

L'Institut Agro Rennes-Angers

☐ Site d'Angers ☒ Site de Rennes

Année universitaire : 2023-2024 Spécialité : Ingénieur agronome Spécialisation (et option éventuelle) : Sciences halieutiques et aquacoles (AQUA)	Mémoire de fin d'études ☒ d'ingénieur de l'Institut Agro Rennes-Angers (Institut national d'enseignement supérieur pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement) ☐ de master de l'Institut Agro Rennes-Angers (Institut national d'enseignement supérieur pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement) ☐ de l'Institut Agro Montpellier (étudiant arrivé en M2) ☐ d'un autre établissement (étudiant arrivé en M2)
--	--

Etude de la dégradation de la laminaire digitée (*Laminaria digitata*) en algue fourrage pour l'aquaculture d'ormeaux (*Haliotis tuberculata*)

Par : Thomas LAMY



Soutenu à Rennes le 13/09/2024

Devant le jury composé de :

Président : Hervé Le Bris

Maîtres de stage : Guillaume Colin, Sylvain Huchette

Enseignant référent : Bastien Sadoul

Autres membres du jury :

Mélanie Cueff, chercheuse, Station Biologique de Roscoff

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

Ce document est soumis aux conditions d'utilisation «Paternité-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 maître de stage ⁽²⁾ : 20/09/2024
(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 Lamy Thomas

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 : 20/09/2024

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.

Date et signature de l'enseignant : 15 octobre 2024

Utilisation de l'Intelligence Artificielle (IA) pour la rédaction du mémoire

L'intelligence artificielle a été utilisée pour améliorer le texte ☐ Oui ☒ Non

Si oui, préciser pour quelle partie de texte et à quelles fins ?

.....
.....
.....

Toute absence de déclaration précise sera considérée comme un manquement aux règles de l'éthique scientifique.

Date et Signature de l'auteur : 20/09/2024

(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

Table des matières

Préambule et remerciements	1.4
Liste des abréviations.....	1.5
Table des annexes.....	1.5
Table des tableaux.....	1.5
Table des figures	1.6
I- Introduction.....	1
I-1) Mise en contexte.....	1
I-1-1) Le marché de l'ormeau en France, une goutte d'eau dans la production mondiale	1
I-1-2) France Haliotis : une entreprise aux productions diversifiées	2
I-2) Modèles biologiques étudiés	3
I-2-1) L'ormeau européen <i>Haliotis tuberculata</i>	3
I-2-2) La laminaire digitée <i>Laminaria digitata</i>	7
I-3) Objectifs de l'étude et problématiques	11
II- La colorimétrie comme indicateur de l'altération de la qualité de <i>Laminaria digitata</i>	12
II-1) Introduction	12
II-2) Matériels et méthodes	12
II-2-1) Matériels biologiques	12
II-2-2) Dispositif expérimental	12
II-2-3) Mesures	12
II-2-4) Analyse des données et représentations graphiques	14
II-3) Résultats	14
II-4) Discussion	16
III- Impact du niveau de dégradation de <i>Laminaria digitata</i> sur sa consommation par <i>Haliotis tuberculata</i>	17
III-1) Introduction.....	17
III-2) Matériels et méthodes	17
III-2-1) Matériels biologiques.....	17
III-2-2) Dispositif expérimental	17
III-2-3) Mesures.....	20
III-3) Résultats.....	21
III-4) Discussion.....	24
IV- Effet de la ration de <i>Laminaria digitata</i> sur sa dégradation et sa consommation par <i>Haliotis tuberculata</i> en cage en mer	25

IV-1) Introduction	25
IV-2) Matériel et méthodes.....	25
IV-2-1) Matériels biologiques	25
IV-2-2) Plan de nourrissage	25
IV-2-3) Mesures	26
IV-3) Résultats	27
IV-4) Discussion	29
V- Effet des pratiques de stockage de <i>Laminaria Digitata</i> sur sa conservation.....	30
V-1) Introduction	30
V-2) Matériels et méthodes	30
V-2-1) Matériels biologiques	30
V-2-2) Dispositif expérimental	31
V-2-3) Mesures	31
V-3) Résultats	31
V-4) Discussion.....	34
Conclusions générales.....	35
Bibliographie.....	36

Préambule et remerciements

Ce stage a été réalisé dans le cadre de ma dernière année d'études d'ingénieur agronome en spécialisation Sciences Halieutiques et Aquacoles option AQUA à l'Institut Agro Rennes-Angers. Il s'est déroulé du 4 mars 2024 au 31 août 2024.

Tout d'abord, je souhaite remercier Sylvain Huchette de m'avoir permis de faire ce stage dans son entreprise ainsi que pour son soutien et la confiance qu'il m'a accordé.

Je remercie également l'ensemble de l'équipe de France Haliotis avec qui j'ai eu le plaisir de travailler durant ce stage (Guillaume, Xavier, Titouan, Alexandre, Lou-Ann, Maryvonne, Amandine, Hélène, Raphaël et Fred). Je remercie tout particulièrement l'équipe de production pour les bons moments passés à terre et en mer. Enfin, je souhaite également remercier Guillaume pour son aide précieuse dans le bon déroulement de mes expériences et l'aide qu'il m'a apporté pour la rédaction de ce mémoire. Je me suis senti pleinement intégré dans cette équipe de personnes passionnées par leur métier.

Je souhaite également remercier mes professeurs de la spécialisation Sciences Halieutiques et Aquacoles de l'Institut Agro Rennes-Angers et en particulier Bastien Sadoul et Hervé Le Bris pour leur passion et leur dévouement à transmettre leurs savoirs sur l'aquaculture.

Enfin, je tiens à remercier mes proches et ma famille pour leur soutien sans faille lors de mes années d'études. En particulier, je remercie chaleureusement mes parents qui n'ont cessé de croire en moi et m'ont toujours soutenu tout au long de mon cursus.

Liste des abréviations

CHBr₃: Bromoforme
CHBr₂Cl : Dibromochloromethane
CH₂I₂: Diiodométhane
CH₂ClI : Chloriodométhane
D1 : *Laminaria digitata* peu dégradée
D2 : *Laminaria digitata* moyennement dégradée
D3 : *Laminaria digitata* très dégradée
HT : Hors Taxes
LD10 : *Laminaria digitata* à 10kg/compartiment
LD15 : *Laminaria digitata* à 15kg/compartiment
LD20 : *Laminaria digitata* à 20kg/compartiment
ROI : Region Of Interest, zone analyse ImageJ
ROS : Reactive Oxygen Species
TAC : Taux Autorisés de Capture
TTC : Toutes Taxes Comprises
T10 : Témoin à 10 kg/compartiment
T15 : Témoin à 15 kg/compartiment
T20 : Témoin à 20 kg/compartiment

Table des annexes

Annexe I : Cage d'élevage d'ormeaux. A) Cage d'élevage. B) Relevée de cage en mer. C) Compartiment _____	1
Annexe II : Schéma d'une filière en mer. © France Haliois _____	2
Annexe III : Evolution de la colorimétrie de <i>L. digitata</i> en fonction du temps passé en décanteur.	3

Table des tableaux

Tableau 1 : Valeurs moyennes d'intensité des couches colorimétriques et de l'écart par rapport à la référence Eab selon les niveaux de dégradation _____	22
--	----

Table des figures

Figure 1 : Evolution de la pêche et de l'aquaculture de l'ormeau au cours du temps d'après les estimations de Cook (2023) et de (FAO (2022)).	1
Figure 2 : Evolution des productions aquacoles d'ormeaux au cours du temps en fonction des pays producteurs. A) Principaux producteurs mondiaux. B) Principaux producteurs hors Chine (Cook, 2023)	2
Figure 3 : Aire de répartition des 3 sous-espèces d' <i>Haliotis tuberculata</i> (Chauvaud, 2022)	3
Figure 4 : Anatomie d' <i>Haliotis tuberculata</i> . A) Vue transversale. B) Vue ventrale. C) Vue dorsale. ©Gabi Reichert	4
Figure 5 : Cycle de vie de <i>Haliotis tuberculata</i> (Lachambre et al., 2017).	6
Figure 6 : Cycle de production de l'ormeau chez France Haliotis	6
Figure 7 : Anatomie de sporophyte de <i>Laminaria digitata</i> (Roeder, 2006) A) Sporophyte entier. B) Coupe transversale au niveau de la lame. ©Thomas Schoepke	8
Figure 8 : Zone de récolte d'algues ("Géoportail," n.d.)	9
Figure 9 : Evolution des biomasses et rendements de récolte de <i>Laminaria digitata</i> à France Haliotis.	10
Figure 10 : Protocole d'analyse colorimétrique. A) Zones d'échantillonnage de <i>Laminaria digitata</i> . B) Cube de photographie utilisé. C) Exemple de série d'échantillons d'algues	13
Figure 11 : Pertes de matières cumulées de différents lots de <i>Laminaria digitata</i> au cours du temps	15
Figure 12 : Evolution de l'intensité des pixels des couches colorimétriques L*, a* b* et de l'écart par rapport à des algues fraîches Eab de différents lots de <i>Laminaria digitata</i> .	15
Figure 13 : Modélisation d'un bassin d'expérimentation. © T.Lamy	18
Figure 14 : Plan d'expérimentation de l'impact de la dégradation algale sur sa consommation par l'ormeau. (D1) : algues peu dégradées, (D2) : algues moyennement dégradées, (D3) : algues très dégradées, (T1) : algues peu dégradées en absence d'ormeau, (T2) : algues moyennement dégradées en absence d'ormeau, (T3) : algues très dégradées en absence d'ormeau	19
Figure 15 : Modélisation d'un aquarium d'expérimentation. © T.Lamy	19
Figure 16 : Plan d'expérimentation des tests de préférence alimentaire (D1) : algues peu dégradées, (D2) : algues moyennement dégradées, (D3) : algues très dégradées, (T1) : algues peu dégradées en absence d'ormeau, (T2) : algues moyennement dégradées en absence d'ormeau, (T3) : algues très dégradées en absence d'ormeau	20
Figure 17 : Quantité dégradée moyenne de <i>Laminaria digitata</i> en fonction du niveau de dégradation en absence d'ormeaux	22
Figure 18 : Quantité consommée et dégradée selon le niveau de dégradation des laminaires	23
Figure 19 : Croissance en longueur des ormeaux à la fin de l'expérience en fonction du niveau de dégradation des laminaires distribuées	23
Figure 20 : Plan expérimental de distribution des algues dans les cages immergées	26
Figure 21 : Evolution de la température au milieu des algues selon la quantité distribuée lors de l'expérience. Les flèches représentent les moments de remontée des cages	27
Figure 22 : Evolution de l'intensité des pixels des couches colorimétriques L*, a* b* et de l'écart par rapport à des algues fraîches Eab selon la quantité de <i>Laminaria digitata</i> distribuée.	28
Figure 23 : Plan expérimental de l'effet des pratiques de stockage sur le conservation	31
Figure 24 : Evolution des températures selon les conditions de stockage.	32
Figure 25 : Evolution de l'intensité des pixels des couches colorimétriques L*, a* b* et de l'écart par rapport à des algues fraîches Eab de de <i>Laminaria digitata</i> selon les conditions de stockage.	33
Figure 26 : Quantité d'algue dégradée et consommée selon les conditions de stockage.	33

I- Introduction

I-1) Mise en contexte

I-1-1) Le marché de l'ormeau en France, une goutte d'eau dans la production mondiale

Le marché de l'ormeau bénéficie de deux sources d'approvisionnement : la pêche et l'aquaculture. Selon Cook (2023), la pêche légale totale d'ormeaux dans le monde est passée de 20 000 tonnes en 1970 à 5 850 tonnes en 2021. Ce déclin global est dû notamment à la surexploitation des stocks à laquelle s'ajoutent dans certains cas la pêche illégale, l'apparition de maladies et la dégradation des habitats. L'effondrement des captures est valable pour presque toutes les espèces observées et dans tous les océans étudiés (Figure 1). Cet effondrement est tel que Cook (2023) estime que seuls 4 pays possèdent encore une activité de pêche réellement significative. Ces pays sont la Nouvelle-Zélande, l'Australie, le Mexique et le Japon. L'ensemble de leurs captures reste tout de même en diminution. La situation est d'autant plus critique que ces données ne prennent en compte que la pêche légale alors que la pêche illégale en 2008 était estimée à 60 % des captures totales légales dans le monde (Cook and Gordon, 2010).

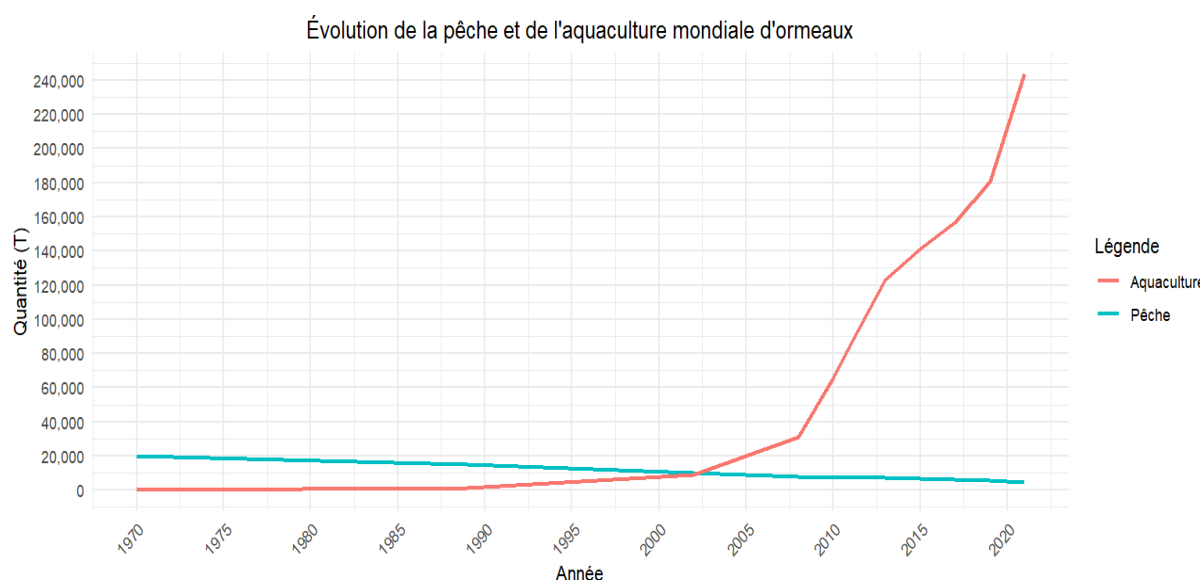


Figure 1 : Evolution de la pêche et de l'aquaculture de l'ormeau au cours du temps d'après les estimations de Cook (2023) et de la FAO (2022).

Cette diminution des captures est également observable en France, ceci malgré la mise en place d'une réglementation stricte pour la protection de la ressource en France. Le quota pour la pêche de loisir est par exemple limité à 20 individus par jour et par pêcheur, le TAC est de 9 cm. ("Direction départementale des territoires et de la mer, 2022). L'utilisation de bouteilles de plongée n'est autorisée que pour les pêcheurs professionnels qui ont obligation de baguer chaque ormeau pêché. Chaque pêcheur se voit attribuer un nombre annuel défini de bagues dans le respect des quotas de pêche. Ils doivent également respecter le TAC de 9 cm (CDPMEME22 ,” n.d.).

Le déclin des pêcheries a renforcé le développement de l'aquaculture (Figure 2). Actuellement, plus de 95 % des ormeaux vendus dans le monde proviennent de l'aquaculture. La Chine domine le marché avec une production en 2023 estimée à 217 431 tonnes représentant près de 95 % du marché (FAO, 2022).

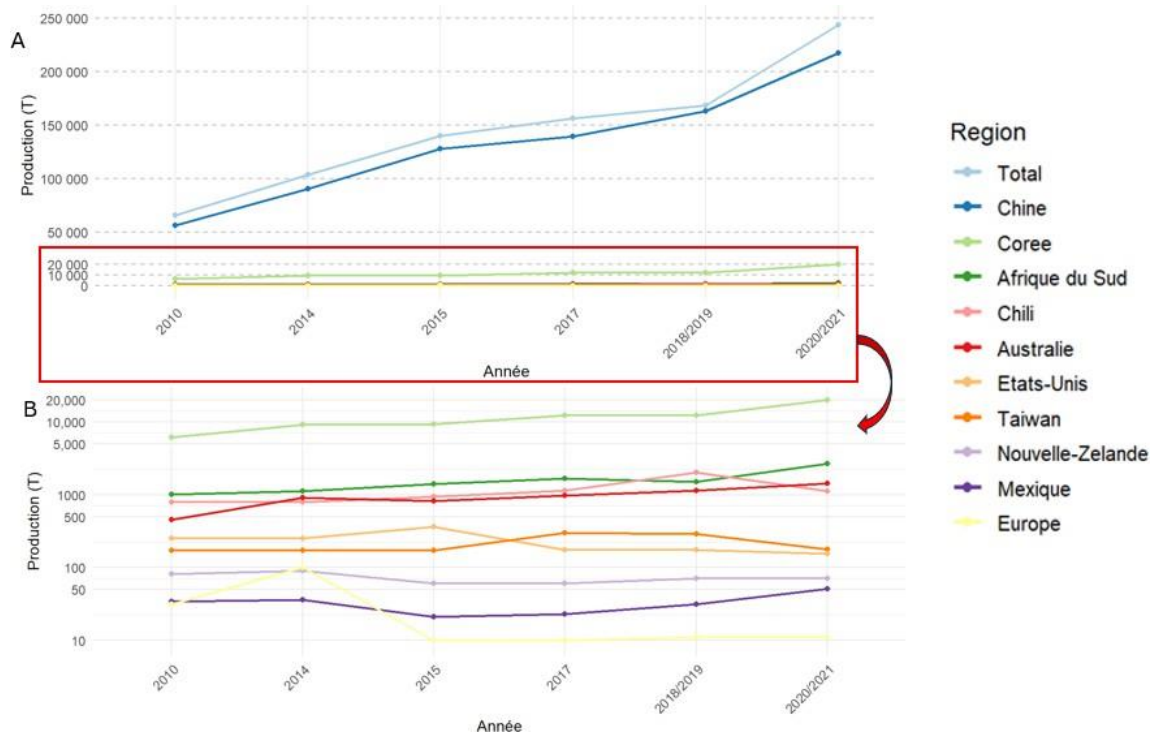


Figure 2 : Evolution des productions aquacoles d'ormeaux au cours du temps en fonction des pays producteurs. A) Principaux producteurs mondiaux. B) Principaux producteurs hors Chine (Cook, 2023).

En France, la seule espèce produite est *Haliotis tuberculata*. Cette espèce a commencé à être cultivée à partir des années 1990. On ne compte que deux entreprises d'élevage d'ormeaux. La production peut être à terre, comme chez Groix Haliotis, ou en mer comme chez France Haliotis. La production aquacole française d'environ 10 t/an est minime et représente moins de 0,005% de la production mondiale.

I-1-2) France Haliotis : une entreprise aux productions diversifiées

France Haliotis est une entreprise de production d'ormeaux. Elle présente également des activités de production et de transformation d'algues. L'entreprise a été créée par Sylvain Huchette en 2004 à la suite d'un doctorat réalisé en Australie sur l'élevage de l'ormeau. Elle se situe au cœur de l'Aber Wrac'h à Plouguerneau (29) en Bretagne. L'entreprise dispose d'une surface à terre de 2 400 m² destinée à la production d'algues et de 550 m² pour la production d'ormeaux. Ces espaces comprennent les bassins destinés aux premiers stades de développement des ormeaux, quelques grands bassins de production d'algues, les laboratoires de transformation d'algues mais aussi les locaux du personnel et l'espace de vente. France Haliotis dispose également de 7 hectares de concessions en mer destinées aux cages de grossissement d'ormeaux et aux filières d'algues, pour un total de 1,4 km de filières.

Les produits proposés à la vente sont des ormeaux entiers, ou de la chair d'ormeaux vendus à des prix respectifs de 75 € TTC/kg et 196 € TTC/kg. Il y a également une gamme d'algues séchées et vendues sous forme de paillettes (laitue de mer, kombu royal, Ao nori...) et de produits transformés type tartinades ("France Haliotis, producteur d'ormeaux," n.d.). La vente se fait directement sur site aux particuliers ou sur commande aux restaurateurs. Bien que les ormeaux produits par France Haliotis soient en général plus onéreux que les ormeaux pêchés qui ont un prix moyen de 58€ HT/kg (RNM, 2024) soit 62,07€/kg en appliquant la TVA réduite sur les produits de la mer (Direction Général des Finances Publiques, 2012), ils sont plébiscités par les restaurateurs car ils constituent une source d'approvisionnement sûre et garantie toute l'année. Enfin, les ormeaux d'aquaculture sont généralement décrits comme plus tendres que ceux issus de la pêche.

I-2) Modèles biologiques étudiés

I-2-1) L'ormeau européen *Haliotis tuberculata*

i) Biologie

Haliotis tuberculata est un gastéropode marin de l'ordre des *Vetigastropoda* et de la famille des *haliotidae*. On le retrouve en Europe et en Afrique du Nord (Chauvaud, 2022) (Figure 3).

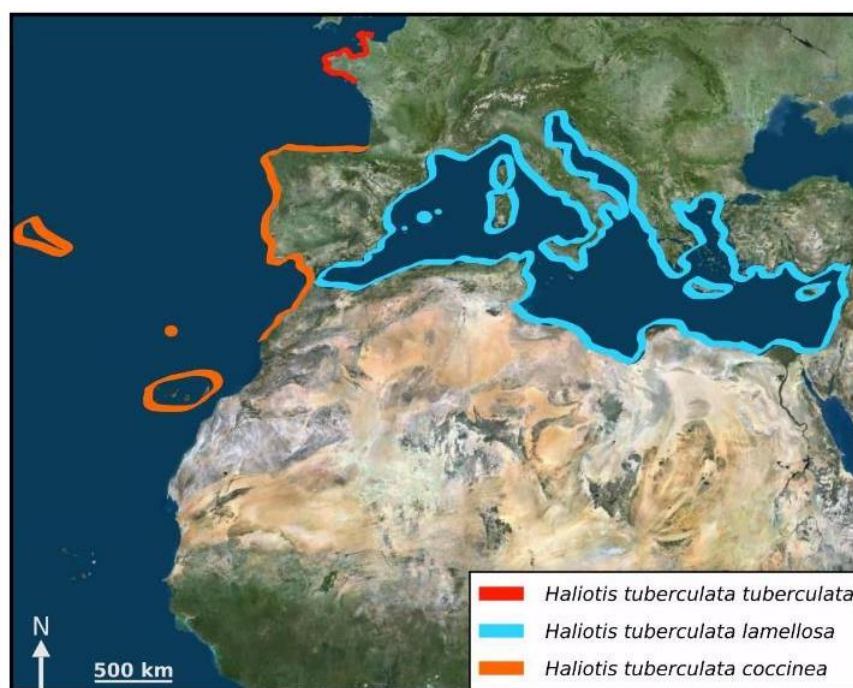


Figure 3 : Aire de répartition des 3 sous-espèces d'*Haliotis tuberculata* (Chauvaud, 2022).

On le retrouve dans des zones rocheuses subtidales de faibles profondeurs (en dessous de 15 m) (Forster, 1962; Shepherd, 1973; Billy and Péronnet, 2003). Ces zones lui permettent de se camoufler et de se fixer solidement avec son pied (Mgaya, 1994; Le Petit, 2009). Clavier (1987) a également observé que parmi les zones de substrats durs, des différences de colonisation étaient observables. Les substrats présentant de nombreuses failles abritaient des densités plus importantes d'ormeaux. L'ormeau est en général sédentaire avec de rares déplacements pour rechercher de la nourriture (Clavier and Richard, 1984).

L'ormeau européen est reconnaissable à sa coquille en forme d'oreille dont il tire son nom (*haliotis* étant la contraction des mots *halieus*, « de mer », et *ôtós*, « oreille » en grec ancien). Cette coquille composée de carbonate de calcium (CaCO_3) sur 2 épaisseurs recouvre l'ensemble de l'animal (Auzoux-Bordenave et al., 2010). On y retrouve des orifices le long de l'axe de croissance. Ces orifices appelés trous exhalants permettent la respiration, l'expulsion des fèces ainsi que le relâchement des gamètes lors de la reproduction (Clavier, 1987). La coquille est liée au corps de l'ormeau par un muscle adducteur appartenant au pied. Ce pied, aussi appelé muscle pédieux, est extrêmement développé et représente environ 40 % du poids frais d'un individu adulte (Clavier, 1987; Lachambre et al., 2017). Il permet à l'ormeau de s'ancrer solidement au sol via des fibrilles cylindriques formant des interactions de Van der Waals avec le substrat. (Li et al., 2008; Li et al., 2018). Le pied peut également produire du mucus pour favoriser le mouvement (Le Petit, 2009). Enfin, c'est une réserve de glycogène et protéines importante pour l'animal en situation de stress ou de reproduction (Clavier, 1987; Le Petit, 2009). En dehors du pied, l'ormeau possède un système digestif comprenant la bouche sur la partie ventrale, l'œsophage, l'estomac, la glande digestive et l'anus. La bouche est pourvue d'une langue râpeuse appelée radula permettant d'arracher les algues en morceaux. L'ormeau dispose aussi d'un système de transport d'oxygène et d'immunité via l'hémolymphe qui est alimentée par le cœur (Le Petit, 2009). Cette hémolymphe passe par les reins pour l'élimination des déchets ammoniacaux et alimente le système respiratoire composé des branchies et du manteau (Lachambre et al., 2017) (Figure 4).

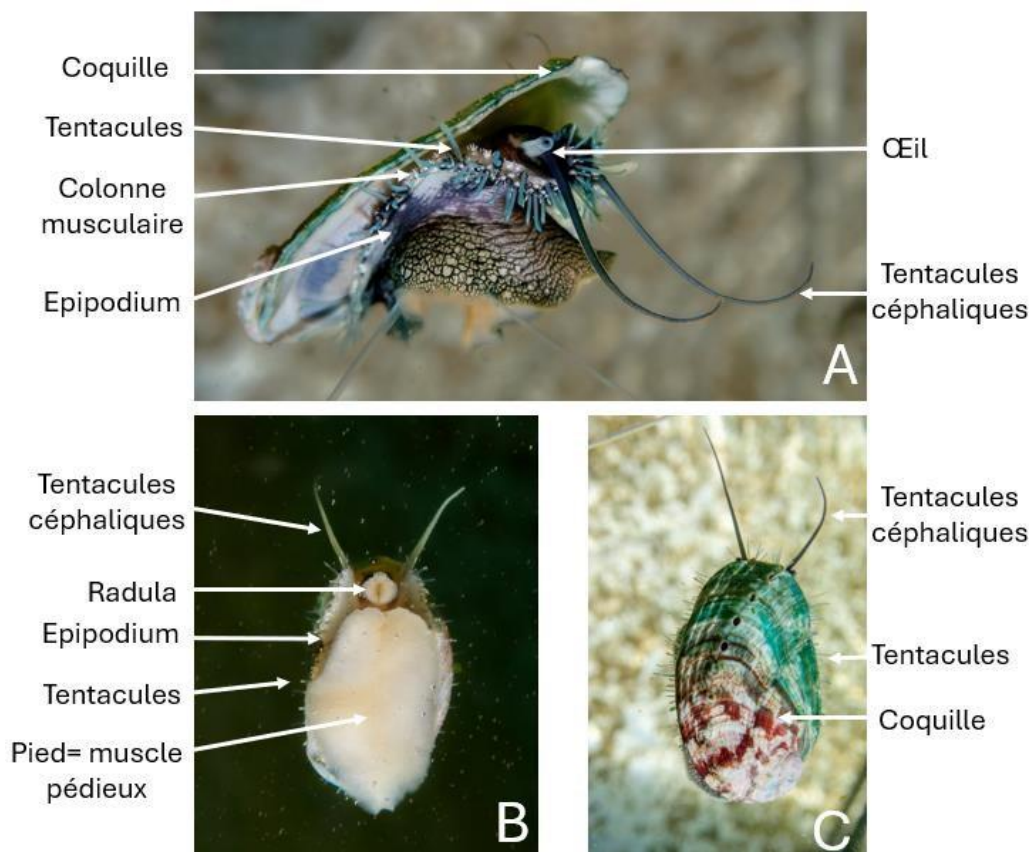


Figure 4 : Anatomie d'*Haliotis tuberculata*. A) Vue transversale. B) Vue ventrale. C) Vue dorsale.
©Gabi Reichert

Les ormeaux ont une espérance de vie pouvant atteindre 15 ans (Clavier and Richard, 1986). Les plus gros spécimens trouvés en pêche, en Bretagne, sont de 14 cm (Huchette and Clavier, 2004). La croissance est cependant très lente et discontinue au cours de la vie de l'animal. Il faut ainsi 5 ans pour que des animaux sauvages atteignent une taille de 8 cm (Cochard, 1982 ; Clavier, 1987). Selon Clavier et Richard (1986), le taux de croissance augmente progressivement jusqu'à 2,5 ans. Ils rapportent la présence à Saint Malo d'individus de 3-4 mois ayant une taille de 3 mm, puis 10 mm à 1 an et enfin 35 mm à 2,5 ans. Cependant, Forster (1967), considère que le taux de croissance commence à diminuer après 3 ans puisqu'il fait état d'une croissance de 15 mm/an jusqu'à ce que l'animal atteigne une taille de 50 mm. Ensuite, le taux de croissance diminue progressivement jusqu'à 1 mm/an et devient presque nul.

La croissance et le taux de survie des ormeaux sont dépendants de nombreux facteurs biotiques : la prédation (Shepherd, 1973; Mottet, 1978), la concurrence intra spécifique et de facteurs abiotiques : la saisonnalité, la température de l'eau (Clavier and Richard, 1986) etc... Parmi ces facteurs, l'alimentation peut être considérée comme déterminante dans la croissance de l'animal.

L'ormeau est principalement phytophage. Il consomme des algues rouges, brunes ou vertes avec une préférence pour les algues rouges (Mottet, 1978; Viera et al., 2015). Par exemple sur 8 espèces d'algues testées (*Enteromorpha intestinalis*, *Asparagopsis armata*, *Saccharina latissima*, *Ulva Lactuca*, *Saccorhiza polyschides*, *Palmaria palmata*, *Laminaria hyperborea*), *L. digitata* était la seconde espèce la moins appréciée, la plus appréciée étant *Enteromorpha intestinalis* (IDEALG, 2019). Ses préférences alimentaires sont majoritairement dictées par l'espèce de l'algue, son contenu en protéine et sa texture (Roussel et al., 2020b). Plusieurs études ont permis de démontrer qu'un régime alimentaire varié permet d'optimiser la croissance (Mai et al., 1995; Basuyaux et al., 2018).

ii) Cycle de production

France Haliotis maîtrise l'ensemble des stades d'élevage d'*Haliotis tuberculata*. Le cycle de production dure en moyenne 4 ans mais peut varier d'une année de plus ou de moins suivant les saisons et les individus. On distingue 5 phases dans le cycle d'élevage : l'induction de la fécondation, le stade larvaire, la phase de nurserie et la phase de grossissement (Figure 5).

L'ormeau est une espèce gonochorique à fécondation externe. À France Haliotis, la fécondation se fait avec des géniteurs sélectionnés sur leur phénotype et conditionnés préalablement. La ponte se fait généralement entre mai et juin. À la suite de l'éclosion, les larves passent par différents stades embryonnaires (morula, blastula et gastrula) (Cardinaud et al., 2014) puis passent au stade de larves trochophores. Les larves restent pélagiques pendant 55 heures après la naissance. À la suite de ce délai, sous forme de larves véligères, elles cherchent à se fixer au fond. Elles sont alors déplacées dans les bassins de nurseries sous serres. Ces bassins d'un volume de 3500 litres chacun contiennent environ 22 paniers de 20 plaques de plexiglass. A partir de cette étape, les larves ont besoin d'alimentation externe pour leur croissance. C'est pourquoi, les plaques en plexiglass sontensemencées avec *Ulvella lens*. Cette algue permet également de favoriser la fixation de l'ormeau sur la plaque. Ceci constitue leur alimentation pendant la phase de nurserie jusqu'à ce qu'ils atteignent une taille de 4 mm. Ils sont alors capables de s'alimenter avec des macroalgues (Basuyaux et al., 2018) et sont nourris avec des ulves.

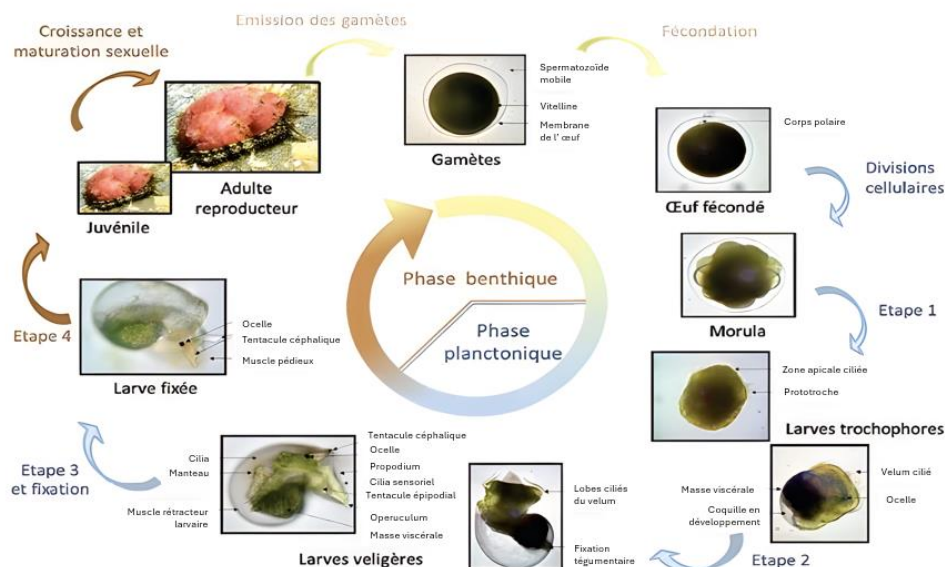


Figure 5 : Cycle de vie de *Haliotis tuberculata* (Lachambre et al., 2017).

Après environ 6 mois en nurserie (en décembre) un tri est effectué : les individus d'une taille inférieure à 12 mm sont maintenus en nurserie jusqu'au printemps. Les autres sont envoyés en élevage en mer dans des cages fabriquées par l'entreprise constituées de 4 palox de 550 L assemblés. Sur la partie supérieure des côtés de la cage, de l'herbe synthétique a été apposée. Cette surface rugueuse permet d'éviter aux ormeaux de s'échapper. À l'intérieur de la cage, des coupelles de captage ostréicoles sont mises en place pour augmenter la surface d'élevage et servir d'abris aux animaux. Les cages sont refermées par un couvercle pour éviter la prédation, l'échappement des individus et le braconnage (Annexe I). On compte environ 2 400 individus par cage. Les cages, posées dans 15 m de fond, sont reliées par une filière maintenue par des corps morts de 1,5 T chacun (Annexe II). Une fois par mois, les cages sont remontées à l'aide d'une grue placée sur le bateau pour alimenter les ormeaux. Ils sont nourris avec des algues fraîches (par ordre décroissant de quantité distribuée : *Laminaria digitata*, *Palmaria palmata*, *Saccharina latissima* et *Ulva sp*) issues de la collecte sur l'estran ou de la culture. Le grossissement en mer dure en général 3 ans jusqu'à ce que les ormeaux atteignent une taille commercialisable (6 à 8 cm) (Figure 6).

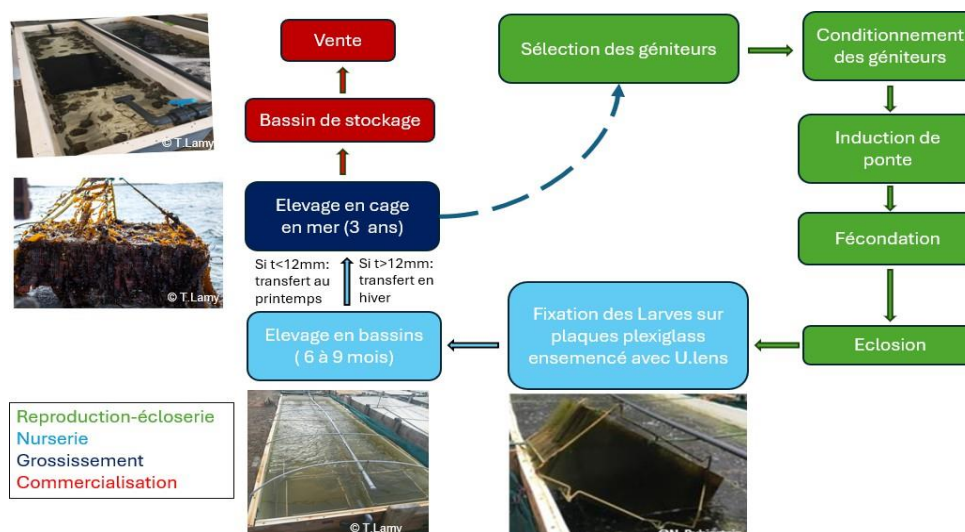


Figure 6 : Cycle de production de l'ormeau chez France Haliotis.

I-2-2) La laminaire digitée *Laminaria digitata*

i) Biologie

Les laminaires digitées sont des algues brunes de l'infralittoral qui font partie du phylum des *Chromophycota* et de la famille des *Laminariaceae* (Marlin, n.d.). Elles ont été décrites pour la première fois de façon systématique par Lamouroux en 1813. On retrouve les laminaires digitées dans des eaux relativement froides, leur optimal de température se situant entre 11 °C et 13 °C (Perez, 1971). On peut observer des champs de laminaires en Atlantique Est, du Spitzberg (archipel des Svalbard norvégiens) au nord du golfe de Gascogne (Arzel, 1997). Les surfaces occupées par les champs de laminaires sont cependant en forte diminution notamment sur plusieurs sites français (Delebecq et al., 2016). Les forêts de laminaires sont notamment menacées par les changements climatiques (Bracken, 2019; Liesner et al., 2022). En effet, l'augmentation des températures (Lima and Wetthey, 2012; Liesner et al., 2020) et la multiplication des anomalies de température (Hobday et al., 2016; Oliver et al., 2018) provoquent un stress important sur les populations de laminaires (Delebecq et al., 2016).

Les champs de laminaires sont pourtant vitaux dans l'équilibre de plusieurs écosystèmes. Ils servent de refuge à de nombreuses espèces épiphytes. En effet, leur longueur permet de multiplier les surfaces d'adhésion pour la faune et la flore. Drach (1949) estime par exemple que les frondes représentent 12 à 16 fois la surface des roches. Les crampons sont également le refuge de nombreuses espèces d'amphipodes, de décapodes, d'oursins, de mollusques mais aussi de poissons (Moore, 1973; Leblanc et al., 2011). Enfin, ce sont des puits à carbone (Krause-Jensen and Duarte, 2016). Pour se développer, elles ont besoin d'un substrat dur (roche, bloc ou galet). On les retrouve entre +1 m et -25 m par rapport au 0 des cartes marines. Elles émergent à partir de coefficients de marée de 90. On les retrouve dans des zones aussi bien exposées que protégées de la houle (Arzel, 1997; Mesnildrey et al., 2012).

En France, pour préserver la ressource, la pêche de *Laminaria digitata* est extrêmement réglementée. Les seuls engins autorisés sont le scoubidou et le peigne à laminaire. La Bretagne est la principale région de récolte en France (CRPMEM Bretagne, 2022). Le nombre de licences de pêche est limité à 39 pour l'ensemble de la région. La Bretagne est découpée en 8 secteurs de récolte distincts. Dans la zone 4 du Finistère, où récolte France Haliotis, 12 licences sont enregistrées. La période d'ouverture maximale de la pêche embarquée est du 15 avril au 15 octobre (CRPMEM, 2023). Très rare, la récolte à pied des laminaires est moins encadrée, il est autorisé de déraciner les algues des rochers et la pêche est ouverte toute l'année (Mesnildrey et al., 2012). Il est tout de même obligatoire de déclarer chaque récolte en la localisant à l'aide d'une carte carroyée. La récolte annuelle française de *Laminaria digitata* se situe entre 50 000 et 60 000 tonnes (Marfaing, 2020).

Les laminaires digitées peuvent mesurer jusqu'à 4 m de long (Mesnildrey et al., 2012). Elles disposent d'un crampon leur permettant de se fixer au substrat. Le crampon est relié au méristème par le stipe. Ce méristème se subdivise en lames de différentes tailles qui grandissent de façon apicale au fur et à mesure de la croissance (Figure 7).

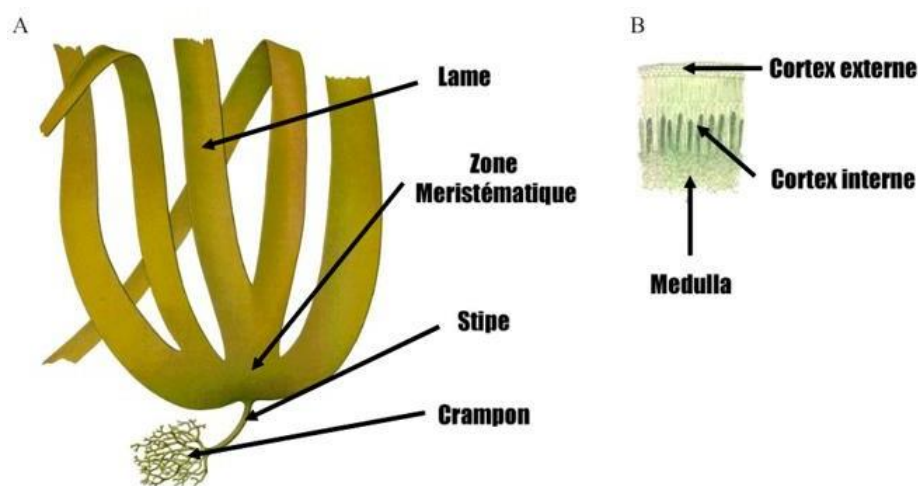


Figure 7 : Anatomie de sporophyte de *Laminaria digitata* (Roeder, 2006) A) Sporophyte entier. B) Coupe transversale au niveau de la lame. ©Thomas Schoepke

On peut observer sur les individus adultes des taches brunâtres au niveau de la partie terminale de la fronde. Ces marques sont des sores qui renferment les sporocystes. Les sporocystes renferment eux-mêmes entre 32 et 64 spores. Durant les deux périodes d'émission des spores en juillet-août et novembre-décembre, les sporocystes vont s'ouvrir et libérer les spores. Ceux-ci vont se fixer en profondeur et germer quelques heures après la libération. Après 1 à 1,5 mois, le fruit de cette germination est un gamétophyte haploïde qui aura une taille de quelques centimètres (Crépineau et al., 2000). Le gamétophyte mâle va relâcher des spermatozoïdes qui vont aller féconder les oosphères des gamétophytes femelles. L'œuf fécondé va ensuite germer pour former un sporophyte diploïde qui aura une taille d'environ 5 cm après 5 mois (Belsher, 1986).

Les laminaires sont des algues pérennantes ayant une espérance de vie d'environ 6 ans (Belsher, 1986). On observe des pics de croissance du stipe en mai et en novembre. Lors de ces pics, il y a une augmentation à la fois du diamètre et de la longueur du stipe. La croissance est alors respectivement de 0,4 %/jour et 0,6 %/jour. Au contraire, on observe un arrêt de croissance en février et de juillet à septembre. La croissance de la lame est quant à elle maximale d'avril à juin et minimale d'octobre à février. La croissance n'est pas uniforme sur l'ensemble de la lame. Elle est la plus forte sur une zone entre 2 et 10 cm de la zone méristématique. La croissance est également dépendante de l'âge de l'algue : 100 cm/an pour les thalles de 2 ans, 150 cm/an pour les thalles de 3 ans et 118 cm/an pour les thalles de 4 ans (Gayral, 1966).

La croissance des laminaires peut être impactée par différents stress. Un stress peut être décrit selon les travaux de Claude Bernard, Walter B. Cannon et Hans Selye comme un facteur pouvant nuire à l'homéostasie (processus de régulation des différentes constantes du milieu intérieur) et par conséquent à l'intégrité de l'organisme étudié (Goldstein and Kopin, 2007). De nombreux facteurs peuvent être à l'origine d'un stress. Ces facteurs peuvent être biotiques (pathogènes, brouteurs) ou abiotiques (rayonnement UV, variation de température, de salinité, privation de nutriments, dessiccation etc...) (Collén et al., 1994; Mtolera et al., 1996; Pedersén et al., 1996; Küpper et al., 2001; Aguilera et al., 2002; Roleda et al., 2006). Ces stress peuvent être à l'origine d'une saturation des différentes voies enzymatiques et non enzymatiques participant à la détoxification des espèces réactives de l'oxygène (ROS) et par conséquent à

l'accumulation de ROS non détoxifiés (Mallick and Mohn, 2000; Aguilera et al., 2002). Cette accumulation peut être fortement nuisible à la cellule car elle va provoquer l'inhibition de la photosynthèse et surtout l'oxydation des lipides, protéines, et acides nucléiques de la cellule qui vont conduire à son autodestruction (Bischof and Rautenberger, 2012). Parmi les mécanismes de défense des laminaires, on peut observer l'apparition d'un burst oxydatif (Küpper et al., 2001) et la libération d'iode ainsi que de composés volatiles iodés comme le CH_2I_2 et le CH_2ClI (Keng et al., 2020) et de composés bromés comme le CHBr_3 et le CHBr_2Cl (Keng et al., 2020). Ces composés ont une action détoxifiante, une action antimicrobienne (Lingens and van Pée, 1988) et anti-herbivore (McConnell and Fenical, 1980). Une autre molécule, la laminarine, aurait également une action antimicrobienne en cas de stress (Klarzynski et al., 2000).

ii) Cycle de production

Chez France Haliotis, la zone de récolte des laminaires s'est progressivement étendue au fil des années pour atteindre une distance limite à l'est de plus de 11 km et de plus de 8 km à l'ouest de l'entreprise (Figure 8). La surface totale d'exploitation des algues est de 39,9 ha. Au total, 6 grands sites de récolte réguliers sont identifiés et enregistrés. A chaque récolte, le site de récolte et la quantité prélevée sont enregistrés pour réaliser le suivi des prélèvements sur le milieu. Pour éviter la surexploitation des sites, un délai d'un an est mis en place entre deux récoltes sur un même site. Il est important d'éviter un prélèvement excessif de la ressource car la récolte est relativement onéreuse et la ressource limitée : le coût en ramassage de lamineaire pour produire 1 kg d'ormeaux est respectivement de 5,94 € au printemps et 1,68 € en été, tandis que ce coût est de 2,51 € au printemps et 1,07 € en été avec de la *Palmaria palmata* (document interne, Colin 2016). La saison de récolte des laminaires commence en général en janvier pour se terminer en septembre.

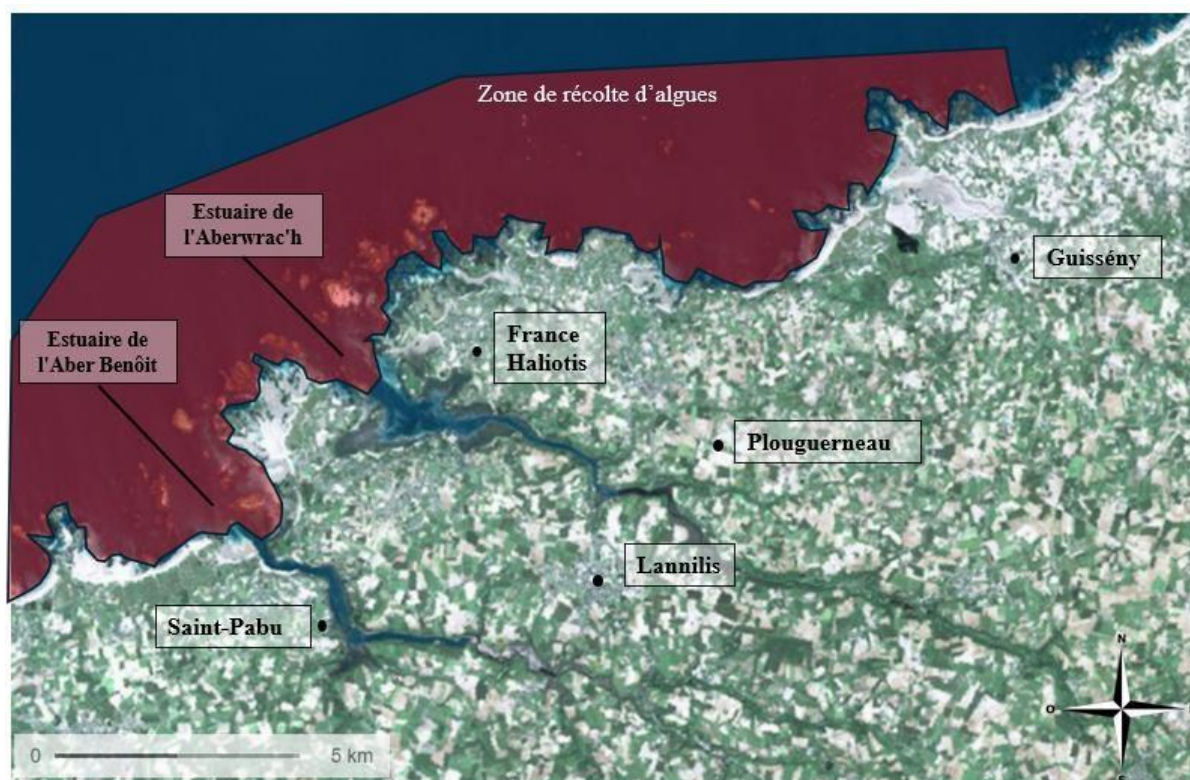


Figure 8 : Zone de récolte d'algues ("Géoportail," n.d.).

La surface d'exploitation de *Laminaria digitata* est estimée à 0,7 ha. Ceci correspond à 1,75% de la surface totale exploitée. Le rendement y est en revanche très important : 0,71 kg/m³ contre 0,09kg/m³ pour *S.latissima* et 0,15 kg/m³ sur la période juillet à décembre 2016.

Malgré une forte variabilité interannuelle de la ressource (IDEALG, 2019), les quantités de *Laminaria digitata* récoltées sont importantes avec par exemple plus de 116 tonnes récoltées en 2023 soit plus de 70 % de la quantité totale d'algue récoltée et un rendement de plus de 332kg d'algue récolté/heure (Figure 9).

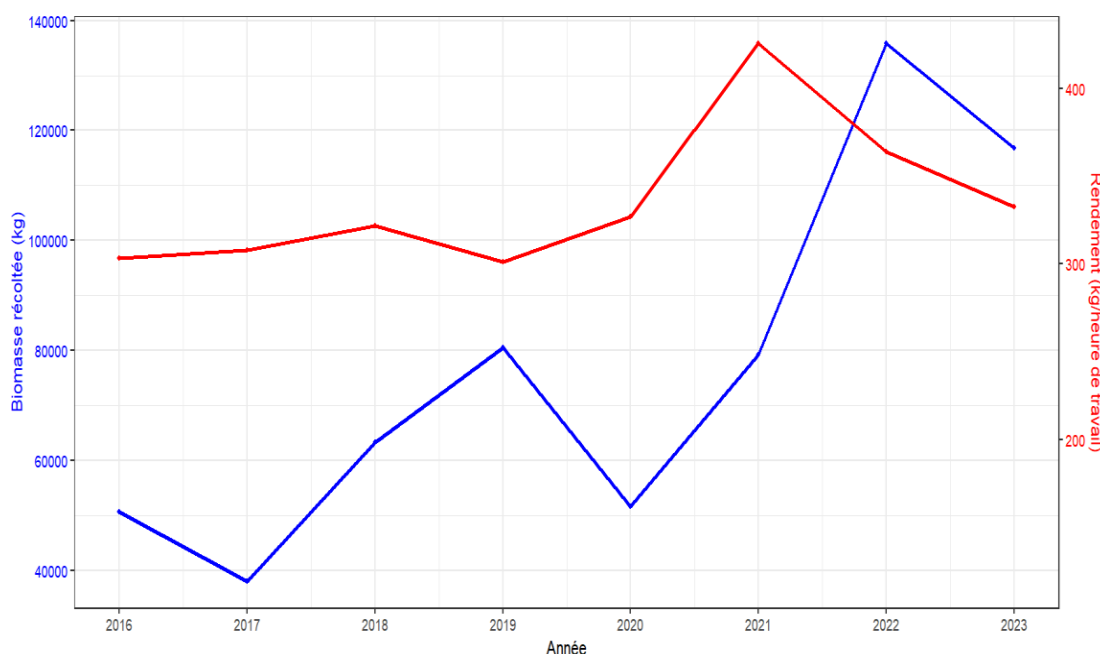


Figure 9 : Evolution des biomasses et rendements de récolte de *Laminaria digitata* à France Haliotis.

Lors de la récolte, les laminaires sont coupées au niveau du stipe à l'aide d'une serpette et chargées dans des annexes en aluminium au fur et à mesure de la récolte. A la fin de la récolte, les annexes sont chargées dans des bacs alimentaires à l'aide d'une grue sur le bateau « Abalone » qui est chargé de la distribution aux ormeaux. Une partie des algues issues de la récolte est distribuée le jour même. Les algues restantes sont mises en cages et immergées pour la nuit ou laissées en bac sur le pont du bateau pour la nuit. Ces algues seront ensuite distribuées le lendemain (J1 après la récolte). Chaque cage d'ormeaux du parc est relevée au moins une fois par mois à la grue pour le nourrissage. Les laminaires sont alors distribuées approximativement sans pesée préalable dans chaque compartiment de la cage. La cage est ensuite refermée et remise à l'eau.

I-3) Objectifs de l'étude et problématiques

Il est couramment admis que la croissance des ormeaux est fortement dépendante de l'alimentation qui leur est apportée (Mai et al., 1995; Basuyaux et al., 2018). Les algues ayant une importante proportion de protéines permettent de maximiser la croissance des ormeaux. Bien que le taux de protéines de *Laminaria digitata* soit relativement faible par rapport aux autres espèces d'algues utilisées (*Saccharina latissima*, *Ulva* sp de culture, *Palmaria palmata*) (CEVA, 2021; Commentaire personnel, Colin), elle est distribuée de façon presque exclusive durant la période estivale (avril-août). Le choix de *Laminaria digitata* s'explique par sa grande disponibilité par rapport aux autres algues de récolte, notamment par rapport à la dulse qui devient moins abondante du fait de l'augmentation de la pression pêche suscitée par l'augmentation de sa consommation et par conséquent de son intérêt commercial (Commentaire personnel, Colin). Les algues de culture (kombu et ulves) étant également utilisées pour la vente en alimentation humaine, leur disponibilité en fourrage pour les ormeaux est dépendante de ce marché.

L'utilisation conséquente de *Laminaria digitata* pousse donc à chercher à améliorer les pratiques liées à son utilisation. Actuellement, les cages d'ormeaux sont relevées une fois par mois pour la distribution de laminaires. La ration distribuée par compartiment semble se situer entre 13kg et 21kg. Un premier travail consiste donc à mesurer plus précisément quelle est actuellement la quantité distribuée aux ormeaux. Avec la ration actuelle, il est parfois observé une altération des algues lors de la levée mensuelle des cages. Il convient donc de développer un outil permettant de rendre compte objectivement de l'état physiologique des algues distribuées (Expérience 1) et de tester si les variations d'état physiologique ont un impact sur la consommation des algues par les ormeaux (Expérience 2). Ensuite, on se propose de tester si la quantité d'algue distribuée a un impact sur la cinétique de dégradation des laminaires, la consommation des ormeaux et leur croissance (Expérience 3). Ceci permettra par la suite d'optimiser la ration distribuée. Enfin, après la récolte, une partie des algues est stockée pendant une nuit à l'air libre, l'autre partie est stockée en cages immergées. Il est par conséquent nécessaire de tester si ces différences de conditions de stockage ont un impact sur la qualité des laminaires par rapport à des algues distribuées le jour de la récolte (Expérience 4).

II- La colorimétrie comme indicateur de l'altération de la qualité de *Laminaria digitata*

II-1) Introduction

Les algues destinées à l'alimentation des ormeaux étant distribuées mensuellement, on peut suspecter une détérioration de celles-ci au cours du temps lorsqu'elles sont placées dans les cages. Pour tester l'hypothèse d'une dégradation des algues, il faut donc mettre en place un outil de mesure de cette dégradation. La relevée des cages et par conséquent l'appréciation du niveau de dégradation des algues restantes dans la cage se faisant en mer, l'outil d'évaluation des algues doit être rapide sans nécessiter de matériel complexe. C'est pourquoi, on envisage l'utilisation de la colorimétrie comme indicateur de la dégradation des laminaires. En effet, d'après (CRPMEM Bretagne, 2022), lorsque *Laminaria digitata* subit un stress, sa couleur aura tendance à passer du brun au jaune-verdâtre. Ces affirmations sont en accord avec les observations faites sur le terrain (Annexe III). D'autres études font également la corrélation entre les taux de pigments (notamment de chlorophylle a) et la capacité photosynthétique (Wheeler, 1980; Blain and Shears, 2019). La capacité photosynthétique pouvant être impactée par la dégradation (de Bettignies et al., 2020), la mesure de la colorimétrie pourrait être un indicateur indirect de la dégradation des laminaires. Cette expérience a donc pour objectif de tester si la colorimétrie peut être utilisée comme critère pour renseigner sur l'état de dégradation de *Laminaria digitata*.

II-2) Matériels et méthodes

II-2-1) Matériels biologiques

i) Algues

Quatre lots de *L. digitata*, correspondants à 4 réplicas ont été utilisés. 2 lots étaient issus de la récolte du 12 avril 2024. Les lots restants étaient issus de la récolte du 10 mai 2024.

II-2-2) Dispositif expérimental

Les 4 lots de laminaires ont été placés dans des sacs en toile maille à 10kg par sac.

Ils ont été placés en décanteur pendant toute la durée de l'expérience (1 mois) et ont été relevés une fois par semaine pour les prises de mesures. La mise en décanteur a pour objectif d'accélérer le processus de dégradation des algues. En effet, le volume limité (environ 3,5 m³), et le faible renouvellement d'eau (5 m³/h) dans le décanteur par rapport à la pleine mer sont susceptibles de provoquer un stress thermique, oxydatif et lumineux pour les laminaires.

II-2-3) Mesures

i) Suivi de dégradation quantitatif

Une fois par semaine les lots d'algues ont été pesés à l'aide d'une balance de précision (+/- 0,02 g) afin de mesurer la perte de matière cumulée au fil du temps. Avant la pesée, les algues récoltées ont été laissées une heure à température ambiante pour enlever l'excédent d'eau.

ii) *Suivi de dégradation qualitatif*

Une fois par semaine, 30 échantillons (cercles de diamètre 2,6 cm) par lot ont été prélevés à l'aide d'un emporte-pièce. Les échantillons ont été prélevés à la base de la lame à environ 2 cm de la zone méristématique. Cette zone a été choisie car elle permet de prendre une zone de croissance récente et ainsi d'éviter une zone qui peut être déjà pré-dégradée (Wright and Foggo, 2021) (Figure 10). Les échantillons ont été prélevés sur des lames différentes et selon la disponibilité en algue sur des sporophytes différents (pas plus de 3 échantillons provenant d'une même algue). Des tests sur une vingtaine de sporophytes ont démontré que la colorimétrie des frondes d'une même algue pouvait être significativement différente. On considère, par conséquent, les échantillons de frondes d'une même algue comme distincts. Les échantillons ont été identifiés et placés dans un cube de photographie avec la lumière blanche réglée à une intensité de 3715 lux et un fond blanc.

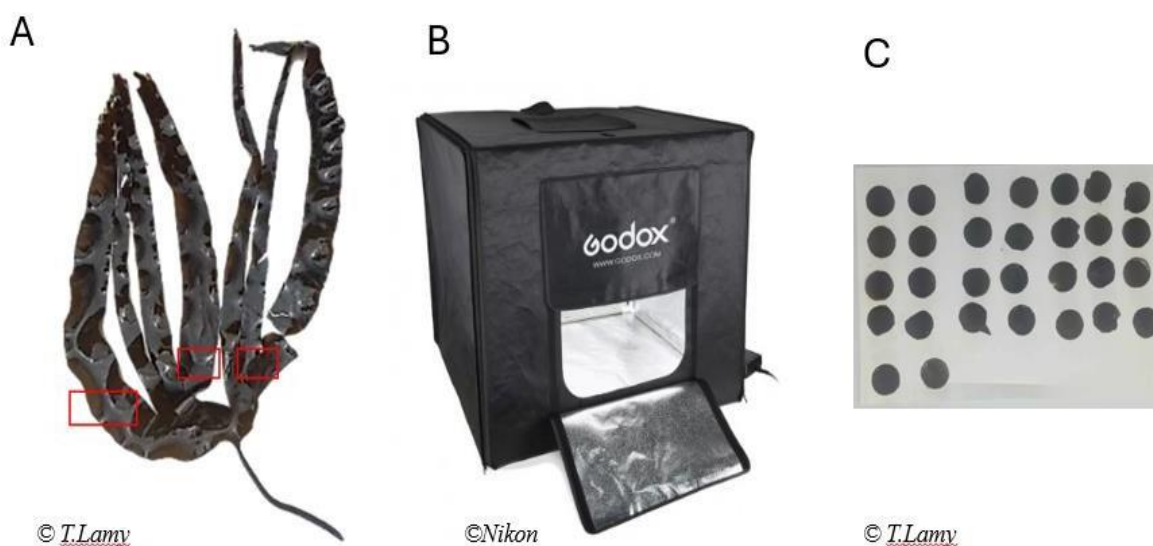


Figure 10 : Protocole d'analyse colorimétrique. A) Zones d'échantillonnage de *Laminaria digitata*. B) Cube de photographie utilisé. C) Exemple de série d'échantillons d'algues.

Les échantillons ont ensuite été analysés à l'aide du logiciel ImageJ. Une macro a été réalisée pour automatiser l'analyse colorimétrique des échantillons. Cette macro réalise une séparation des échantillons du fond à l'aide de l'outil « Color Threshold » (paramètre : Hue (0-255) ; Saturation (0-255) ; Brightness (0-135)), les différents échantillons ont ensuite été séparés avec l'outil « Analyze Particles », l'ensemble de ces particules a été identifié et a défini la zone d'analyse (ROI) qui est sauvegardée. L'image d'origine a ensuite été réouverte, convertie au format 8 bit, « Lab Stack » (en nuance de gris), l'intensité des pixels des particules de chaque composante L^* , a^* , b^* a été calculée et enregistrée.

Un échantillonnage de laminaires frais a servi de témoin initial.

La différence colorimétrique (Eab) a été estimée en adaptant la formule de McBride (2004) :

$$Eab = [(L^*_{S0} - L^*_{Sn})^2 + (a^*_{S0} - a^*_{Sn})^2 + (b^*_{S0} - b^*_{Sn})^2]^{1/2}$$

Où L^* , a^* et b^* sont respectivement l'intensité des pixels correspondant à la clarté (lightness), celle des pixels correspondant à la lumière rouge (redness) et celle des pixels correspondant à la lumière jaune (yellowness). S_0 correspond à l'échantillon de référence et S_n correspond à l'échantillon testé.

II-2-4) Analyse des données et représentations graphiques

L'analyse statistique a été réalisée avec le logiciel Rstudio version 4.2.0 ou le logiciel JASP version 0.16.4. Pour chaque expérience, un test ANOVA a été utilisé pour tester l'existence d'une différence significative entre les différents traitements. Le seuil de significativité a été placé à 95%. L'homogénéité des variances et la normalité des résidus du modèle ont été vérifiées a posteriori à l'aide de tests de Levene, Shapiro, Foscher ou par lecture graphique. Si au moins l'une des conditions n'était pas vérifiée, les données ont été modifiées en utilisant la transformation log, racine carrée ou inverse. Si les conditions d'application de l'ANOVA n'étaient pas vérifiées suites aux transformations des données, un test non paramétrique Kruskal-Wallis a été utilisé. Si le résultat du test ANOVA était significatif, un test de Tuckey a été utilisé pour comparer les moyennes entre elles.

Les graphiques ont été tracés à l'aide du package ggplot2 de Rstudio. Les barres d'erreur sur l'ensemble des graphiques représentent l'erreur standard (SE) calculée selon la formule suivante :

$$SE = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \text{ avec } \sigma \text{ l'écart type et } n \text{ le nombre d'individus statistiques}$$

Les lettres présentes sur les représentations graphiques représentent les groupes déterminés par les tests de Tukey. Des lettres différentes correspondent à des différences significatives des moyennes ($p\text{-value} < 0,05$).

II-3) Résultats

i) *Suivi de dégradation quantitatif*

On observe une perte de matière significative au cours des jours (KW, $P=0,025$) mais pas de différence de perte de matière entre les lots ($F=0,783$; $p=0,523$) (Figure 11).

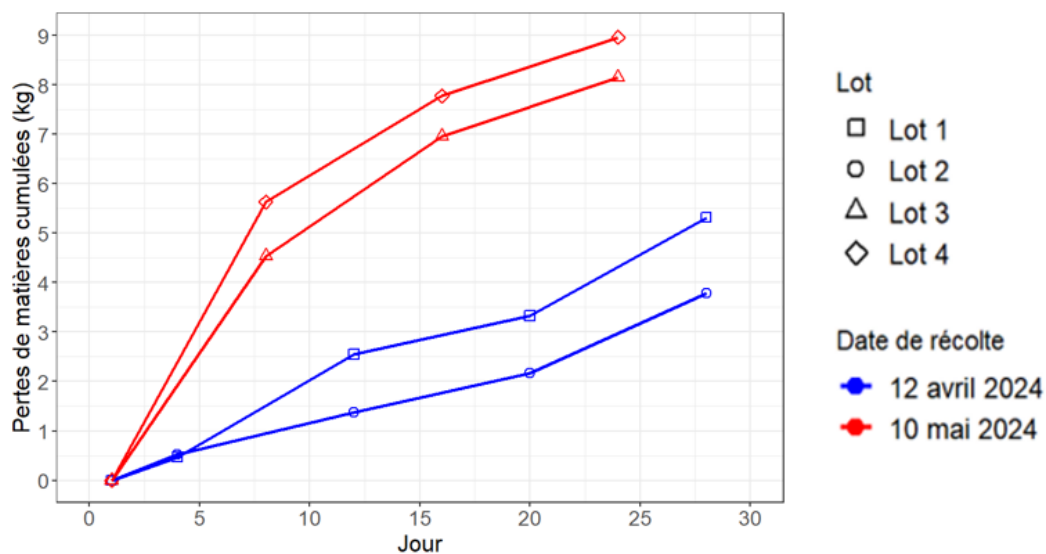


Figure 11 : Pertes de matières cumulées de différents lots de *Laminaria digitata* au cours du temps.

ii) *Suivi de dégradation qualitatif*

Les mesures colorimétriques démontrent une diminution progressive de l'intensité des pixels de la composante L^* , une augmentation de celles des composantes a^* et b^* et par conséquent une augmentation des écarts à la norme colorimétrique des algues fraîches Eab (Figure 12).

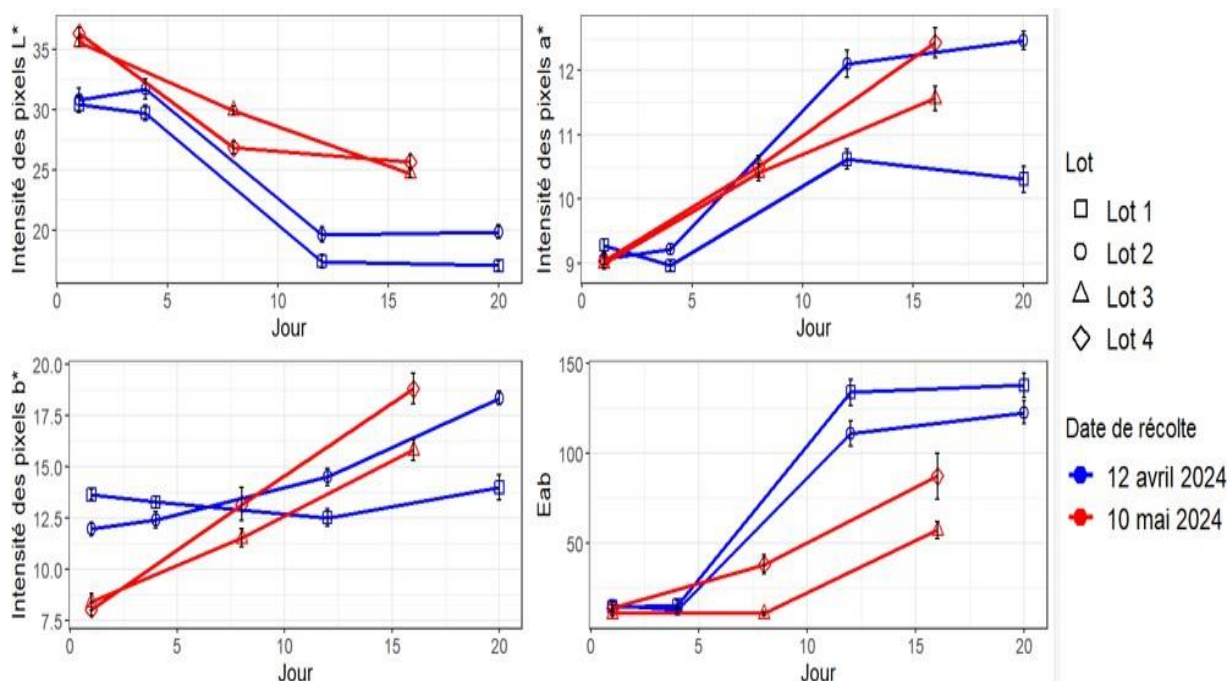


Figure 12 : Evolution de l'intensité des pixels des couches colorimétriques L^* , a^* b^* et de l'écart par rapport à des algues fraîches Eab de différents lots de *Laminaria digitata*.

II-4) Discussion

Une perte de matière importante a pu être observée, confirmant que les algues dans le décanteur ont subi un stress important. La perte de matière était cependant différente selon le jour de récolte car les conditions lors de la récolte et lors du stockage dans le bassin ont varié au cours du temps, entraînant des différences d'intensité des stress subits par les algues.

L'intensité des pixels des couches L^* et a^* a tendance à varier de façon similaire entre les 4 lots testés. Ceci laisse à penser que la colorimétrie peut représenter un bon indicateur du niveau de dégradation des algues.

Ces résultats s'opposent aux études (Wright and Foggo, 2021; Wright and Kregting, 2023), qui avancent que la dégradation n'est pas corrélée à un changement de l'activité photosynthétique. On peut supposer que cette différence est due au fait que dans les expériences de Wright, le traitement de dégradation est moins traumatisant que lors des expériences réalisées à France Haliotis. En effet, dans les expériences de Wright, les frondes sont simplement coupées et remises à l'eau à 2m sous le niveau de la plus faible marée pour un mois. Lors des expériences à France Haliotis, les algues ont été coupées et exposées à l'air et aux UV pendant plus de 3 heures (le temps de la récolte), elles ont ensuite été exposées à un stress oxydatif en étant stockées en bassin et en étant tassées dans un sac. Ces différences dans le traitement de dégradation impactent directement la dégradation puisque la perte de matière mouillée est de 0,2 (+/-0,04) g/jour dans les expériences de Wright and Foggo (2021) tandis que celle de matière sèche varie entre 0,15 et 0,40 g/jour suivant les lots dans les expériences réalisées à France Haliotis.

Cependant, d'autres facteurs peuvent avoir un impact sur la couleur de l'algue. Parmi eux, on retrouve l'âge : un sporophyte jeune aura une couleur brun clair, tandis qu'un sporophyte âgé aura une coloration brun foncé (CRPMEM Bretagne, 2022). Cependant, dans le cas de France Haliotis, la récolte étant faite à la main, ce sont en général des sporophytes âgés car plus longs qui sont prélevés. On observe peu ou pas de différence de colorimétrie entre les individus le jour de la récolte.

Les mesures de colorimétrie pourraient être étayées par une quantification des pigments en réalisant une chromatographie liquide à haute résolution (Stévant et al., 2017; Wright and Foggo, 2021). Ensuite, la mesure de l'activité respiratoire pourrait servir d'indicateur du niveau de dégradation (de Bettignies et al., 2020). On peut également envisager d'observer les potentielles dégradations à un niveau cellulaire avec l'utilisation de coloration au bleu d'Evans (Thomas and Kirst, 1991; Russel, 2007) ou de Live–Dead kits (Karsten, 2012). Enfin, ce travail pourrait être complété par une étude comparative de la valeur nutritionnelle des algues en fonction de leur dégradation. La composition en glucides peut être analysée par chromatographie liquide à haute résolution et celle en protéines par un système de combustion élémentaire CHNS-O (Stévant et al., 2017).

III- Impact du niveau de dégradation de *Laminaria digitata* sur sa consommation par *Haliotis tuberculata*

III-1) Introduction

On éprouve ensuite l'hypothèse que le niveau de dégradation des algues distribuées impacte sa consommation par les ormeaux. Enfin, si cette hypothèse est vérifiée, on cherche à déterminer si cette variation de la consommation en fonction de la dégradation est due à une variation de l'appétence, de la digestibilité ou d'un autre facteur de l'algue.

III-2) Matériels et méthodes

III-2-1) Matériels biologiques

i) Ormeaux

900 individus ont été prélevés aléatoirement dans les cages d'élevage. Les animaux étaient âgés de deux ans et demi et ont passé 1 an et demi en mer (génération 2022). Les ormeaux choisis étaient, par conséquent, immatures sexuellement, la maturation sexuelle pouvant entraîner une allocation des ressources pouvant avoir un impact sur la croissance et la survie. Ce choix permet de limiter les biais dans la mesure de ces paramètres. Ces ormeaux avaient une longueur moyenne de 3,58 (+/-0,13) cm pour une masse moyenne de 5,02 (+/-0,51) g.

ii) Algues

Les algues (*Laminaria digitata*) sont issues de la récolte en mer du 12 avril 2024.

Pendant un mois, différentes méthodes de stockage destinées à obtenir des niveaux de dégradation distincts des algues ont ensuite été mises en place : stockage en mer à 10 kg/compartiment (D1), stockage en bassin à 10 kg/compartiment (D2), stockage en bassin à 20 kg/compartiment (D3).

III-2-2) Dispositif expérimental

i) Test de consommation

Les 900 individus ont été répartis aléatoirement dans 9 bassins d'études à n=100 individus/bassin. Les bassins ont les dimensions suivantes : l=75cm, L=60cm, h=50cm. Trois lignes de 20 coupelles ostréicoles ont été déposées dans les bassins pour servir de support de fixation aux ormeaux (Figure 13). Ceci correspond à une surface de fixation potentielle totale de 2,72 m². Une plaque en plastique noire non ajourée a été déposée à la surface de chaque bassin pour protéger les animaux de la lumière. En effet, selon Basuyaux (1997), la prise alimentaire est corrélée à la luminosité. Une faible luminosité permet d'optimiser la consommation de l'ormeau. Les bassins ont été alimentés en eau de mer par la pompe située à Kerazan, en contrebas de l'entreprise. L'eau était pompée 3 heures précédant et suivant l'étape de marée haute. Elle était filtrée par un filtre à tambour ayant une précision de 63 µm et des filtres à poche de 20 µm avant la distribution dans les bassins. Le débit d'eau était fixé à 3 l/h. L'eau a été oxygénée par son brassage lors du pompage et par un système de bullage composé d'un tube microporeux lesté au fond de chaque bassin. Ces tubes microporeux étaient reliés en série à un tube d'arrivée d'air commune.

Les bassins ont été nettoyés quotidiennement avec un siphon. Durant les 3 premières semaines d'étude, tous les bassins ont été alimentés avec de la *Laminaria digitata* fraîche pour permettre l'acclimatation à l'élevage à terre. Ensuite, les animaux ont été alimentés avec des algues ayant des niveaux de dégradation différents (D1, D2 ou D3) mesurées à l'aide de l'échelle colorimétrique et disposées selon le plan d'expérimentation suivant (Figure 14). Pour chaque niveau de dégradation d'algues, des triplicatas de contrôle de la dégradation au cours de l'expérience ont été mis en place. Dans ces bassins, les algues ont été mises en place sous les coupelles ostréicoles en l'absence d'ormeaux. Les bassins d'ormeaux ont été placés au plus proche de l'arrivée d'eau et d'air. L'arrivée d'air étant branchée en série, cette configuration permet de limiter les risques de rupture d'alimentation en air dans les bassins contenant des animaux si l'un des tubes venait à se débrancher.

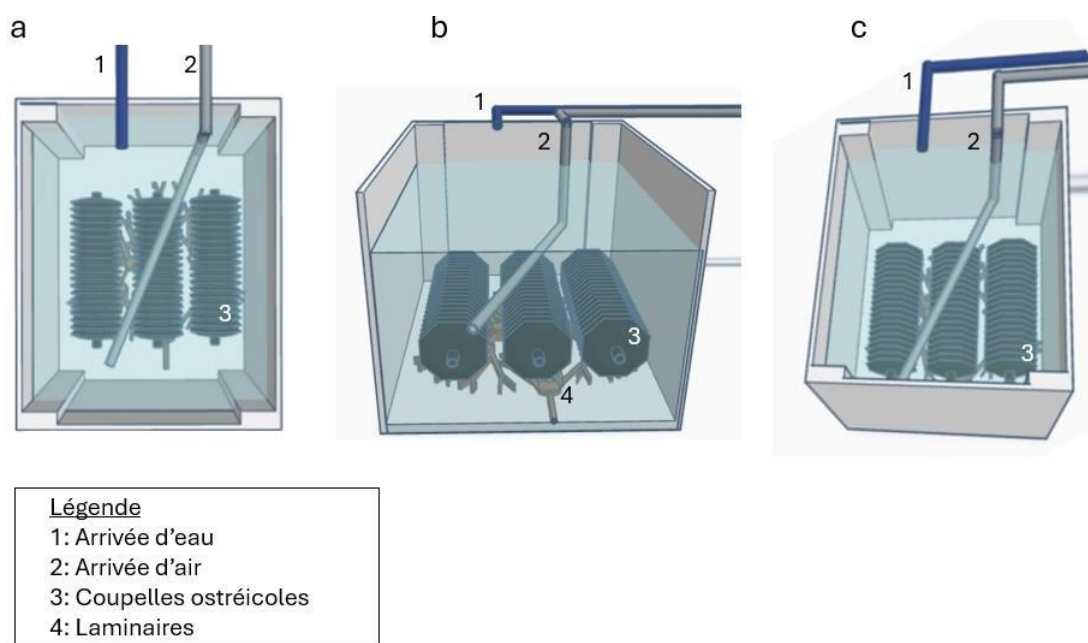


Figure 13 : Modélisation d'un bassin d'expérimentation. © T.Lamy

a) Vue du dessus, b) Vue de face, c) Vue de 3/4

Toutes les semaines, les algues ont été prélevées, pesées et renouvelées pour quantifier la dégradation dans les bassins. La quantité d'algues distribuée était fixée à 0,5 kg/semaine/bassin suite à des tests préalables de consommation réalisés avec des laminaires fraîches sur 100 individus dans un bassin d'étude. La quantité maximale consommée en une semaine était de 400g. Les algues étaient déposées au fond du bassin en dessous des coupelles ostréicoles pour faciliter leur accès aux ormeaux. A chaque nourrissage, les algues non consommées ont été récoltées, laissées à sécher une heure à température ambiante, essorées à la main et pesées à l'aide d'une balance de précision ($\pm 0,02$ g).

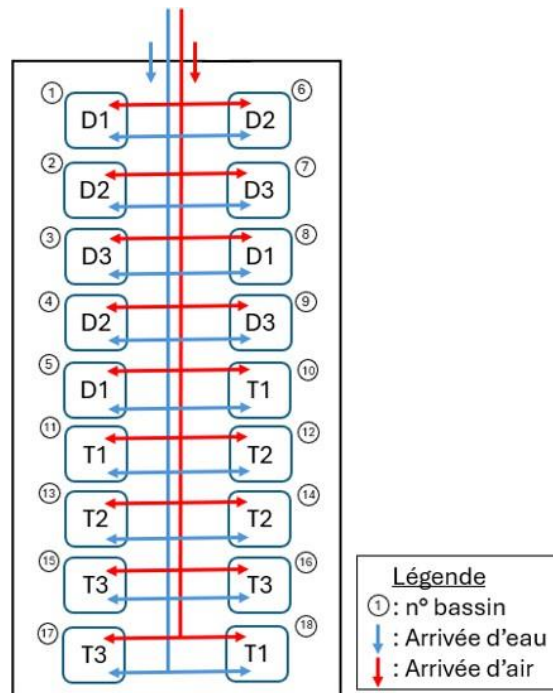


Figure 14 : Plan d'expérimentation de l'impact de la dégradation algale sur sa consommation par l'ormeau. (D1) : algues peu dégradées, (D2) : algues moyennement dégradées, (D3) : algues très dégradées, (T1) : algues peu dégradées en absence d'ormeau, (T2) : algues moyennement dégradées en absence d'ormeau, (T3) : algues très dégradées en absence d'ormeau.

ii) Test de préférence

Dans un second temps, les individus ont été prélevés et placés dans des aquariums de dimensions $l=20\text{cm}$, $L=35\text{cm}$, $h=25\text{cm}$ à $n=1$ individu/aquarium soit une surface de 2950 cm^2 . Le débit a été fixé à $4,5\text{ l/h}$ soit plus d'un renouvellement par heure. L'arrivée d'eau ainsi que le bullage ont été placés au centre du bassin pour ne pas influencer le comportement de l'ormeau. Les individus ont été placés au centre de l'aquarium dans un abri consistant en un demi-tube en argile. Deux portions d'algues de masse : $2,50 (+/-0,01)\text{ g}$ étaient placées à des coins opposés de l'aquarium à égale distance du centre de l'aquarium et maintenues au sol par des poids en inox (Figure 15).

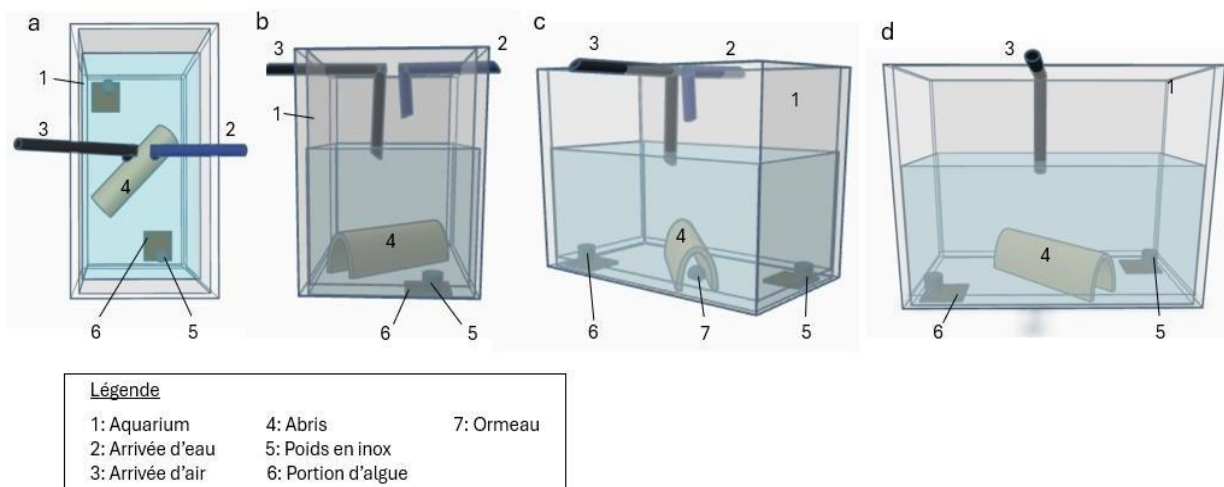


Figure 15 : Modélisation d'un aquarium d'expérimentation. © T.Lamy
 a) Vue du dessus, b) Vue de face, c) Vue de 3/4 d) Vue de profil

Les portions d'algues placées correspondent à des niveaux de dégradation des algues différents et ont été disposées selon le plan d'expérimentation suivant (Figure 16). Deux témoins de dégradation par niveau de dégradation ont été placés dans des aquariums sans ormeau pour quantifier la perte de matière due à la dégradation de l'algue.

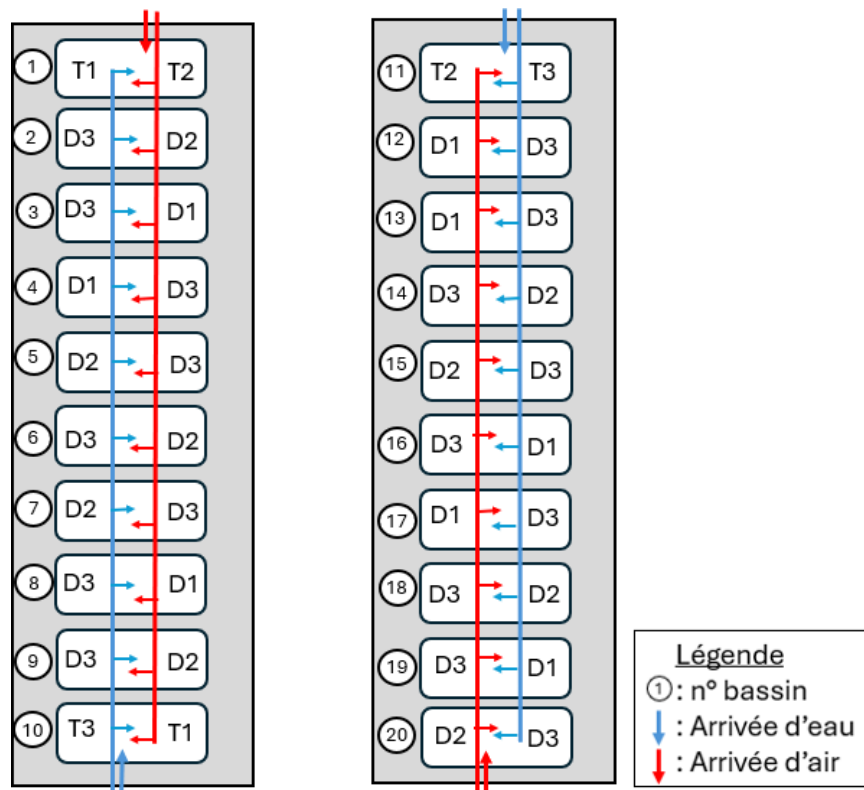


Figure 16 : Plan d'expérimentation des tests de préférence alimentaire (D1) : algues peu dégradées, (D2) : algues moyennement dégradées, (D3) : algues très dégradées, (T1) : algues peu dégradées en absence d'ormeau, (T2) : algues moyennement dégradées en absence d'ormeau, (T3) : algues très dégradées en absence d'ormeau.

III-2-3) Mesures

i) *Suivi de dégradation quantitative des algues*

Chaque semaine, la quantité d'algue restante dans les bassins témoins (T1, T2 et T3) a été pesée à l'aide d'une balance de précision (+/- 0,02 g) afin de calculer le pourcentage de dégradation :

$$\% \text{ dégradation} = \frac{Q_i - Q_f}{Q_i} * 100$$

Avec Q_i la quantité initiale de laminaire (500 g) et Q_f la quantité finale de laminaire (en g) après une semaine.

ii) *Suivi de dégradation qualitative des algues*

30 échantillons (cercles de diamètre 2,6 cm) d'algues par bassin par semaine ont été prélevés et analysés selon le protocole développé lors de l'expérience 1 pour réaliser le suivi de qualité des algues.

iii) Consommation d'algue

La consommation algale (CA) par ormeau, par jour pour chaque bassin a été calculée comme suit :

$$CA/ormeau/jour = \frac{(\text{quantité distribuée} - \text{quantité dégradée} - \text{refus})}{\text{nb individus} * \text{nb jours}}$$

Avec "quantité distribuée", "quantité dégradée" et "refus" en g, "nb individus" correspondant au nombre d'individus dans la bassine (ici 100) et "nb jours" correspondant au nombre de jours entre la distribution et la récolte des refus.

iv) Croissance – survie

Au début de l'expérience, la longueur de la coquille de 30 individus sélectionnés aléatoirement dans chaque bassin a été mesurée en analysant une photo des individus à l'aide du logiciel ImageJ. La moyenne des longueurs mesurées constitue la longueur initiale $longueur_i$ (en mm). De la même manière, la longueur de la coquille de 30 individus sélectionnés au hasard dans chaque bassin a été mesurée à la fin de l'expérience pour définir la longueur finale $longueur_f$ (en mm).

Les indices de croissances et de survie ont été calculés comme suit :

$$\text{Croissance moyenne en longueur (mm)} = \frac{longueur_f - longueur_i}{30}$$

$$\text{Taux de survie (\%)} = \frac{n - \text{mortalité}}{n} * 100$$

"n" étant le nombre initial d'individu dans chaque bassin (n= 100) et "mortalité" la somme totale des individus morts au cours de l'expérience.

v) Préférence des algues

La préférence algale a été mesurée par suivi de leur consommation. A la fin de l'expérience, après 4 jours de test, les portions d'algues ont été pesées et prises en photo. Les aquariums témoins sans ormeau ont servi de référence pour comptabiliser la perte de matière due à la dégradation. La consommation a été calculée en fonction de la masse et de l'aire selon les formules suivantes :

$$Consommation_{masse} (\%) = \frac{masse_i - \text{dégradation}_{masse} - masse_f}{masse_i} * 100$$

Où " $masse_i$ " est la masse initiale en g, " $\text{dégradation}_{masse}$ " correspond à la masse dégradée dans les aquariums témoins sans ormeau et " $masse_f$ " la masse à la fin de l'expérience.

$$Consommation_{aire} (\%) = \frac{aire_i - \text{dégradation}_{aire} - aire_f}{aire_i} * 100$$

Où " $aire_i$ " est l'aire initiale en cm², " $\text{dégradation}_{aire}$ " correspond à l'aire dégradée dans les aquariums témoins sans ormeau et " $aire_f$ " l'aire à la fin de l'expérience.

III-3) Résultats

i) Suivi de dégradation quantitative des algues

Les tests sur les témoins sans ormeaux ont montré une perte de matière des algues au cours du traitement. Cette perte de matière était significativement impactée par le niveau de dégradation de l'algue (F=11,466; p<0,001). On n'observe cependant une différence

significative de perte de matière qu'entre T1 et T3 ($t = -5,838$; $p < 0,001$) et entre T2 et T3 ($t = -4,372$; $p < 0,001$). Les algues les plus dégradées sont celles où la perte de matière est la plus importante. En effet, la perte moyenne hebdomadaire de matière était de 189,5g pour les algues les plus dégradées (T3) tandis qu'elles étaient respectivement de 70,1g pour T2 et de 25,3g pour T1. Ceci représente donc une perte de matière de 37,9% pour T3 ; 14,0% pour T2 et 5,1% pour T1 (Figure 17).

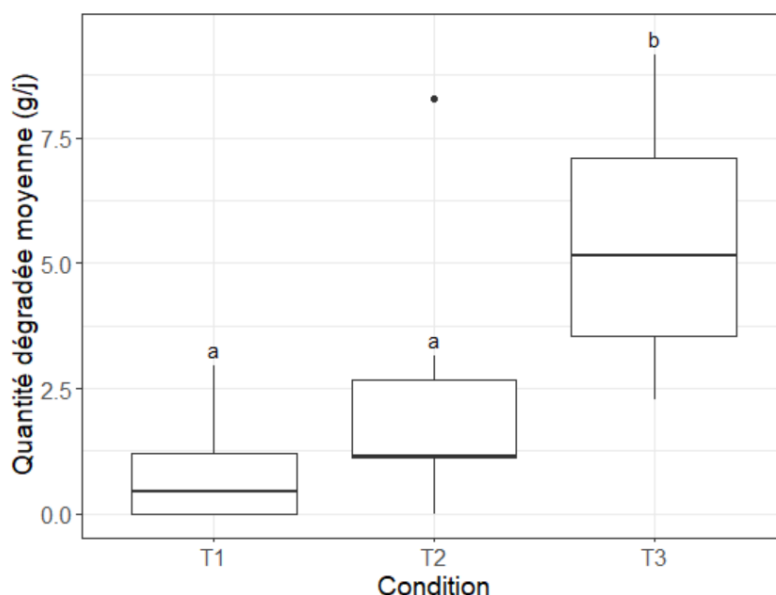


Figure 17 : Quantité dégradée moyenne de *Laminaria digitata* en fonction du niveau de dégradation en absence d'ormeaux.

ii) Suivi de dégradation colorimétrique des algues

Une différence significative d'intensité des pixels L^* , a^* , b^* et de l'écart par rapport à la référence Eab a été observée, respectivement : $F=6,954$; $p=0,001$ / $F=4,175$ $p=0,018$ / $F=12,884$; $p<0,001$ et $7,925$; $p<0,001$). Les valeurs moyennes d'intensité des pixels étaient les suivantes (Tableau 1) :

Tableau 1 : Valeurs moyennes d'intensité des couches colorimétriques et de l'écart par rapport à la référence Eab selon les niveaux de dégradation.

Condition/Pixels	L^*	a^*	b^*	Eab
D1	22,349 (+/-0,260)	0,330 (+/-0,101)	1,782 (+/-0,259)	3,223 (+/-0,873)
D2	22,276 (+/-0,387)	2,585 (+/-0,204)	2,585 (+/-0,204)	4,957 (+/-0,641)
D3	24,266 (+/-0,506)	0,056 (+/-0,186)	4,011 (+/-0,354)	13,568 (+/-3,55)

Aucune variation significative de colorimétrie n'a été observée au cours de l'expérience (L^* : $F=0,670$; $p=0,415$; a^* : $F=0,102$; $p=0,055$; b^* : $F=1,989$; $p=0,161$; Eab : $F=0,002$; $p=0,968$). Les traitements peuvent donc être considérés identiques d'une semaine d'expérience à l'autre.

iii) Consommation d'algue

La dégradation des algues a un effet significatif sur sa consommation par les ormeaux ($F=9,684$, $p<.001$). On observe cependant uniquement une différence de consommation significative entre la condition D1 et D3 ($F=4,288$; $p<.001$) et entre la condition D2 et D3

($F=2,501$; $p=0,045$). Les consommations moyennes étaient de $0,41$ ($\pm 0,10$) g/j/individu pour la condition D1 ; $0,36$ ($\pm 0,08$) g/j/individu pour la condition D2 et $0,28$ ($\pm 0,08$) g/j/individu pour la condition D3 (Figure 18).

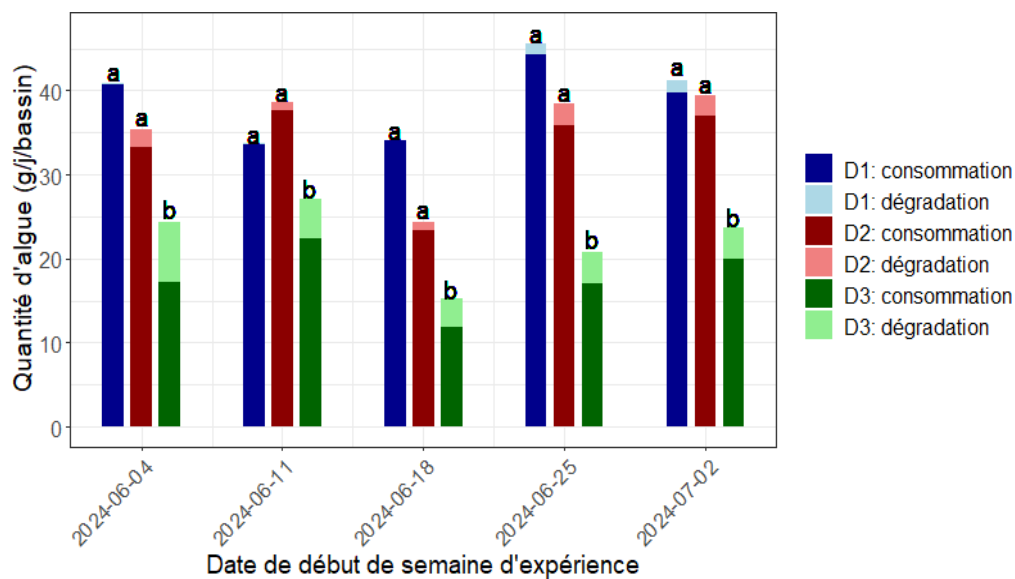


Figure 18 : Quantité consommée et dégradée selon le niveau de dégradation des lamineaires.

iv) Croissance - survie

Le niveau de dégradation des algues distribuées n'a pas eu d'impact significatif sur la croissance en longueur ($F=0,035$; $p=0,966$) des ormeaux. Au cours de l'expérience, les ormeaux de la condition D1 ont gagné en moyenne $2,07$ ($\pm 0,81$) mm soit $0,07$ mm/j ; ceux de la condition D2 : $2,23$ ($\pm 1,17$) mm soit $0,08$ mm/j et ceux de la condition D3 : $1,99$ ($\pm 0,88$) mm soit $0,07$ mm/j (Figure 19).

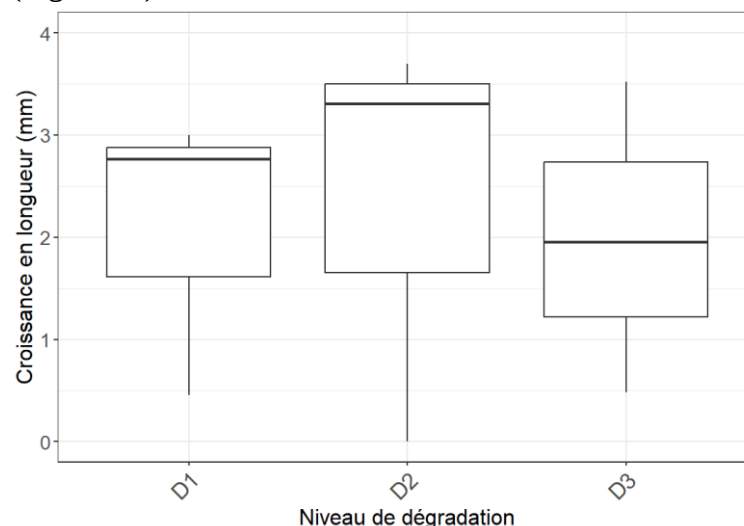


Figure 19 : Croissance en longueur des ormeaux à la fin de l'expérience en fonction du niveau de dégradation des lamineaires distribuées.

Aucun impact significatif du niveau de dégradation des algues sur la survie des ormeaux n'a été observé ($F=0,337$; $p=0,727$). Les taux de survie ont varié entre 84% et 100% selon les bassins. Le taux de survie moyen était de $95,33\%$ ($\pm 3,67$) pour la condition D1 ; $92,33\%$ ($\pm 4,63$) pour la condition D2 et $91,00\%$ ($\pm 3,00$) pour la condition D3.

v) *Préférence algale*

Le test de consommation n'a pas démontré de différence significative dans les choix de consommation des algues suivant le niveau de dégradation que ce soit en mesurant la masse ($F=0,488$; $p=0,619$) ou la surface d'algue consommée ($F=1,740$; $p=0,192$). La consommation moyenne était de $0,80 (+/-0,23)$ g pour une surface de $5,33 (+/-1,88)$ cm² pour la condition D1 ; $1,14 (+/- 0,28)$ g et $11,02 (+/-2,34)$ cm² pour la condition D2 ; $1,01$ g ($+/-0,16$) et $9,22 (+/-1,59)$ cm² pour la condition D3.

III-4) Discussion

Le niveau de dégradation des algues a bien un impact sur la consommation par les ormeaux. Les algues dégradées sont moins consommées que les autres algues. Ces algues semblaient avoir une texture plus molle que les autres conditions. La texture jouant un rôle important dans la préférence alimentaire des ormeaux (IDEALG, 2019; Roussel et al., 2020), on peut supposer que ce paramètre a pu influencer la consommation. Des tests complémentaires pourraient être réalisés avec un pénétromètre pour quantifier le changement de texture lors du processus de dégradation des laminaires. Cette différence de texture pourrait également avoir un impact sur la consommation par les organismes brouteurs concurrents des ormeaux. En effet, selon Molis (2010) de nombreux petits organismes brouteurs préfèrent des lames ayant une texture plus molle car plus faciles à consommer pour eux.

La plus faible consommation des algues dégradées pourrait également s'expliquer par un stress plus important entraînant une émission plus importante de molécules répulsives (McShane et al., 1994; Ritter et al., 2017). La dégradation des algues pourrait également entraîner une dégradation de ses protéines. Le contenu protéique étant un facteur majeur de la préférence alimentaire de l'ormeau (Roussel et al., 2020), on peut supposer que ceci a pu impacter sa consommation. Un dosage des protéines avec un système de combustion CHNS-O élémentaire permettrait de tester cette hypothèse (Stévant et al., 2017).

Cependant, les tests de préférence alimentaire n'ont pas montré de différence significative de choix de consommation suivant le niveau de dégradation. Le renouvellement d'eau étant relativement important, il est possible que les molécules répulsives sécrétées par les algues lors d'un stress n'aient pas été en contact suffisamment longtemps avec l'ormeau pour avoir un impact sur sa consommation. Ensuite, il est important de considérer le fait que des variations individuelles de comportements sont observables (Roussel et al., 2020). L'échantillon testé ayant été limité par manque d'algue disponible, il est par conséquent difficile de dégager un comportement généralisable à l'échelle de la population.

De plus, les témoins de dégradation montrent que la perte de matière est corrélée avec le stress qui a été subi par l'algue auparavant. Ainsi, la plus faible consommation des algues dégradées pourrait également s'expliquer par une baisse de son abondance et donc une plus faible disponibilité pour les ormeaux.

Enfin, l'absence de différences significative de croissance selon le traitement s'oppose aux observations de Fallu (1991) qui estime que des potentielles inhibitions de croissances peuvent subvenir à cause de toxines d'origine fongiques issues de portions dégradées des algues. Des algues dégradées peuvent également avoir un impact significatif sur la quantité d'oxygène disponible. Ce manque de résultat est probablement dû à l'hétérogénéité du lot et au fait que les ormeaux ont une croissance relativement lente. Par conséquent, une période d'expérimentation de 1 mois est insuffisante pour observer un changement dans la croissance des ormeaux.

IV- Effet de la ration de *Laminaria digitata* sur sa dégradation et sa consommation par *Haliotis tuberculata* en cage en mer

IV-1) Introduction

Lors du nourrissage des ormeaux, la ration distribuée n'est pas contrôlée. Des mesures de la ration montrent une forte variabilité. En effet, la masse de la ration varie entre 13kg et 21kg suivant la cage et même le compartiment de la cage distribué. Celle-ci peut varier selon la quantité d'algue récoltée, le temps disponible en mer ou le distributeur. Des observations sur le terrain pourraient laisser à penser qu'une quantité distribuée trop importante pourrait avoir un impact sur la dégradation des algues. En effet, plusieurs paramètres pourraient être modifiés selon la quantité d'algue distribuée. Tout d'abord, le renouvellement d'eau pourrait être limité si un volume trop important est placé au centre de la cage. Ensuite, un grand nombre d'individus pourrait entraîner une consommation d'oxygène accrue et un risque d'anoxie. Au centre du tas d'algue, les sporophytes pourraient également être confrontés à une élévation de la température et un accès restreint à la lumière limitant la photosynthèse. Des tests préalables avec un luxmètre posé au milieu du tas d'algues ont, en effet, démontré des conditions de quasi-obscurité au centre du tas d'algue. Il paraît donc important de tester si la quantité d'algue distribuée a un impact sur la cinétique de dégradation dans les cages en mer.

Ce travail sera complété par une mesure de la consommation par les ormeaux pour définir une ration permettant d'optimiser la production d'ormeaux. En effet, actuellement la variabilité dans le rationnement de la nourriture distribuée peut également avoir des conséquences délétères sur la production. Tout d'abord, en induisant une hétérogénéité de croissance entre les cages et les compartiments des cages ; ensuite si la ration est trop importante, en gaspillant une ressource précieuse en algue issue de la récolte ce qui signifierait avoir un impact inutile sur l'environnement et des coûts de production superflus.

IV-2) Matériel et méthodes

IV-2-1) Matériels biologiques

i) Ormeaux

Les ormeaux utilisés étaient âgés de deux ans et demi et ont déjà passé 1 an et demi en mer (génération 2022). Ces ormeaux avaient une longueur moyenne de 1,68 (+/-0,32) cm pour une masse moyenne de 1,09 (+/-0,63) g.

ii) Algues

Les laminaires ont été récoltées le 6 juin 2024. Elles ont été mises en cage directement après récolte.

IV-2-2) Plan de nourrissage

Les ormeaux ont été répartis aléatoirement dans 3 cages immergées en mer (48°36'41,2" ; 004°35'54,0") à une profondeur variant entre 10m et 15m selon les marées. On compte 600 individus dans chacun des 3 compartiments de chaque cage. Les compartiments correspondent à des parallélépipèdes rectangles de longueur : 110 cm ; largeur : 100 cm ; hauteur : 50 cm. Ceci correspond à un volume de 550 L.

Dans chaque compartiment, 10 lignes de 40 coupelles ostréicoles étaient présentes. En comptant ces coupelles et les parois de la cage, la surface d'adhésion potentielle pour les ormeaux était de 10,93 m².

Trois quantités de nourrissage avec *Laminaria digitata* ont été testées : 20kg (LD20), 15kg (LD15) et 10kg (LD10). 3 réplicas sur 3 cages différentes ont été effectués. La quantité d'algue distribuée a été pesée à l'aide d'un peson (+/- 0,1 g). La distribution des différentes quantités d'algues a été faite selon le plan expérimental ci-dessous (Figure 20). Les algues pouvant émettre des molécules répulsives contre les brouteurs en cas de stress, il a été choisi de mettre en place un traitement par cage, avec le même traitement dans tous les compartiments d'une cage. Ceci permet d'éviter que la consommation des algues par les ormeaux ne soit impactée par l'émission de molécules répulsives provenant des algues d'un compartiment voisin correspondant à un traitement différent. Pour chacune des quantités testées (10 kg, 15kg, 20kg), une cage avec 3 réplicas sans ormeau a servi de contrôle de la dégradation des algues en l'absence d'ormeau.

Après 1 mois, les algues non consommées, appelées refus, ont été ramenées à terre et pesées à l'aide d'une balance de précision (+/-0,02 g). De la même manière, les algues des cages contrôles ont été pesées pour quantifier la perte de masse algale imputable à leur dégradation et à la consommation par les brouteurs autres que les ormeaux.

Toutes les semaines, 30 échantillons d'algues (cercles de diamètre 2,6 cm) de chaque cage ont été prélevés à l'aide d'un emporte-pièce pour faire le suivi de dégradation (voir expérience 1).

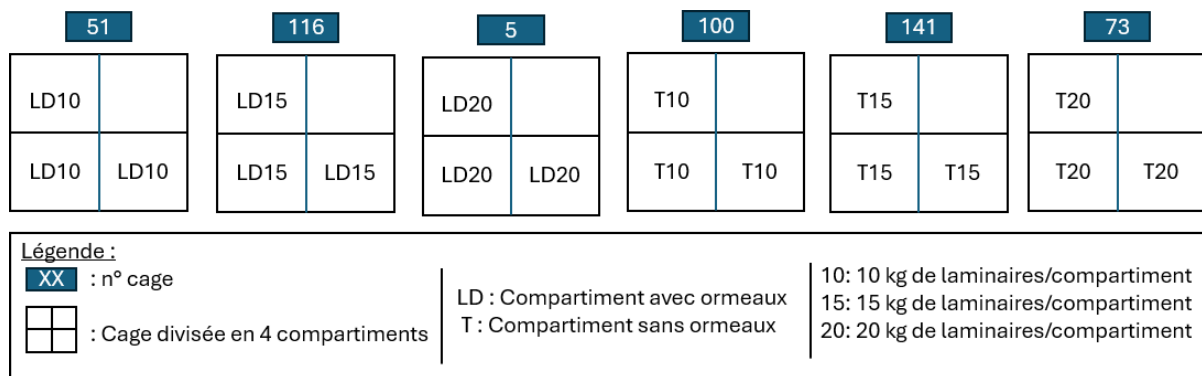


Figure 20 : Plan expérimental de distribution des algues dans les cages immergées.

IV-2-3) Mesures

i) Température

La température a été enregistrée durant toute la durée de l'expérience par des sondes Hobo réalisant un relevé de température toutes les 10 minutes. Une sonde a été placée au milieu des algues dans un compartiment de chacune des conditions testées pour enregistrer l'impact de la quantité d'algue sur le réchauffement des algues. Une autre sonde a été placée sur le couvercle de l'une des cages pour mesurer la température de l'eau.

ii) Dégradation quantitative des algues

A la fin de l'expérience, la quantité d'algue dans les compartiments des cages témoins (T10, T15 et T20) a été pesée à l'aide d'une balance de précision (+/- 0,02 g) afin de calculer le pourcentage de dégradation :

$$\% \text{ dégradation} = \frac{Q_i - Q_f}{Q_i} * 100$$

Avec Q_i la quantité initiale de laminaire (10, 15 ou 20kg selon le traitement) et Q_f la quantité finale de laminaire (en kg) à la fin de l'expérience.

iii) Dégradation qualitative des algues

Les échantillons ont été prélevés et analysés toutes les semaines selon le protocole développé lors de l'expérience 1.

iv) Consommation d'algue

La consommation algale (CA) pour chaque compartiment a été calculée comme suit :

$$CA/orneau/jour = \frac{(\text{quantité distribuée} - \text{quantité dégradée} - \text{refus})}{600 * \text{nb jours}}$$

Avec "quantité distribuée", "quantité dégradée" et "refus" en g, "600" correspondant au nombre d'individus dans la bassine et "nb jours" correspondant au nombre de jours entre la distribution et la récolte des refus.

v) Croissance

Le suivi de croissance a été effectué sur 30 individus sélectionnés au hasard/compartiment d'expérimentation selon le protocole développé lors de l'expérience 2.

IV-3) Résultats

i) Température

La température au milieu des algues a suivi les mêmes variations au cours de l'expérience pour les conditions LD15 et LD20 (Figure 21). La sonde de la condition LD10 a cessé de fonctionner à partir du 07 juin 2024 à 21h38.

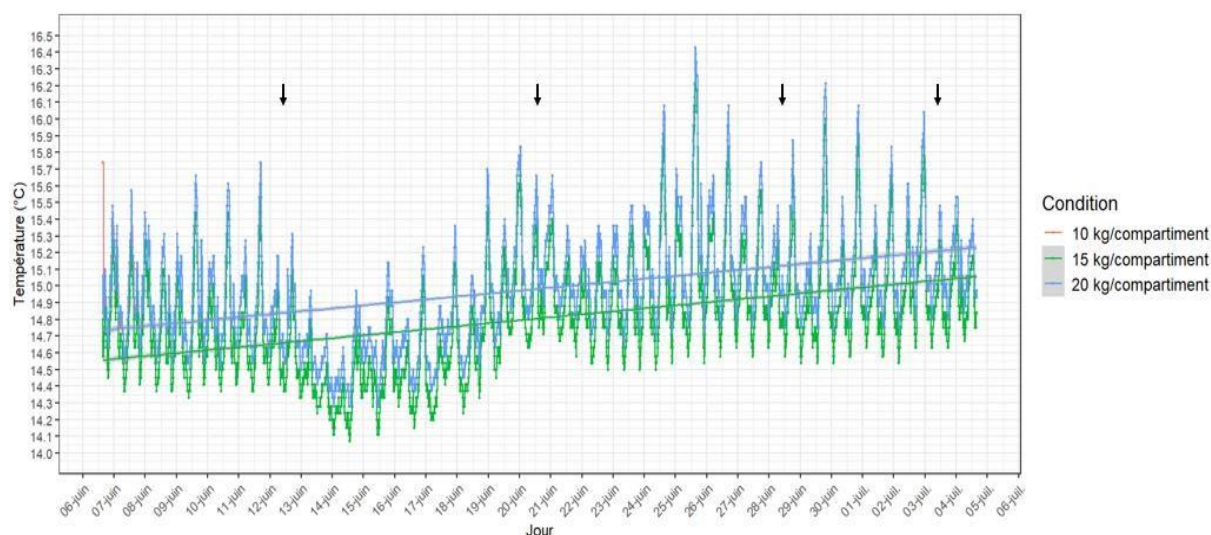


Figure 21 : Evolution de la température au milieu des algues selon la quantité distribuée lors de l'expérience. Les flèches représentent les moments de remontée des cages.

La température moyenne de la condition LD15 était de 14,814 (+/- 0,006) °C tandis que celle de la condition LD20 était de 14,997 (+/- 0,007) °C. Les quartiles suivent exactement les mêmes variations suivant les conditions. Il y a un écart de 0,220°C entre le premier quartile (25%) et la moyenne et un écart de 0,210°C entre le 3^{ème} quartile et la moyenne.

ii) Dégradation quantitative des algues

Les témoins de dégradation ne montrent pas d'impact de la quantité de laminaires distribuées sur la dégradation quantitative des algues ($F=0,131$; $p=0,880$). Les pourcentages de dégradation étaient respectivement de 37%, 32% et 32% pour les conditions LD10, LD15 et LD20.

iii) Dégradation qualitative des algues

Les tests colorimétriques n'ont pas montré de changement de l'Eab au cours du temps ($F=0,319$; $p=0,573$). En effet, on n'observe pas de changement significatif de l'intensité des pixels L^* ($F=0,131$; $p=0,716$) et b^* ($F=2,436$; $p=0,119$). Un changement significatif de l'intensité des pixels a^* a cependant été observé ($F=11,643$; $p<0,001$) (Figure 22).

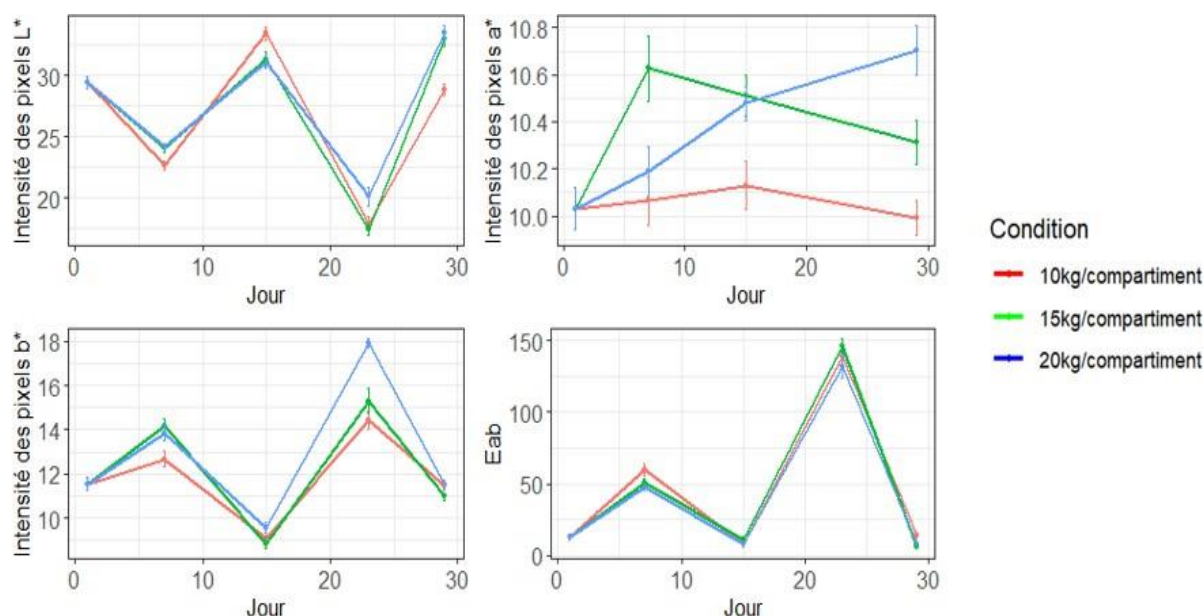


Figure 22 : Evolution de l'intensité des pixels des couches colorimétriques L^* , a^* b^* et de l'écart par rapport à des algues fraîches Eab selon la quantité de *Laminaria digitata* distribuée.

Malgré des différences significatives d'intensité des pixels a^* entre les conditions LD10 et LD20 ($t=-2,930$; $p<0,001$) et entre les conditions LD15 et LD20 ($t=-2,776$; $p<0,001$), l'Eab n'a pas été significativement différent suivant les conditions ($F=0,177$; $F=0,837$). L'intensité des pixels L^* et b^* n'ont, en effet, pas varié suivant les conditions ($F=1,076$; $p=0,341$), ($p=0,072$). La quantité d'algue distribuée dans les proportions testées ne semble donc pas avoir d'impact sur la qualité des algues.

iv) Consommation d'algue

Les tests de consommation d'algues par les ormeaux n'ont pas été concluants. Après 3 semaines d'expériences, seuls quelques stipes étaient encore présents dans les 3 compartiments de la cage à 10 kg/compartiments, quelques frondes et stipes restaient dans les cages à 15 kg/compartiment et à 20kg/compartiments. Après 4 semaines, plus aucune algue ne restait dans les cages, sauf dans les cages témoins. Les rations distribuées peuvent, par conséquent, être considérées insuffisantes par rapport à la consommation des ormeaux.

v) Croissance

Aucune différence de croissance en longueur n'a été observée suivant la quantité d'algue distribuée ($F=1,421$; $p=0,312$). La croissance moyenne était respectivement de 1,59 (+/-0,87) mm soit 0,06 mm/j pour LD10 ; 2,83 (+/-0,29) mm soit 0,10 mm/j pour LD15 et 2,23 (+/-0,17) mm soit 0,08 mm/j cm pour LD20.

IV-4) Discussion

Les suivis de température ont permis d'observer une température générale légèrement plus élevée dans la cage lorsque 20kg d'algue/compartiment étaient distribués par rapport à la cage où 15kg/compartiment étaient distribués. Des tests de températures ont permis de vérifier que les différences observées n'étaient pas dues à un problème de métrologie. Une panne de la sonde HOBO a empêché de suivre la température dans la cage à 10 kg/compartiment. On peut donc supposer que la quantité d'algue présente peut avoir un impact sur le flux d'eau dans le compartiment entraînant une variation de la dégradation par fermentation des algues.

La dégradation quantitative des algues n'a pas été significativement impactée par la quantité distribuée. Le pourcentage de dégradation maximal observé a été de 37%, tandis qu'il était aux alentours de 50% lors d'une étude menée dans des conditions similaires (Caralp, 2013). Cette différence de résultats pourrait s'expliquer par une amélioration des techniques de récolte de *L. digitata* entre 2012 et 2024 ou un changement de certains paramètres biotiques ou abiotiques du milieu. De plus, lors de l'expérience effectuée, les conditions ont été relativement clémentes avec une température maximale de l'eau de 25°C. La température étant un facteur important dans la dégradation des laminaires (Migné et al., 2019), reconduire ces expériences lorsque la température de l'eau devient plus élevée pourrait permettre d'observer des différences significatives entre les conditions testées. Les quantités testées correspondaient aux standards de distribution obtenus lors des tests de pesées effectuées en marées. En général, les différences de quantités distribuées entre les cages ne peuvent donc pas être retenues comme un facteur explicatif des différences de dégradation des laminaires entre les cages. Cependant, il est arrivé de façon exceptionnelle, à cause d'aléas ayant entraîné des retards dans la distribution ou le dédoublement des cages que la quantité distribuée ait été très au-dessus des quantités normales distribuées (estimée à plus de 40 kg/compartiment). Dans ces cages, une forte dégradation a été observée. La quantité distribuée pourrait par conséquent avoir un impact sur la dégradation des algues mais seulement à des quantités très au-dessus des standards de distribution actuels de France Haliotis. Des tests complémentaires, similaires à ceux effectués mais avec des rations testées plus importantes pourraient être mis en place.

La dégradation qualitative des algues en fonction de la quantité distribuée a cependant pu être sous-estimée du fait de la stratification de la dégradation. Les observations régulières dans les cages ont révélé l'apparition d'une « bouillie » d'algue dans le fond de la cage lorsque la dégradation est importante. Il est impossible d'effectuer des prélèvements sur ces algues les plus dégradées du fait de leur état liquide. Les algues sur le dessus du compartiment restent cependant en relativement bon état.

La relevée hebdomadaire des cages pour effectuer les mesures a également pu affecter la dégradation des laminaires. D'une part, la montée de la cage a pu entraîner un brassage de la matière qui n'a pas lieu lorsque les cages sont laissées au fond de l'eau. D'autre part, la sortie de l'eau entraîne une augmentation de la température mais aussi une exposition aux rayonnements lumineux qui peut être susceptible d'augmenter l'activité photosynthétique de l'algue ou au contraire de photo-inhiber cette activité si le rayonnement est trop important.

V- Effet des pratiques de stockage de *Laminaria Digitata* sur sa conservation

V-1) Introduction

Lorsque les algues sont stockées après la récolte, elles peuvent être soumises à de nombreux stress. La nature et l'intensité de ces stress peuvent varier suivant les conditions de stockage. A France Haliotis, deux méthodes de stockage sont utilisées. La première consiste à laisser les algues dans des bacs pendant la nuit. La seconde consiste à les stocker dans des cages et les immerger dans l'eau pour la nuit.

Un premier facteur pouvant accélérer la dégradation des algues lors du stockage est la température. *Laminaria digitata* cesse de se reproduire à des températures supérieures à 18°C, la limite létale étant atteinte dès 22°C (Perez, 1971; Cosson, 1973). La répétition de vagues de chaleur est par ailleurs décrite comme le facteur principal de dégradation des laminaires lors des périodes d'émersion (Migné et al., 2019). Une forte chaleur peut, en effet, provoquer une suraccumulation de ROS non détoxifiés qui va provoquer l'inhibition de la photosynthèse et surtout l'oxydation des lipides, protéines, et acides nucléiques des cellules qui vont conduire à leur autodestruction (Bischof and Rautenberger, 2012). Des différences de résistance au stress thermique sont cependant observables entre les populations. Les populations des côtes bretonnes (Quiberon et Roscoff) présentent une résistance accrue aux hausses de température (et une plus grande diversité génétique) (Liesner et al., 2022). On peut supposer que la température aura un impact plus important sur les algues à l'air libre que sur les algues immergées. Ce stress peut être accentué par la dessiccation qui peut être engendrée par le vent pour les algues stockées à l'air libre.

Ensuite, suivant les conditions de stockage la luminosité peut être impactée. En conditions normales, les laminaires sont exposées à une intensité lumineuse réduite comprise entre 10 et 20 % de la lumière incidente (Lüning et al., 1992). Une surexposition ou une sous-exposition à la lumière peut par conséquent être néfaste à l'algue provoquant notamment une photoinhibition (Rodrigues et al., 2002). Forster et Lüning (1996) affirment par exemple qu'une exposition pendant 1 h à des UV non filtrés équivalents à la lumière de juin provoque la perte de la capacité photosynthétique. Ceci est en accord avec les observations de Migné (2019). Selon Rodrigues (2002), les laminaires recouvrent leur capacité photosynthétique après une exposition de 6h à une luminosité faible.

V-2) Matériels et méthodes

V-2-1) Matériels biologiques

i) Ormeaux

Les ormeaux utilisés étaient âgés de deux ans et demi et ont déjà passé 1 an et demi en mer (génération 2022). Ces ormeaux avaient une longueur moyenne de 3,90 (+/-0,32) cm pour une masse moyenne de 7,51 (+/-2,32) g.

ii) Algues

La *Laminaria digitata* a été récoltée les 23 et 24 juillet 2024 sur le site de La Malouine (48,6271399 ; -4,5988720) et de La Pendante (48,6259947 ; -4,6071288) au large de l'île de Stagadon.

V-2-2) Dispositif expérimental

Deux conditions de conservation ont été testées : à l'air libre sur le pont du bateau pendant une nuit (P), dans une cage immergée pendant la nuit (I). Les algues soumises à ces conditions de conservation ont été comparées à des algues fraîches ayant été récoltées le jour de la mise en cage (J0)

Après une nuit de conservation, les algues des conditions P et I ont été mises en cage en mer. Les algues de la condition J0 ont directement été mises en cage en mer.

Suite aux résultats de l'expérience 3, pour chaque condition, les 4 compartiments d'une cage ont été remplis avec 20 kg de laminaire (Figure 23).

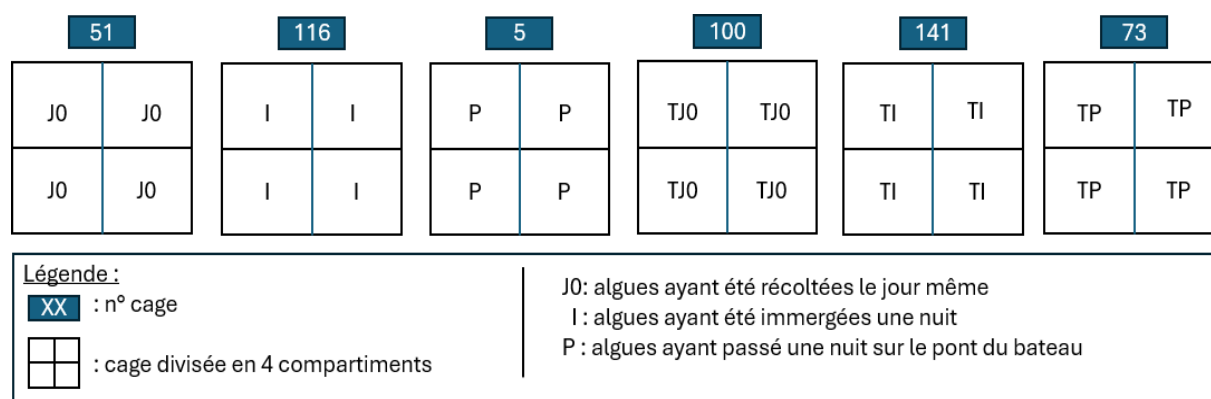


Figure 23 : Plan expérimental de l'effet des pratiques de stockage sur la conservation.

V-2-3) Mesures

i) Température

La température a été enregistrée durant toute la durée de l'expérience par des sondes Hobo réalisant un relevé de température toutes les 10 minutes.

Durant la nuit de conservation, une sonde Hobo a été placée au milieu des algues du bac laissé sur le pont (P) et une autre au milieu des algues de la cage immergée (I). Pour mesurer la température de l'air et de l'eau, une sonde était également mise en place sur le pont du bateau et une autre sur le couvercle de la cage immergée (I).

Durant le reste de l'expérience, une sonde était placée sur le couvercle de l'une des cages pour mesurer la température de l'eau.

ii) Autres mesures

La consommation d'algue, la croissance et la dégradation des algues ont été mesurées selon les mêmes protocoles que ceux de l'expérience 3.

V-3) Résultats

i) Température

La température moyenne était similaire dans les bacs d'algues (18,51 (+/-0,14) °C) à celle de l'air (18,89 (+/-0,32) °C). De la même manière, celle dans les cages immergées (16,52 (+/-0,19) °C) était semblable à celle de l'eau (16,86 (+/-0,30) °C).

Les conditions de stockage ont un impact significatif sur la température moyenne dans les tas d'algues ($t=0,656$; $p<0,001$). En effet, malgré une baisse progressive des températures de l'air à partir de 16h30, la température des algues dans le bac laissé sur le pont a continué d'augmenter passant de 16,94 °C à 16h30 à 19,09 °C à 10h30 le lendemain. Sur la même période, la température des algues immergées a légèrement diminué passant de 16,26 °C à 15,18 °C (Figure 24).

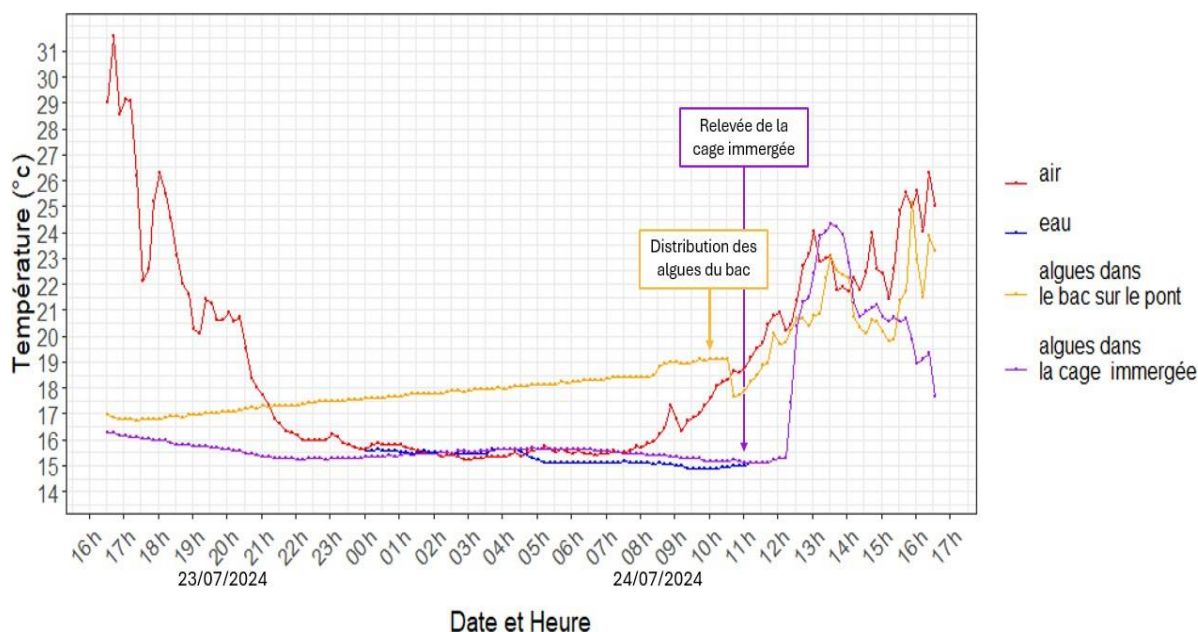


Figure 24 : Evolution des températures selon les conditions de stockage.

Durant le stockage, la sonde mesurant la température de l'eau étant placée sur la cage immergée, la température de l'eau a cessé d'être enregistrée après la remontée de celle-ci.

Durant l'expérience, la température de l'eau moyenne était de 15,46 (+/-0,001) °C, le maximum était de 16,86 °C et le minimum de 14,71 °C. Le 1er quartile (25%), la médiane et le 3^{ème} quartile (75%) étaient respectivement de 15,23 °C ; 15,44 °C et 15,70 °C.

ii) Dégradation quantitative des algues

Bien que la perte de matière journalière moyenne ait varié selon les conditions : 195 (+/-0,036) g/j pour la condition TJ0, 255 (+/-0,042) g/j pour la condition TI et 279 (+/-0,047) ; ces différences n'étaient pas assez importantes pour être significatives ($F= 1,047$; $p=0,390$) (Figure 26).

iii) Dégradation qualitative des algues

Des différences significatives de colorimétrie ont été observées selon les conditions ; L^* ($F=16,095$; $p<0,001$), a^* ($F=6,185$; $p=0,002$), b^* ($F=12,870$; $p<0,001$), Eab ($F=9,951$; $p<0,001$). Cependant, concernant les conditions "immergée" et "pont", seuls les pixels de la couche b^* sont significativement différents ($t=3,086$; $p=0,006$) (Figure 25).

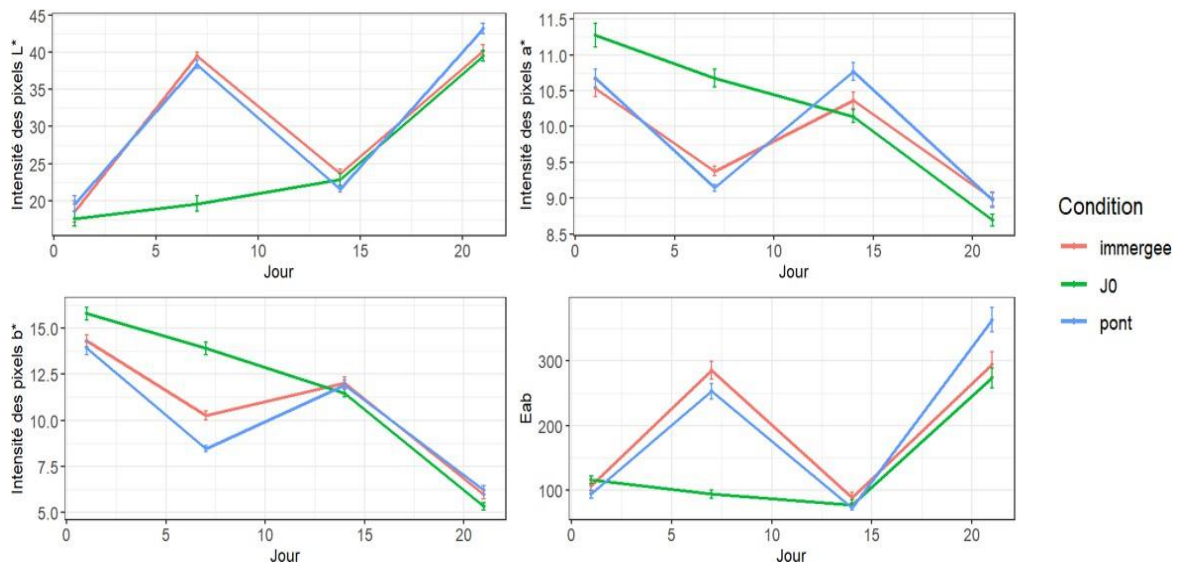


Figure 25 : Evolution de l'intensité des pixels des couches colorimétriques L*, a* b* et de l'écart par rapport à des algues fraîches Eab de de *Laminaria digitata* selon les conditions de stockage.

iv) Consommation

Aucune différence significative de consommation n'a été observée ($F=1,058$; $p=0,387$). La consommation journalière moyenne était de $0,576$ ($\pm 0,066$) g/j/compartiment pour la condition J0, $0,679$ ($\pm 0,045$) g/j/compartiment pour la condition I et $0,660$ ($\pm 0,045$) g/j/compartiment pour la condition P (Figure 26). Ces indices de consommation correspondraient à une consommation mensuelle de $17,3$ ($\pm 3,9$) kg/compartiment pour la condition J0 ; $20,4$ ($\pm 2,7$) kg/compartiment pour la condition I et $19,786$ ($\pm 2,7$) kg/compartiment pour la condition P.

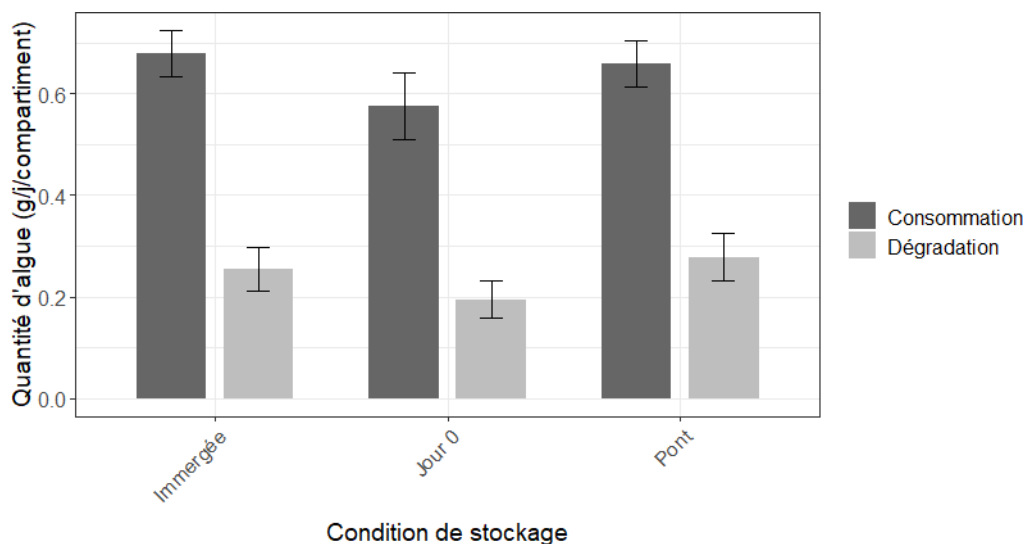


Figure 26 : Quantité d'algue dégradée et consommée selon les conditions de stockage.

V-4) Discussion

Les suivis de températures ont permis de démontrer qu'immerger les cages pour stocker les algues est un moyen efficace d'éviter leur réchauffement. Le stockage sur le pont a en revanche provoqué une augmentation progressive de la température qui a atteint des maxima supérieurs à 18 °C qui est considéré comme un seuil de stress important pour l'algue (Perez, 1971). La température létale de 22 °C n'a cependant pas été atteinte (Cosson, 1973).

Les tests de dégradation quantitatifs et qualitatifs ne montrent pas de différence de dégradation selon les conditions de stockage entre le pont ou dans une cage immergée. La dégradation quantitative tendait cependant à être plus importante pour les algues stockées sur le pont que pour celles immergées ou issues de la récolte du jour. La dégradation a cependant pu être surévaluée du fait de la relevée hebdomadaire des cages qui peut provoquer un stress thermique et UV en plus d'un échappement de matière du au reflux d'eau.

De légères différences de colorimétrie sont observables entre les algues fraîches (J0) et les algues des autres conditions de stockage mais ces différences semblent s'estomper au fur et à mesure du temps passé dans les cages en mer. De plus, les différences de colorimétrie des algues J0 sont principalement observables au jour 7 de l'expérience. A ce moment de l'expérience, la colorimétrie semble indiquer une dégradation importante, plus importante que celle observée lors de l'expérience 1 où les algues ont été placées en condition de stress importante. Pendant la récolte, les algues sont stockées dans des annexes en aluminium avant d'être transférés à l'autre bateau pour la distribution ou le stockage. Les différences de valeurs entre J0 et les autres conditions pourraient être dues au fait que les algues de la condition J0 ont été récoltées le lendemain par rapport aux autres conditions. Or, le jour de la récolte des algues de la condition J0, la température était en moyenne plus élevée que celle du jour de la récolte des algues des conditions I et P. Le stress pendant la récolte a donc pu être plus fort pour les algues de la condition J0. Au regard des augmentations de température qui ont eu lieu la nuit en stockage sur le pont, on peut supposer que lorsque les algues sont stockées en annexe pendant la récolte en pleine journée, la température peut augmenter de façon importante au point d'atteindre des seuils délétères voir létaux pour les algues. Des suivis de la température pendant la récolte dans les annexes avec des sondes Hobo permettraient de vérifier ces hypothèses.

Enfin, la consommation n'a pas été impactée par la condition de stockage. Ceci laisse à penser que la condition de stockage n'a pas assez d'impact sur la qualité de l'algue pour avoir un impact sur sa consommation par les ormeaux.

Conclusions générales

Ce stage avait pour but d'étudier la dégradation de la laminaire digitée et d'optimiser les pratiques liées à son utilisation en algue fourrage pour la production d'ormeaux.

Les travaux réalisés ont permis de mettre en place un outil de mesure de la qualité des algues par suivi de la colorimétrie. Cet outil est efficace pour rendre compte de l'altération de la qualité des algues lorsque celle-ci est importante.

Il a également été démontré que la consommation de *L. digitata* par les ormeaux est significativement impactée par le niveau de dégradation de celle-ci. Maintenir une algue de bonne qualité permet ainsi d'améliorer sa consommation par les ormeaux.

Ensuite, malgré une augmentation de la température des algues lorsqu'elles sont stockées sur le pont qui n'est pas observée lors du stockage en mer, aucune différence dans la dégradation qualitative ou quantitative des algues n'a été observée. Le stockage n'a pas d'impact sur la consommation par les ormeaux. Il n'est par conséquent pas nécessaire de modifier les pratiques actuelles de stockage post-récolte.

Enfin, il s'avère que les variations mesurées dans les rations qui sont généralement distribuées actuellement n'ont pas d'impact sur la dégradation des laminaires. Au vu de la consommation moyenne et de la dégradation quantitative mesurée, on peut envisager une augmentation de la ration distribuée. Fixer la ration aux alentours de 25 kg/compartiment/mois permettrait de compenser la perte de biomasse due à la dégradation tout en s'approchant de la limite des maxima de consommation des ormeaux. L'augmentation de la ration permet également d'augmenter la quantité d'algue distribuée le jour de récolte et ainsi de diminuer la quantité d'algue qui reste stockée sur le pont. En effet, une partie importante du temps de travail du nourrissage consiste à la remontée des cages, par conséquent, distribuer plus d'algues pour chaque cage permet de travailler plus vite et laisser moins d'algues en stockage. Cette ration est calculée pour ne pas être trop importante pour pouvoir alimenter un nombre assez important de cages avec une récolte (environ 22 cages/récolte) tout en limitant les restes d'algues à la fin du mois. Ceci permet de réduire le travail lors du calibrage des ormeaux avant la vente. La dégradation qualitative et quantitative des algues distribuées devrait cependant être mesurée pour s'assurer que cette augmentation de la quantité ne provoque pas une augmentation de l'altération des algues.

Bibliographie

- Aguilera, J., Dummermuth, A., Karsten, U., Schriek, R., Wiencke, C., 2002. Enzymatic defences against photooxidative stress induced by ultraviolet radiation in Arctic marine macroalgae. *Polar Biol* 25, 432–441. <https://doi.org/10.1007/s00300-002-0362-2>
- Arzel, P., 1997. La flotille goémonière et l'exploitation du champ de laminaires sur les côtes bretonnes - Essai de synthèse.
- Auzoux-Bordenave, S., Badou, A., Gaume, B., Berland, S., Helléouet, M.-N., Milet, C., Huchette, S., 2010. Ultrastructure, chemistry and mineralogy of the growing shell of the European abalone *Haliotis tuberculata*. *Journal of Structural Biology* 171, 277–290. <https://doi.org/10.1016/j.jsb.2010.05.012>
- Basuyaux, O., 1997. Etude et modélisation des paramètres physico-chimiques sur la croissance de l'ormeau (*Haliotis tuberculata*) en élevage en circuit semi-ferme (Thèse de doctorat). Caen.
- Basuyaux, O., Blin, J.-L., Costil, K., Richard, O., Lebel, J.-M., Serpentine, A., 2018. Assessing the impacts of several algae-based diets on cultured European abalone (*Haliotis tuberculata*). *Aquat. Living Resour.* 31, 28. <https://doi.org/10.1051/alr/2018018>
- Belsher, T., 1986. Etude bibliographique de quelques espèces planctoniques et benthiques littorales de la Manche. *Ifremer* 4.
- Billy, S., Péronnet, I., 2003. Estimation du stock naturel d'ormeaux du Golfe du Morbihan. *BIOTIC [WWW Document]*, n.d. URL <https://www.marlin.ac.uk/biotic/browse.php?sp=4228&show=taxonomy> (accessed 4.20.24).
- Bischof, K., Rautenberger, R., 2012. *Ecological Studies*. pp. 109–132. https://doi.org/10.1007/978-3-642-28451-9_6
- Blain, C.O., Shears, N.T., 2019. Seasonal and spatial variation in photosynthetic response of the kelp *Ecklonia radiata* across a turbidity gradient. *Photosynth Res* 140, 21–38. <https://doi.org/10.1007/s11120-019-00636-7>
- Bracken, M., 2019. Evaluating physiological responses of a kelp to environmental changes at its vulnerable equatorward range limit. *PCI Ecol* 100010. <https://doi.org/10.24072/pci.ecology.100010>
- Caralp, C., 2013. Growth and gonadal development of *Haliotis tuberculata* fed 8 monospecific algal diets.
- Cardinaud, M., Offret, C., Huchette, S., Moraga, D., Paillard, C., 2014. The impacts of handling and air exposure on immune parameters, gene expression, and susceptibility to vibriosis of European abalone *Haliotis tuberculata*. *Fish & Shellfish Immunology* 36, 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.fsi.2013.09.034>
- Carefoot, T., Qian, P.-Y., Taylor, B., West, T., Osborne, J., 1993. Effect of starvation on energy reserves and metabolism in the Northern abalone, *Haliotis kamtschatkana*. *Aquaculture* 118, 315–325. [https://doi.org/10.1016/0044-8486\(93\)90466-C](https://doi.org/10.1016/0044-8486(93)90466-C)
- CEVA, 2021. Composition nutritionnelle des algues [WWW Document]. CEVA. URL <https://www.ceva-algues.com/document/fiches-de-composition-nutritionnelle-algues-alimentaires/> (accessed 8.18.24).
- Chauvaud, P., 2022. Semer l'ormeau dans le milieu naturel: rôles du milieu et des caractéristiques biologiques d'*Haliotis tuberculata* dans la réussite du repeuplement.
- Clavier, J., 1987. Contribution à la mise en valeur des populations d'ormeaux (*Haliotis tuberculata* L.).

- Clavier, J., Richard, O., 1986. Estimation du stock naturel d'ormeaux (*Haliotis tuberculata*) dans la région de Saint-Malo.
- Clavier, J., Richard, O., 1984. Etude expérimentale du déplacement de l'ormeau (*Haliotis tuberculata*) dans le milieu naturel. *Rev. Trav. Inst. Pêches marit.* 46, 315–326.
- Cochard, J.-C., 1982. La croissance de l'ormeau *Haliotis Tuberculata* en rade de Brest. *Haliotis* 61–69.
- Collén, J., Ekdahl, A., Abrahamsson, K., Pedersén, M., 1994. The involvement of hydrogen peroxide in the production of volatile halogenated compounds by *Meristiella gelidium*. *Phytochemistry* 36, 1197–1202. [https://doi.org/10.1016/S0031-9422\(00\)89637-5](https://doi.org/10.1016/S0031-9422(00)89637-5)
- Cook, P.A., 2023. Worldwide abalone production: an update. *New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research* 0, 1–7. <https://doi.org/10.1080/00288330.2023.2261869>
- Cook, P.A., Gordon, H.R., 2010. World Abalone Supply, Markets, and Pricing. *shre* 29, 569–571. <https://doi.org/10.2983/035.029.0303>
- Cosson, J., 1973. Action de la température et de la lumière sur le développement du gamétophyte de la *Laminaria digitata* (Phéophycée, Laminariale).
- Crépineau, F., Roscoe, T., Kaas, R., Kloareg, B., Boyen, C., 2000. [No title found]. *Plant Molecular Biology* 43, 503–513. <https://doi.org/10.1023/A:1006489920808>
- CRPMEM, 2023. DELIBERATION « ALGUES-CRPMEM – B ».
- CRPMEM Bretagne, 2022. Récolte des algues de rive en Bretagne.
- de Bettignies, F., Dauby, P., Thomas, F., Gobet, A., Delage, L., Bohner, O., Loisel, S., Davoult, D., 2020. Degradation dynamics and processes associated with the accumulation of *Laminaria hyperborea* (Phaeophyceae) kelp fragments: an in situ experimental approach. *Journal of Phycology* 56, 1481–1492. <https://doi.org/10.1111/jpy.13041>
- Delebecq, G., Davoult, D., Janquin, M.-A., Oppliger, L.V., Menu, D., Dauvin, J.-C., Gevaert, F., 2016. Photosynthetic response to light and temperature in *Laminaria digitata* gametophytes from two French populations. *European Journal of Phycology* 51, 71–82. <https://doi.org/10.1080/09670262.2015.1104556>
- Direction Général des Finances Publiques, 2012. TVA – Liquidation - Taux réduits – Produits et sous-produits d'origine agricole, de la pêche, de la pisciculture et de l'aviculture non transformés [WWW Document]. URL <https://bofip.impots.gouv.fr/bofip/273-PGP.html/identifiant=BOI-TVA-LIQ-30-10-20-20120912> (accessed 8.13.24).
- Drach, P., 1949. Premières recherches en scaphandre autonome sur les formations de laminaires en zone littorale profonde (No. 227). Société de biogéographie de Paris.
- Dummermuth, A.L., Karsten, U., Fisch, K.M., König, G.M., Wiencke, C., 2003. Responses of marine macroalgae to hydrogen-peroxide stress. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 289, 103–121. [https://doi.org/10.1016/S0022-0981\(03\)00042-X](https://doi.org/10.1016/S0022-0981(03)00042-X)
- Fallu, R., 1991. Abalone Farming, Wiley Blackwell. ed.
- FAO, 2022. FAO Fisheries & Aquaculture - Global Aquatic Processed Production Statistics Quantity (1976 - 2022) [WWW Document]. URL https://www.fao.org/fishery/statistics-query/en/trade_pp/trade_pp_quantity (accessed 8.8.24).
- Forster, 1962. Observation of ormer populations of Guernsey. *J. Mar. Biol. Assoc. U.K.* 42, 493–498.
- Forster, G.R., 1967. The growth of *Haliotis tuberculata*: results of tagging experiments in Guernsey 1963–65. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom* 47, 287–300. <https://doi.org/10.1017/S002531540005640X>
- Forster, R., Lüning, K., 1996. Photosynthetic response of *Laminaria digitata* to ultraviolet A and B radiation. *Scientia Marina* 60, 65–71.

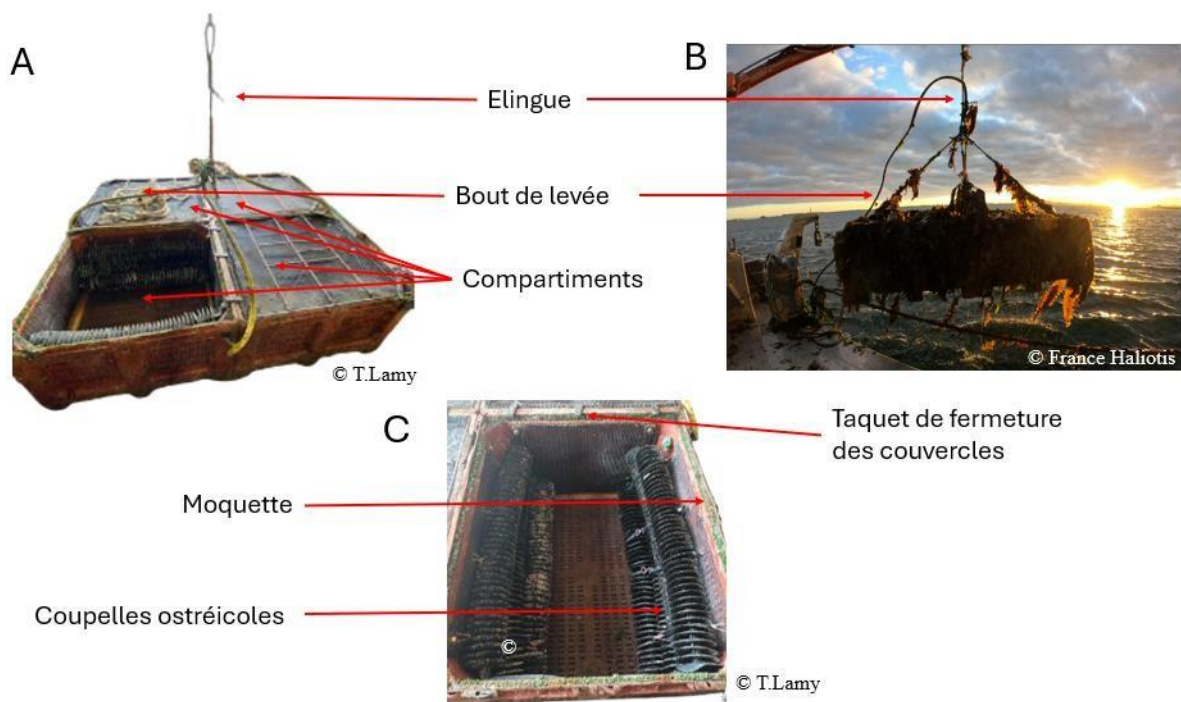
- France Haliotis, producteur d'ormeaux [WWW Document], n.d. . France Haliotis. URL <https://www.francehaliotis.com> (accessed 4.18.24).
- Gayral, P. (Paulette), 1966. Les Algues de côtes françaises (manche et atlantique), notions fondamentales sur l'écologie, la biologie et la systématique des algues marines. Paris, Doin, Deren et Cie.
- Géoportail [WWW Document], n.d. URL <https://www.geoportail.gouv.fr/> (accessed 8.12.24).
- Goldstein, D.S., Kopin, I.J., 2007. Evolution of concepts of stress. *Stress* 10, 109–120. <https://doi.org/10.1080/10253890701288935>
- Hobday, A.J., Alexander, L.V., Perkins, S.E., Smale, D.A., Straub, S.C., Oliver, E.C.J., Benthuyssen, J.A., Burrows, M.T., Donat, M.G., Feng, M., Holbrook, N.J., Moore, P.J., Scannell, H.A., Sen Gupta, A., Wernberg, T., 2016. A hierarchical approach to defining marine heatwaves. *Progress in Oceanography* 141, 227–238. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2015.12.014>
- Huchette, S.M.H., Clavier, J., 2004. Status of the ormer (*Haliotis tuberculata* L.) industry in Europe. *Journal of Shellfish Research* 23, 951–956.
- IDEALG, 2019. Valorizing seaweed with abalone.
- Karsten, U., 2012. Seaweed Acclimation to Salinity and Desiccation Stress [WWW Document]. URL <http://ouci.dntb.gov.ua/en/works/7WM2wmal/> (accessed 8.12.24).
- Keng, F.S.-L., Phang, S.-M., Abd Rahman, N., Leedham Elvidge, E.C., Malin, G., Sturges, W.T., 2020. The emission of volatile halocarbons by seaweeds and their response towards environmental changes. *J Appl Phycol* 32, 1377–1394. <https://doi.org/10.1007/s10811-019-02026-x>
- Klarzynski, O., Plesse, B., Joubert, J.M., Yvin, J.C., Kopp, M., Kloareg, B., Fritig, B., 2000. Linear beta-1,3 glucans are elicitors of defense responses in tobacco. *Plant Physiol* 124, 1027–1038. <https://doi.org/10.1104/pp.124.3.1027>
- Krause-Jensen, D., Duarte, C.M., 2016. Substantial role of macroalgae in marine carbon sequestration. *Nature Geosci* 9, 737–742. <https://doi.org/10.1038/ngeo2790>
- Küpper, F.C., Kloareg, B., Guern, J., Potin, P., 2001a. Oligoguluronates Elicit an Oxidative Burst in the Brown Algal Kelp *Laminaria digitata*. *Plant Physiol* 125, 278–291.
- Küpper, F.C., Kloareg, B., Guern, J., Potin, P., 2001b. Oligoguluronates Elicit an Oxidative Burst in the Brown Algal Kelp *Laminaria digitata*. *Plant Physiol* 125, 278–291.
- Lachambre, S., Day, R., Boudry, P., Huchette, S., Rio-Cabello, A., Fustec, T., Roussel, S., 2017. Stress response of farmed European abalone reveals rapid domestication process in absence of intentional selection. *Applied Animal Behaviour Science* 196, 13–21. <https://doi.org/10.1016/j.applanim.2017.07.004>
- Le Petit, M., 2009. Monographie et étude de la dynamique de population d'*Haliotis tuberculata* au Sénégal. Faculté de médecine de Créteil.
- Leblanc, C., Schaal, G., Cosse, A., Destombe, C., Valero, M., Riera, P., Potin, P., 2011. Trophic and biotic interactions in *Laminaria digitata* beds: what influences on the persistence of the marine kelp forests ? *Cahiers de Biologie Marine* 52, 415–427.
- Li, J., Mao, Y., Jiang, Z., Zhang, J., Fang, J., Bian, D., 2018. The detrimental effects of CO₂-driven chronic acidification on juvenile Pacific abalone (*Haliotis discus hannai*). *Hydrobiologia* 809, 297–308. <https://doi.org/10.1007/s10750-017-3481-z>
- Li, J.Z., Absher, D.M., Tang, H., Southwick, A.M., Casto, A.M., Ramachandran, S., Cann, H.M., Barsh, G.S., Feldman, M., Cavalli-Sforza, L.L., Myers, R.M., 2008. Worldwide Human Relationships Inferred from Genome-Wide Patterns of Variation. *Science* 319, 1100–1104. <https://doi.org/10.1126/science.1153717>
- Liesner, D., Fouqueau, L., Valero, M., Roleda, M.Y., Pearson, G.A., Bischof, K., Valentin, K., Bartsch, I., 2020. Heat stress responses and population genetics of the kelp *Laminaria digitata* (Phaeophyceae) across latitudes reveal differentiation among

- North Atlantic populations. *Ecology and Evolution* 10, 9144–9177. <https://doi.org/10.1002/ece3.6569>
- Liesner, D., Pearson, G.A., Bartsch, I., Rana, S., Harms, L., Heinrich, S., Bischof, K., Glöckner, G., Valentin, K., 2022. Increased Heat Resilience of Intraspecific Outbred Compared to Inbred Lineages in the Kelp *Laminaria digitata*: Physiology and Transcriptomics. *Front. Mar. Sci.* 9. <https://doi.org/10.3389/fmars.2022.838793>
- Lima, F.P., Wetthey, D.S., 2012. Three decades of high-resolution coastal sea surface temperatures reveal more than warming. *Nat Commun* 3, 704. <https://doi.org/10.1038/ncomms1713>
- Lingens, F., van Pée, K.-H., 1988. Biohalogenation. Principles, Basic Roles, and Applications. Von S. L. Neidleman und J. Geigert. Ellis Horwood, Chichester 1986. 203 S., geb. £25.00. – ISBN 0-85312-984-3. *Angewandte Chemie* 100, 315–315. <https://doi.org/10.1002/ange.19881000244>
- Mai, K., Mercer, J.P., Donlon, J., 1995. Comparative studies on the nutrition of two species of abalone, *Haliotis tuberculata* L. and *Haliotis discus hannai* Ino. IV. Optimum dietary protein level for growth. *Aquaculture* 136, 165–180. [https://doi.org/10.1016/0044-8486\(95\)01041-6](https://doi.org/10.1016/0044-8486(95)01041-6)
- Mallick, N., Mohn, F.H., 2000. Reactive oxygen species: response of algal cells. *Journal of Plant Physiology* 157, 183–193. [https://doi.org/10.1016/S0176-1617\(00\)80189-3](https://doi.org/10.1016/S0176-1617(00)80189-3)
- Marfaing, H., 2020. La récolte des algues en France : quelle quantité de biomasse récoltée ? Sensalg. URL <https://sensalg.fr/la-recolte-des-algues-en-france-quelle-quantite-de-biomasse-recoltee/> (accessed 4.20.24).
- McBride, S.C., Price, R.J., Tom, P.D., Lawrence, J.M., Lawrence, A.L., 2004. Comparison of gonad quality factors: color, hardness and resilience, of *Strongylocentrotus franciscanus* between sea urchins fed prepared feed or algal diets and sea urchins harvested from the Northern California fishery. *Aquaculture* 233, 405–422. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2003.10.014>
- McConnell, O.J., Fenical, W., 1980. Halogen chemistry of the red alga *Bonnemaisonia*. *Phytochemistry* 19, 233–247. [https://doi.org/10.1016/S0031-9422\(00\)81967-6](https://doi.org/10.1016/S0031-9422(00)81967-6)
- McShane, P.E., Gorfine, H.K., Knuckey, I.A., 1994. Factors influencing food selection in the abalone *Haliotis rubra* (Mollusca: Gastropoda). *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 176, 27–37. [https://doi.org/10.1016/0022-0981\(94\)90195-3](https://doi.org/10.1016/0022-0981(94)90195-3)
- Mesnildrey, L., Jacob, C., Frangoudes, K., Reunavot, M., Lesueur, M., 2012. Seaweed industry in France. Report Interreg program NETALGAE 42 p.
- Mgaya, Y.D., 1994. Synopsis of biological data on the european abalone (Ormer), *Haliotis tuberculata* Linnaeus, 1758 (Gastropoda: Haliotidae).
- Migné, A., Delebecq, G., Davoult, D., Spilmont, N., Menu, D., Janquin, M.-A., Gevaert, F., 2019. Photosynthesis of *Laminaria digitata* during the immersion and emersion periods of spring tidal cycles during hot, sunny weather.
- Molis, M., Enge, A., Karsten, U., 2010. Grazing Impact of, and Indirect Interactions Between Mesograzers Associated with Kelp (*Laminaria Digitata*)1. *Journal of Phycology* 46, 76–84. <https://doi.org/10.1111/j.1529-8817.2009.00787.x>
- Moore, P.G., 1973. The larger crustacea associated with hofasts of kelp (*Laminaria hyperborea*) in Nort-East Brittain. *Cahiers de Biologie Marine* XIV, 493–518.
- Mottet, M.G., 1978. A Review of the Fishery Biology of Abalones. State of Washington, Department of Fisheries.
- Mtolera, M.S.P., Collén, J., Pedersén, M., Ekdahl, A., Abrahamsson, K., Semesi, A.K., 1996. Stress-induced production of volatile halogenated organic compounds in *Eucheuma denticulatum* (Rhodophyta) caused by elevated pH and high light intensities. *European Journal of Phycology* 31, 89–95. <https://doi.org/10.1080/09670269600651241>

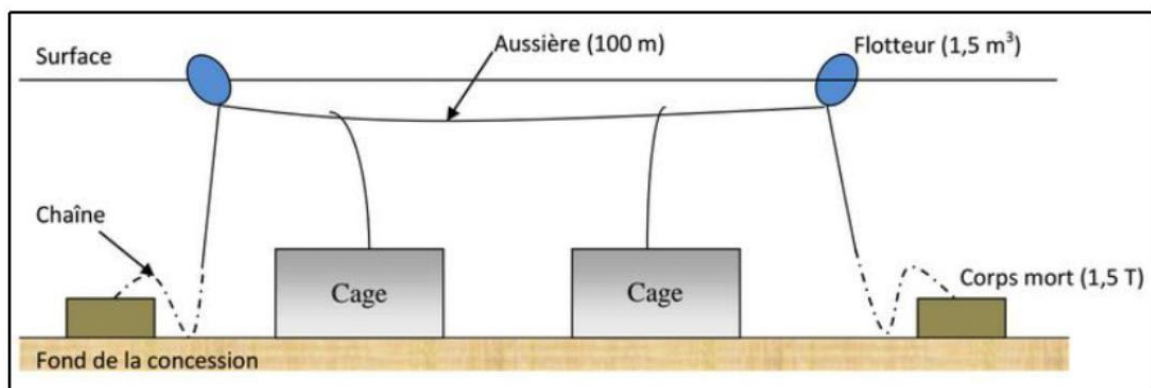
- Oliver, E.C.J., Donat, M.G., Burrows, M.T., Moore, P.J., Smale, D.A., Alexander, L.V., Benthuyssen, J.A., Feng, M., Sen Gupta, A., Hobday, A.J., Holbrook, N.J., Perkins-Kirkpatrick, S.E., Scannell, H.A., Straub, S.C., Wernberg, T., 2018. Longer and more frequent marine heatwaves over the past century. *Nat Commun* 9, 1324. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-03732-9>
- Pedersén, M., Collén, J., Abrahamson, K., Mtolera, M.S.P., Semesi, A.K., Garcia Reina, G., 1996. The ice-ice disease and oxidative stress of marine algae.
- Perez, R., 1971. Ecologie, croissance et regeneration, teneurs en acide alginique de *Laminaria digitata* sur les cotes francaises de la Manche. *Revue des Travaux de l'Institut des Pêches Maritimes* 35, 287–346.
- Ritter, A., Cabioch, L., Brillet-Guéguen, L., Corre, E., Cosse, A., Darteville, L., Duruflé, H., Fasshauer, C., Goulitquer, S., Thomas, F., Correa, J.A., Potin, P., Faugeton, S., Leblanc, C., 2017. Herbivore-induced chemical and molecular responses of the kelps *Laminaria digitata* and *Lessonia spicata*. *PLOS ONE* 12, e0173315. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0173315>
- RNM, 2024. ORMEAU- prix cours marché - Pêche et aquaculture [WWW Document]. URL <https://rnm.franceagrimer.fr/prix?ORMEAU> (accessed 2.26.24).
- Rodrigues, M.A., Santos, C.P.D., Yoneshigue-Valentin, Y., Strbac, D., Hall, D.O., 2002. Photosynthetic light-response curves and photoinhibition of the deep-water laminaria abyssalis and the intertidal laminaria digitata (phaeophyceae).
- Roeder, V., 2006. Recherche et étude de marqueurs moléculaires de la réponse au stress chez l'algue brune *Laminaria digitata*.
- Roleda, M.Y., Hanelt, D., Wiencke, C., 2006. Growth and DNA damage in young *Laminaria* sporophytes exposed to ultraviolet radiation: implication for depth zonation of kelps on Helgoland (North Sea). *Marine Biology* 148, 1201–1211. <https://doi.org/10.1007/s00227-005-0169-0>
- Roussel, S., Poitevin, P., Day, R., Le Grand, F., Stiger-Pouvreau, V., Leblanc, C., Huchette, S., 2020a. *Haliotis tuberculata*, a generalist marine herbivore that prefers a mixed diet, but with consistent individual foraging activity. *Ethology* 126, 716–726. <https://doi.org/10.1111/eth.13020>
- Roussel, S., Poitevin, P., Day, R., Le Grand, F., Stiger-Pouvreau, V., Leblanc, C., Huchette, S., 2020b. *Haliotis tuberculata*, a generalist marine herbivore that prefers a mixed diet, but with consistent individual foraging activity. *Ethology* 126, 716–726. <https://doi.org/10.1111/eth.13020>
- Russel, G., 2007. Recent evolutionary changes in the algae of the Baltic Sea 20. <https://doi.org/10.1080/00071618500650111>
- Shepherd, 1973. Studies on southern Australian abalone (genus *Haliotis*). *Australian Journal of Marine and Freshwater Research* 1. Ecology of five sympatric species, 217–257. <https://doi.org/10.1071/MF9730217>
- Stévant, P., Marfaing, H., Rustad, T., Sandbakken, I., Fleurence, J., Chapman, A., 2017. Nutritional value of the kelps *Alaria esculenta* and *Saccharina latissima* and effects of short-term storage on biomass quality. *J Appl Phycol* 29, 2417–2426. <https://doi.org/10.1007/s10811-017-1126-2>
- Thomas, D.N., Kirst, G.O., 1991. Salt Tolerance of *Ectocarpus siliculosus* (Dillw.) Lyngb.: Comparison of Gametophytes, Sporophytes and Isolates of Different Geographic Origin. *Botanica Acta* 104, 26–36. <https://doi.org/10.1111/j.1438-8677.1991.tb00190.x>
- Travers, M.-A., 2008. Interaction de la bactérie *Vibrio harveyi* avec son hôte, l'ormeau *Haliotis tuberculata* : approches physiologiques, cellulaires et moléculaires. Université de Bretagne Occidentale, Brest.

- Viera, M.P., Courtois de Viçose, G., Robaina, L., Izquierdo, M.S., 2015. First development of various vegetable-based diets and their suitability for abalone *Haliotis tuberculata coccinea* Reeve. *Aquaculture* 448, 350–358. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2015.05.031>
- Wheeler, W.N., 1980. Pigment content and photosynthetic rate of the fronds of *Macrocystis pyrifera*. *Mar. Biol.* 56, 97–102. <https://doi.org/10.1007/BF00397127>
- Wright, L.S., Foggo, A., 2021. Photosynthetic pigments of co-occurring Northeast Atlantic *Laminaria* spp. are unaffected by decomposition. *Marine Ecology Progress Series* 678, 227–232. <https://doi.org/10.3354/meps13886>
- Wright, L.S., Kregting, L., 2023. Genus-specific response of kelp photosynthetic pigments to decomposition. *Mar Biol* 170, 144. <https://doi.org/10.1007/s00227-023-04289-y>

Annexe I : Cage d'élevage d'ormeaux. A) Cage d'élevage. B) Relevée de cage en mer. C) Compartiment.



Annexe II : Schéma d'une filière en mer. © France Haliotis



Annexe III : Evolution de la colorimétrie de *L. digitata* en fonction du temps passé en décanteur.
a. Algues de la récolte du jour, b. Après une semaine en décanteur, c. Après 2 semaines en décanteur, d. Après 3 semaines en décanteur.



	Diplôme : Ingénieur Spécialité : Agronomie Spécialisation / option : Sciences halieutiques et aquacoles / AQUA Enseignant référent : Hervé Le Bris	
Auteur(s) : Thomas LAMY Date de naissance* : 10/03/2000	Organisme d'accueil : SCEA France Haliotis Adresse : 70 Aod Kerazan Lilia, 29880 Plouguerneau	
Nb pages : 35 Annexe(s) : 3	Maître de stages : Guillaume Colin, Sylvain Huchette	
Année de soutenance : 2024		
Titre français : Etude de la dégradation de la laminaire digitée (<i>Laminaria digitata</i>) en algue fourrage pour l'aquaculture d'ormeaux (<i>Haliotis tuberculata</i>) Titre anglais : Study of the degradation of kelp (<i>Laminaria digitata</i>) into forage seaweed for abalone aquaculture (<i>Haliotis tuberculata</i>)		
Résumé : L'ormeau européen (<i>Haliotis tuberculata</i>) est un herbivore opportuniste. Son alimentation est un facteur clé de sa croissance. Au cours de son cycle de production à France Haliotis, diverses espèces d'algues sont utilisées comme fourrage (<i>Saccharina latissima</i>, <i>Ulva sp</i>, <i>Palmaria palmata</i> ...). Parmi elles, la laminaire digitée (<i>Laminaria digitata</i>) issue de la récolte en algue de rive représente une part importante de l'alimentation distribuée (jusqu'à 70% certaines années). Cette importance dans le cycle de production pousse à améliorer les pratiques liées à son utilisation. Cette algue est principalement distribuée de mai à septembre, lors de cette période de potentielles dégradations peuvent être observées à cause de facteurs biotiques et abiotiques. Les travaux menés ont permis de démontrer que la colorimétrie pouvait être utilisée comme un indicateur de sa dégradation lorsque celle-ci était importante. De plus, la fraîcheur de cette algue impacte sa consommation par les ormeaux. Ensuite, les différences dans les rations qui sont distribuées actuellement à France Haliotis n'engendrent pas de différences de dégradation significatives de la qualité de l'algue mais peuvent être optimisées. Enfin, malgré une différence de réchauffement des algues selon la méthode de stockage, celle-ci n'a pas d'impact significatif sur sa dégradation ou sa consommation par les ormeaux.		
Abstract : The European abalone (<i>Haliotis tuberculata</i>) is an opportunistic herbivore. Its diet is a key factor in its growth. During its production cycle in France Haliotis, various species of algae are used as fodder (<i>Saccharina latissima</i>, <i>Ulva sp</i>, <i>Palmaria palmata</i>, etc.). Among these, kelp (<i>Laminaria digitata</i>) harvested from shoreline accounts for a significant proportion of the feed distributed (up to 70% in some years). This importance in the production cycle has prompted improvements in practices relating to its use. This seaweed is mainly distributed from May to September, during which period potential degradation can be observed due to biotic and abiotic factors. The work carried out showed that colorimetry could be used as an indicator of its degradation when this was important. Secondly, the freshness of this algae has an impact on its consumption by abalone. Then, the differences in the rations currently distributed to France Haliotis do not result in significant differences in the degradation of the quality of the algae, but they can be optimised. Finally, despite a difference in the heating of the seaweed according to the storage method, this has no significant impact on its degradation or consumption by the abalone.		
Mots-clés : <i>Haliotis tuberculata</i> , <i>Laminaria digitata</i> , dégradation, consommation, production Key Words: <i>Haliotis tuberculata</i> , <i>Laminaria digitata</i> , deterioration, consumption, production		