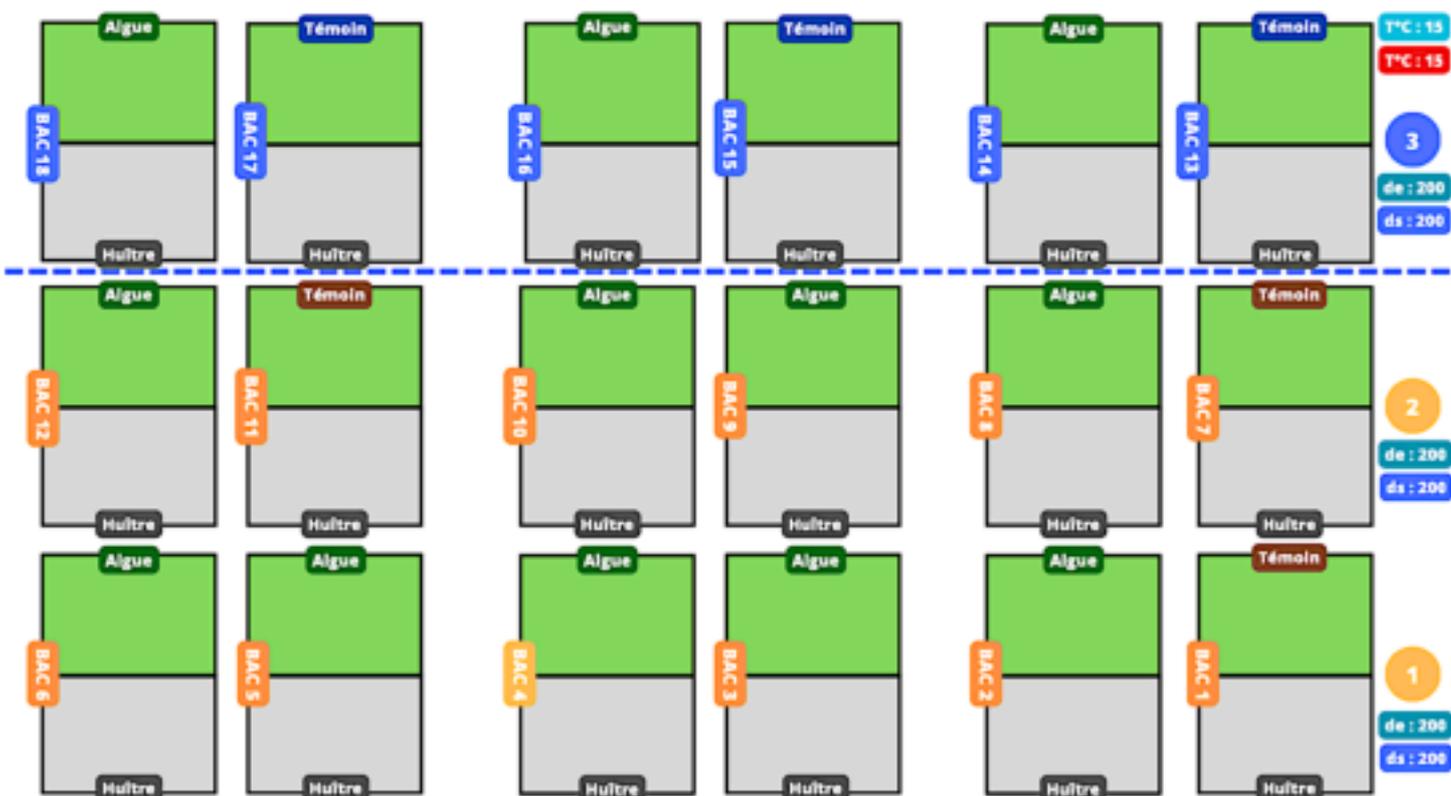
Figure 18. Représentation linéaire des pH NBS moyen par biomasse. La régression est réalisée sur les relevés ponctuels ($n=1$ pour chaque biomasse). La mesure a été effectuée après 7h de lumière et 12 de nuit, sur 120h d'enregistrement

Selon les résultats des relevés ponctuels, représenté en figure 18, le pH pendant la **journée** augmente significativement de manière croissante en fonction de la biomasse (ANOVA « biomasse », $p < 0,005$). Au-delà de 400g de biomasse, l'effet sur le pH diminue.

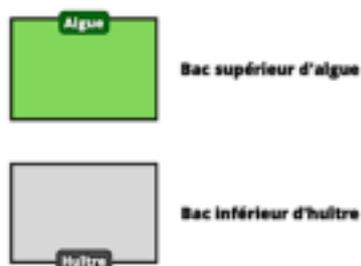
Le pH pendant la **nuit** reste constant (cf. figure 18). À partir de 400g de biomasse, les algues commencent légèrement à réduire le pH.

La biomasse de 400g est considérée comme optimale et sera maintenue pour notre système de co-culture.

Annexe IV – Plan de salle de l'expérience A



LEGENDE



TÉMOIN

Témoïn Bac sans algue EA

Témoïn Bac sans algue EAD

CONSIGNE T°C

T°C : 15 Température consigne de l'eau

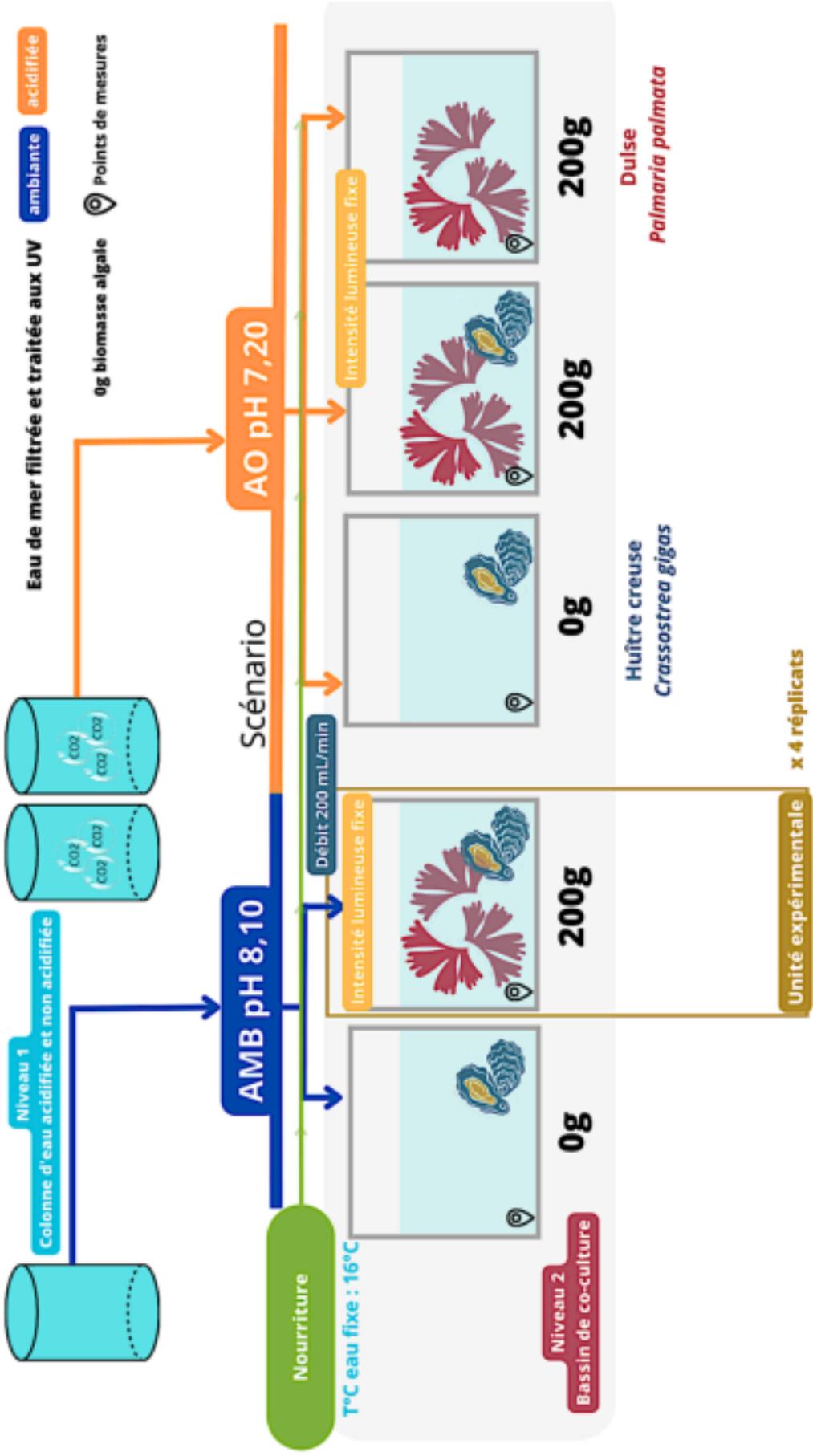
T°C : 15 Température consigne de l'air

CONSIGNE DEBIT

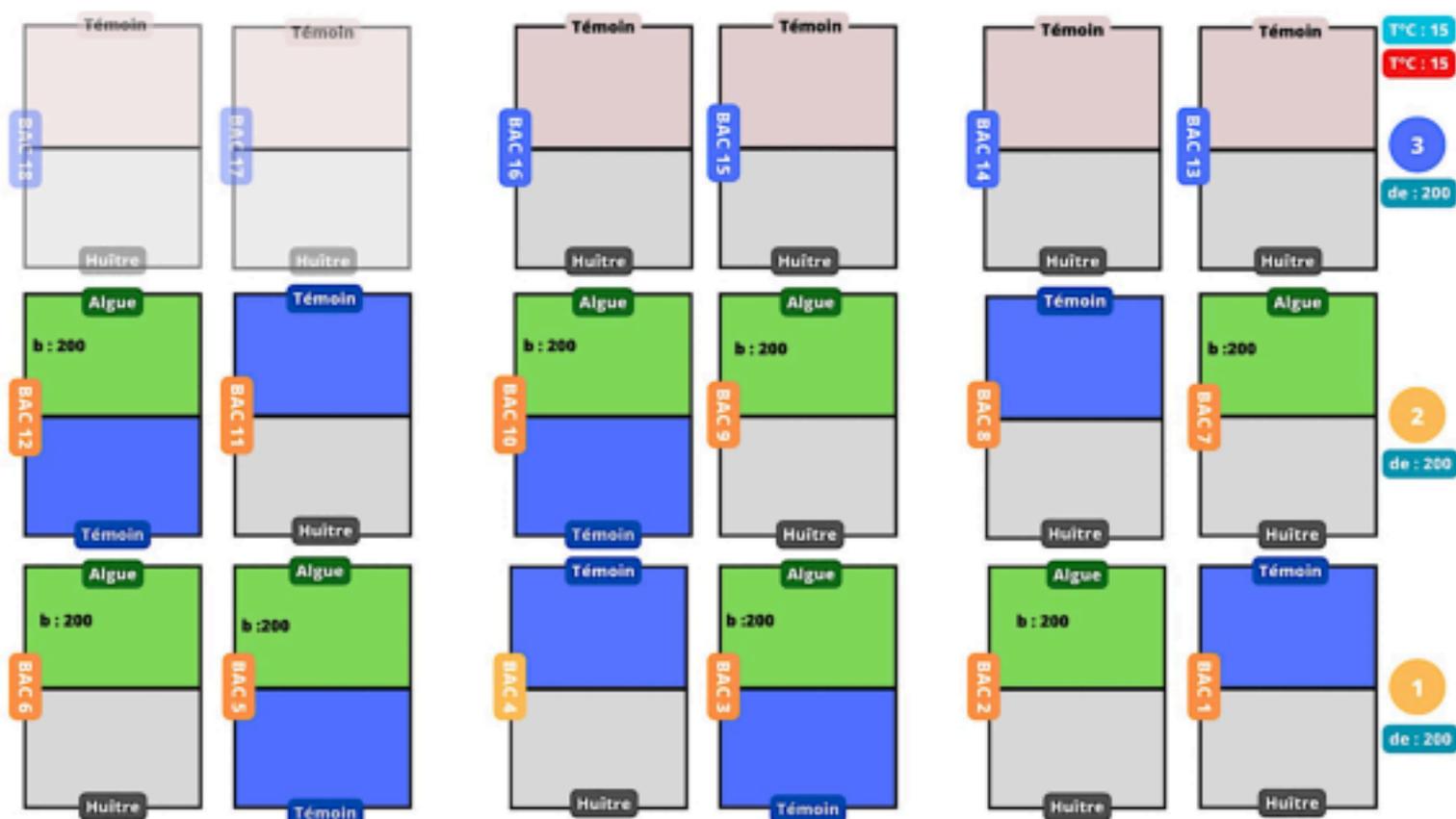
de : 200 Débit d'entrée consigne

ds : 200 Débit de sortie consigne

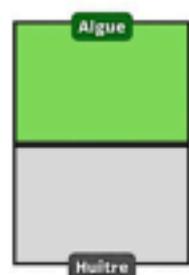
Annexe V – Schéma expérimental de l'expérience B



Annexe VI – Plan de salle de l'expérience B



LEGENDE



Présence d'algue

Présence d'huître

Eau acidifié

BAC 7

Bac alimenté e EA0

2

Colonne d'eau acidifiée

Eau ambiante

BAC 13

Bac alimenté eu EA

3

Colonne d'eau ambiante

TÉMOIN

Témoin

Bac sans algue EA0

Témoin

Bac sans algue EA

CONSIGNE T°C

T°C : 15

Température consigne de l'eau

T°C : 15

Température consigne de l'air

CONSIGNE DEBIT

de : 200

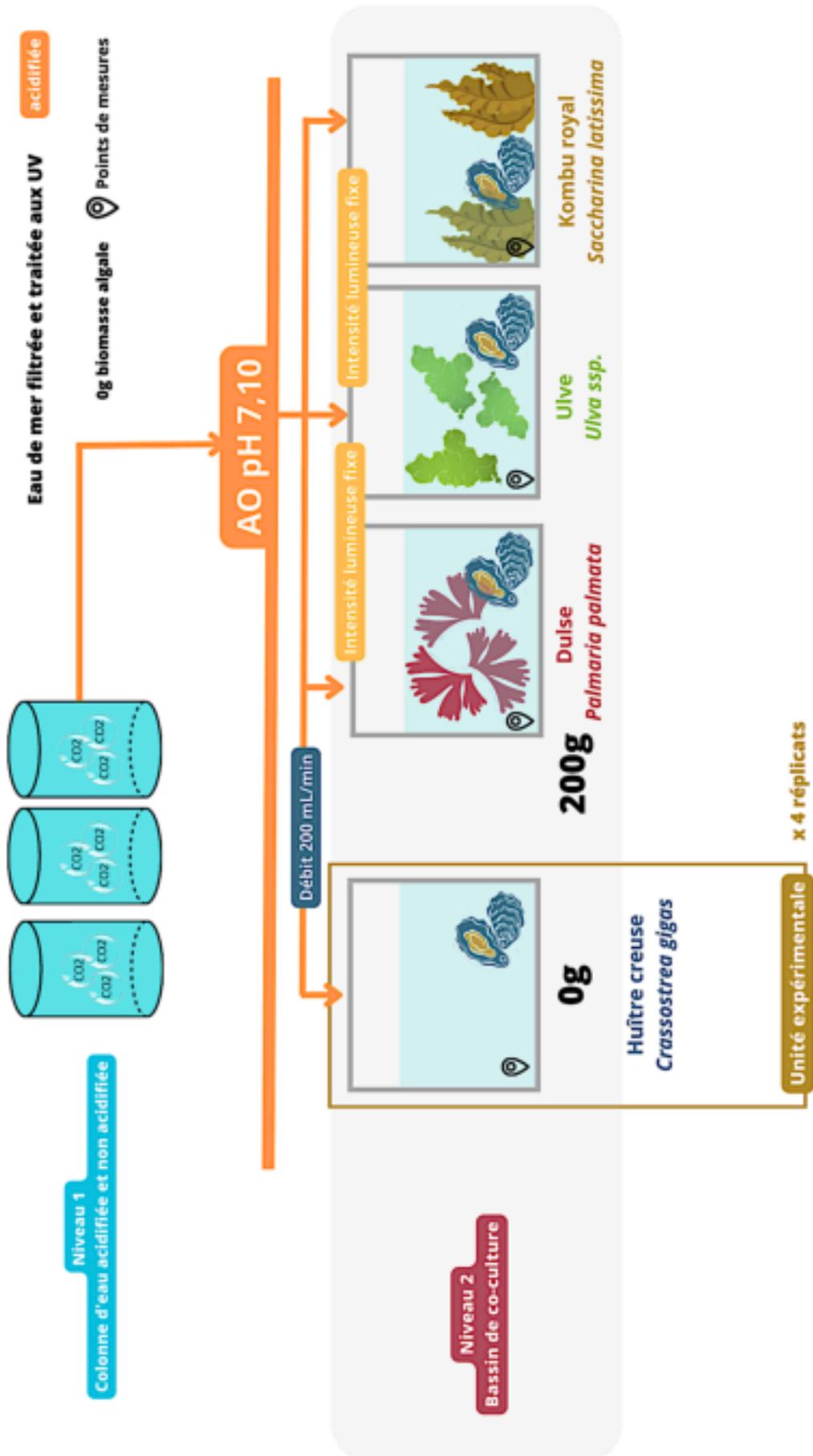
Débit d'entrée consigne

CONSIGNE BIOMASSE

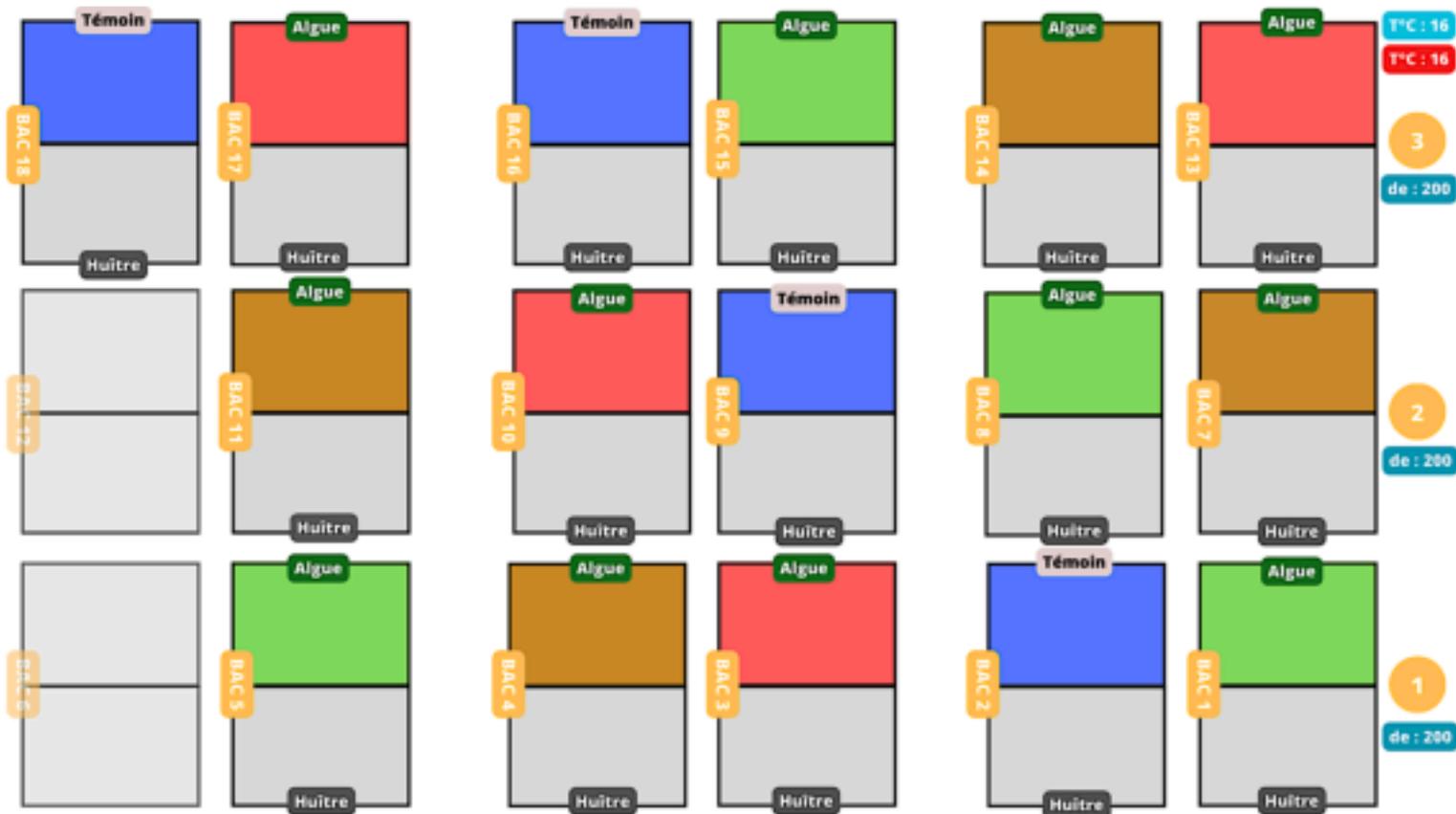
b : 200

Biomasse consigne

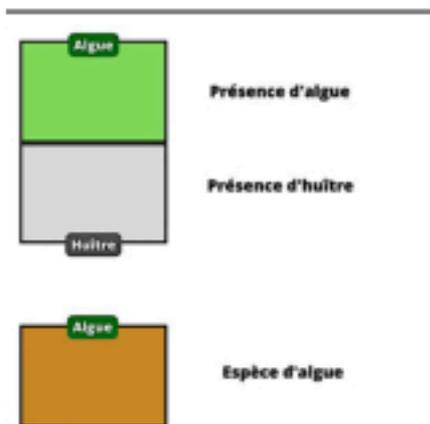
Annexe VII – Schéma expérimental de l'expérience C



Annexe VIII – Plan de salle de l'expérience C



LEGENDE



BAC 7 Bac alimenté eu EA0

2 Colonne d'eau acidifiée

TÉMOIN

Témoin Bac sans algue EA0

CONSIGNE T°C

T°C : 15 Température consigne de l'eau

T°C : 16 Température consigne de l'air

CONSIGNE DEBIT

de : 200 Débit d'entrée consigne

CONSIGNE BIOMASSE

b : 200 Biomasse consigne

Annexe IX – Représentation des données ponctuelles de l'expérience A

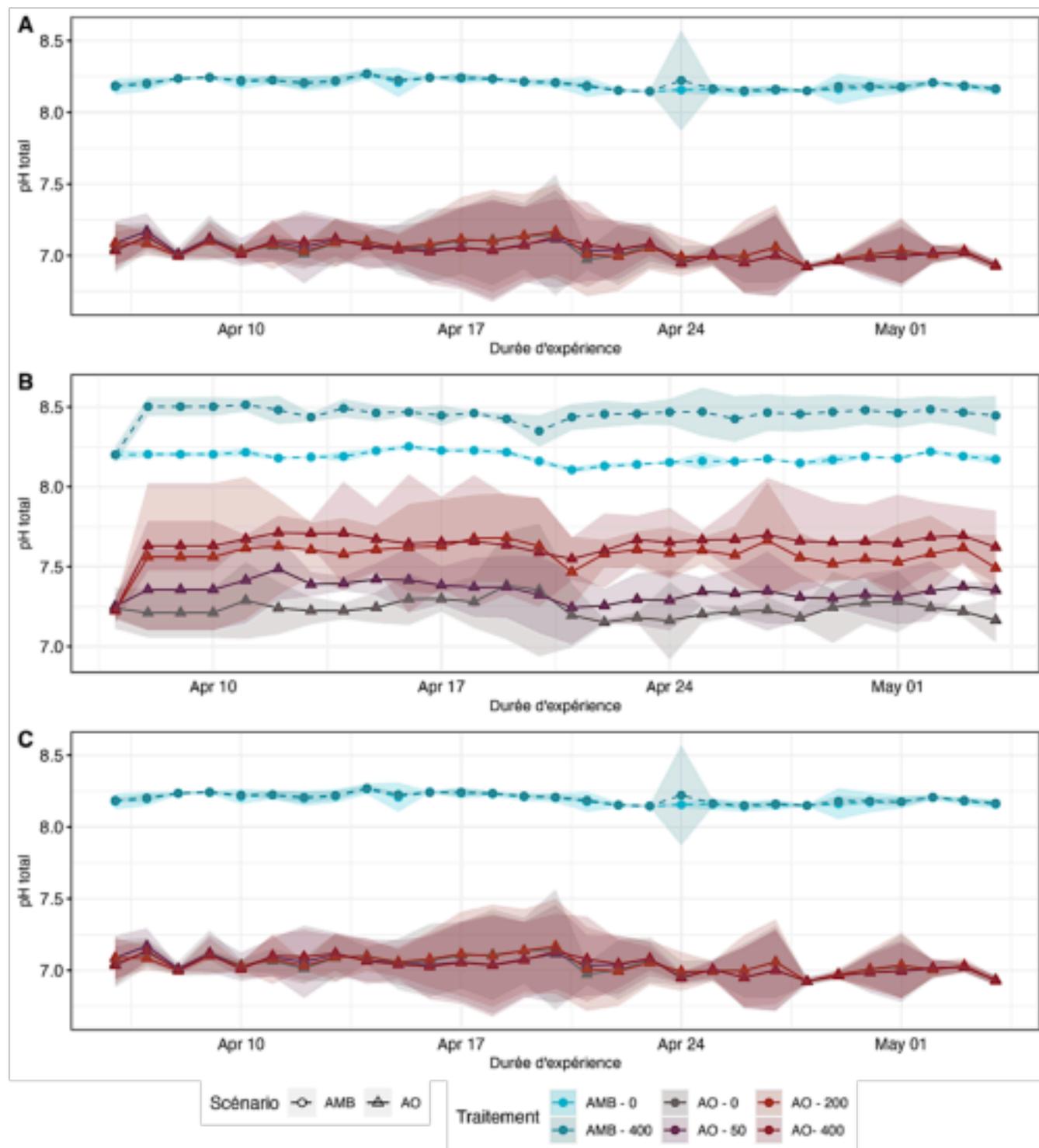


Figure 19. Suivis du pH diurne après 7h de jours pour les 3 niveaux : colonne d'eau (A), bassin d'algue (B) et bassin d'huître (C) pour chaque traitement.

Annexe X – Représentation des données ponctuelles de l'expérience B

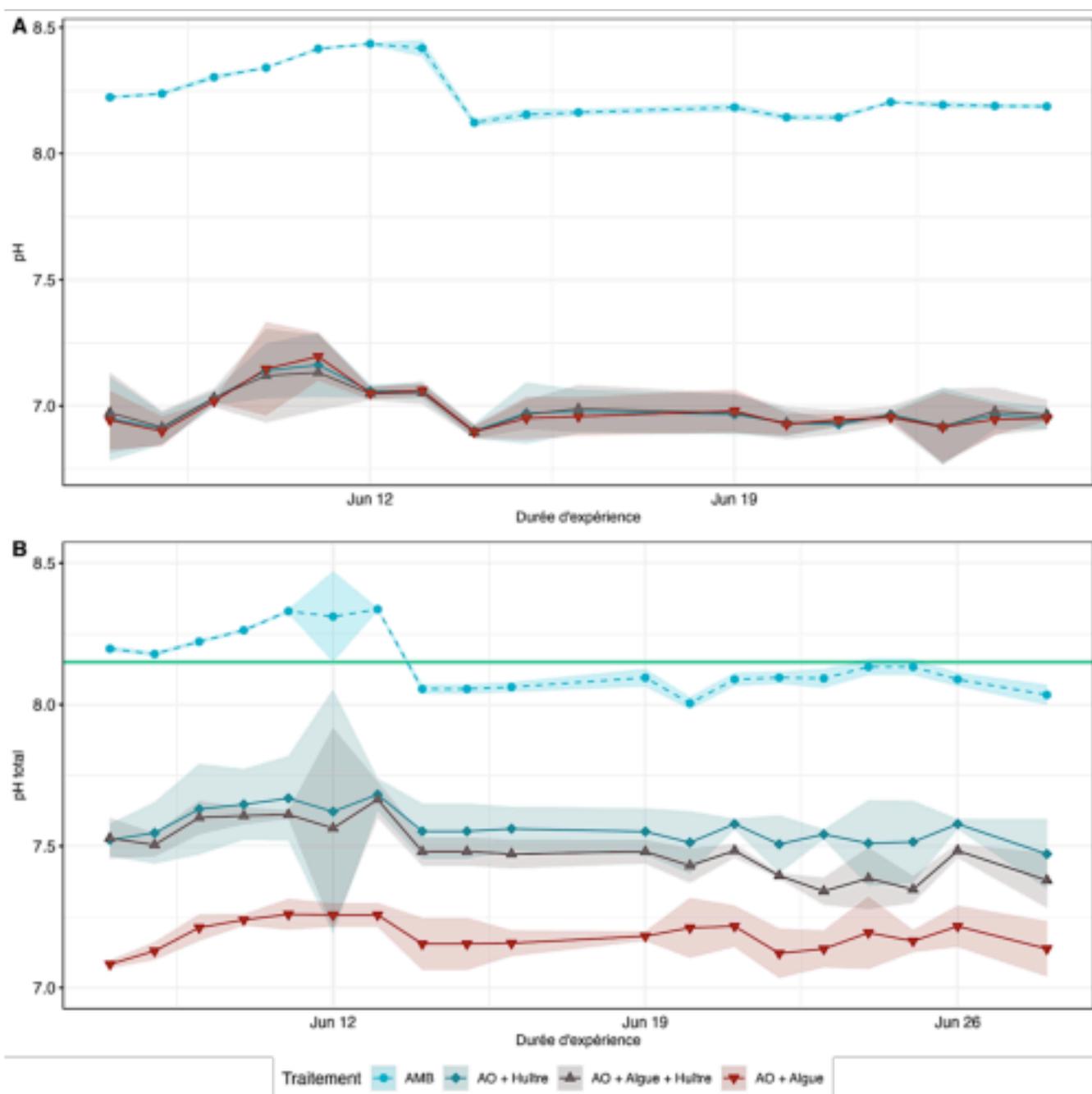


Figure 20. Suivi du pH diurne après 7h de jours pour les 2 niveaux : colonne d'eau (A), bassin de culture (B) pour chaque traitement.

Annexe XI – Représentation des données HF de l'expérience B

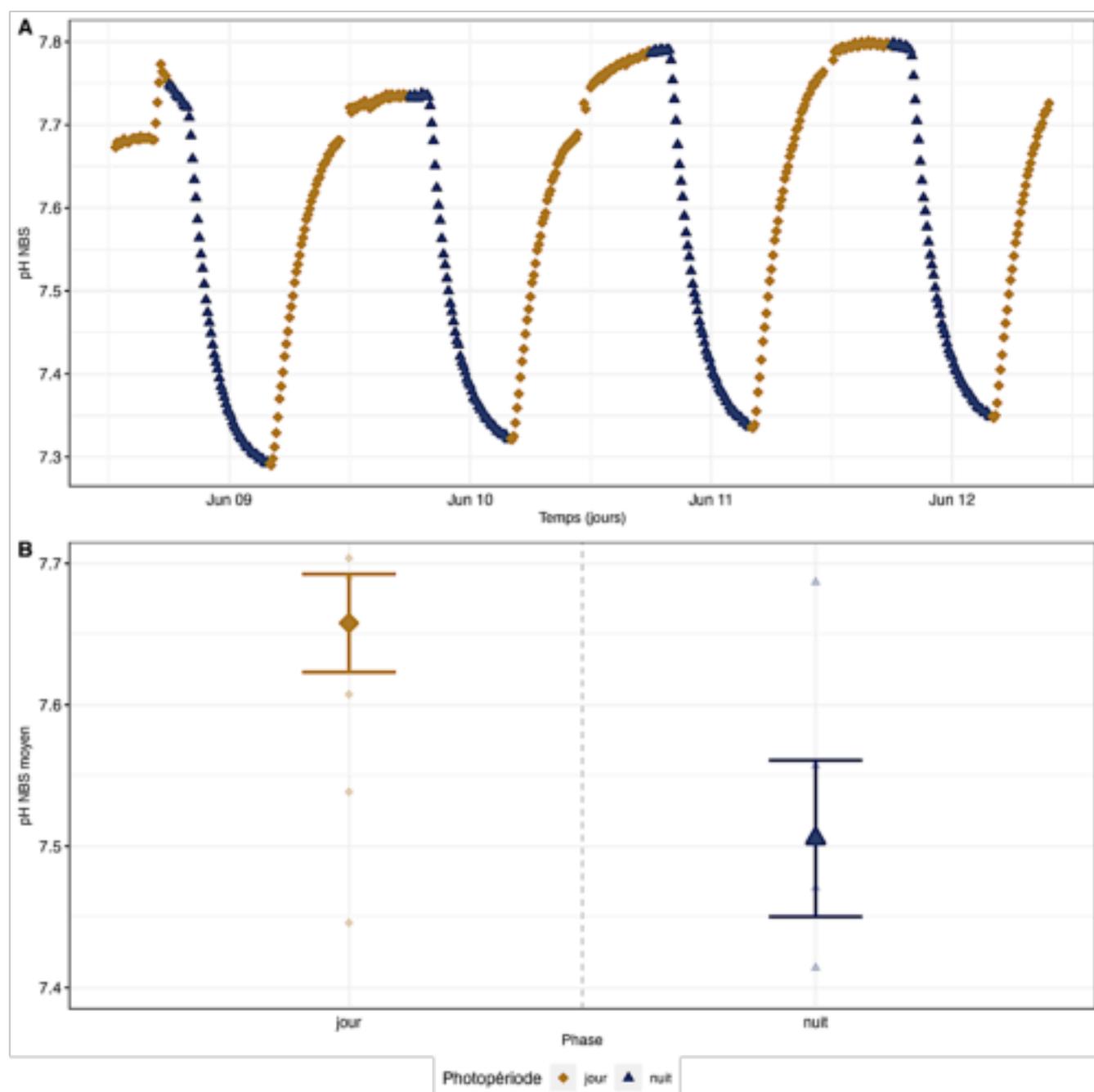


Figure 21. Suivis temporel en haute fréquence du pH dans un bassin de co-culture (algue + huître) et pH NBS moyen en fonction du jour et de la nuit

Annexe XII – Représentation des données en haute fréquence de l'expérience C

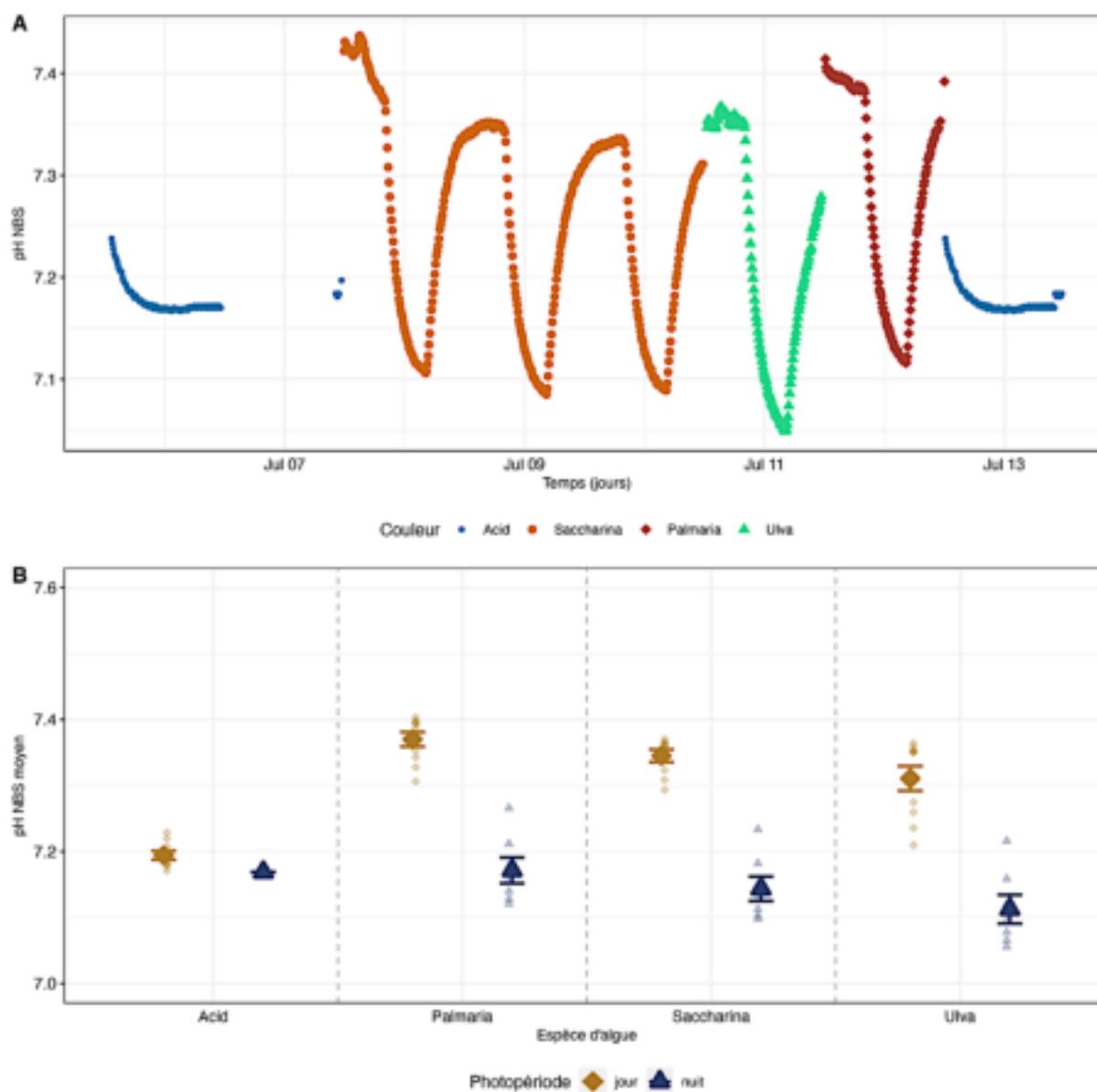


Figure 22. Suivis temporel en haute fréquence du pH et pH NBS moyen en fonction du jour et de la nuit en fonction des traitements

	Diplôme : Ingénieur Spécialité : Agonomie Spécialisation / option : Sciences halieutiques et aquacoles Enseignant référent : Mr Hervé LE BRIS	
	Auteur(s) : Valentin CAVARLÉ Date de naissance* : 08/07/1998	Organisme d'accueil : IFREMER – LEMAR Adresse : 11 Presqu'île du Vivier, 29840 LANDUNVEZ
Nb pages: Annexe(s) :	11 Presqu'île du Vivier, 29840 LANDUNVEZ	
Année de soutenance : 2023	Maître de stage : Mr Fabrice PERNET	
Titre français : Étude du rôle des macroalgues dans l'atténuation des effets de l'acidification sur l'huître creuse <i>Crassostrea gigas</i>.		
Titre anglais: Study of the role of macroalgae in mitigating the effects of acidification on the cupped oyster <i>Crassostrea gigas</i> .		
Résumé (1600 caractères maximum) : L'objet de cette étude se focalise sur l'évaluation des avantages potentiels liés à la co-culture entre les huîtres creuses <i>Crassostrea gigas</i> et des macroalgues dans le contexte de l'acidification des océans. L'objectif de cette recherche est d'analyser de quelle manière les macroalgues peuvent influencer les paramètres physico-chimiques de l'eau de mer et comment cette interaction pourrait impacter la réponse physiologique des huîtres face à l'acidification. Nous avons soumis des huîtres juvéniles à des conditions d'acidification, soit en présence de végétation, soit sans celle-ci. Divers aspects ont été investigués, tels que le choix des algues, les conditions optimales de débit et de biomasse et le système de co-culture. Après plusieurs semaines d'exposition aux conditions expérimentales, nous avons examiné les effets de la végétalisation sur la chimie de l'eau et les caractéristiques macro-physiologiques des huîtres. Les résultats obtenus indiquent que les algues peuvent être considérées comme un refuge chimique pour les huîtres en réponse à l'acidification. Ces végétaux photosynthétiques ont engendré des variations diurnes du pH de l'ordre de 0,40 unité pH. En effet, dans le cas d'une cohabitation entre les deux organismes, la croissance des huîtres peut-être significativement améliorée de 7%. Notre étude apporte une contribution en termes de nouvelles connaissances, visant à approfondir notre compréhension des interactions entre les organismes et les conditions environnementales dans le contexte de l'élevage conchylicole.		
Abstract (1600 caractères maximum) : The purpose of this study focuses on the evaluation of the potential benefits of co-culture between <i>Crassostrea gigas</i> cupped oysters and macroalgae in the context of ocean acidification. The objective of this research is to analyze how macroalgae can influence the chemical parameters of seawater, including pH, and how this interaction could impact the physiological response of oysters to acidification. We subjected juvenile oysters to acidification conditions, either in the presence of vegetation or without it. Various aspects were investigated, such as the choice of algae, optimal flow and biomass conditions and the co-culture system. After several weeks of exposure to experimental conditions, we examined the effects of vegetation on water chemistry and macro-physiological characteristics of oysters. The results indicate that algae can be considered a chemical refuge for oysters in response to acidification. These photosynthetic plants generated diurnal pH variations of the order of 0.40 pH units. Indeed, in the case of cohabitation between the two organisms, oyster growth can be significantly improved by 7%. Our study makes a significant contribution in terms of new knowledge, aiming to deepen our understanding of the interactions between organisms and environmental conditions in the context of shellfish farming.		
Mots-clés : Acidification, conchyliculture, macroalgue, mitigation, pH, remédiation		
Key Words: Acidification, shellfish farming, macroalgae, mitigation, pH, remediation		