

Année universitaire : 2022 - 2023

Spécialité :

Ingénieur Agronome

Spécialisation (et option éventuelle) :

Sciences Halieutiques et aquacoles (AQUA)

Mémoire de fin d'études

de l'Institut Agro Rennes-Angers (Institut national d'enseignement supérieur pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement)

de l'Institut Agro Rennes-Angers (Institut national d'enseignement supérieur pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement)

de l'Institut Agro Montpellier (Institut national d'enseignement supérieur pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement)

de l'Institut Agro Bordeaux-Mérignac (Institut national d'enseignement supérieur pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement)

Optimisation des pratiques de fertilisation d'*Ulva* spp dans le cadre d'une production labellisée « Agriculture Biologique »

Par : Morgane LANNOU



Soutenu à Rennes le 13/09/2023

Devant le jury composé de :

Président : Hervé Le Bris

Maîtres de stage : Guillaume Collin, Alexandre Berthelot

Enseignant référent : Hervé Le Bris

Autres membres du jury :

Grégory Raymond, Ingénieur d'étude, Institut Agro Rennes Angers

Philippe Potin, Directeur de recherche CNRS, 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⁾ :
(ou de l'étudiant-entrepreneur)

13/09/23


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 LANNOU Morgane

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 : 13/09/2023



Autorisation de diffusion par le responsable de spécialisation ou son représentant

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

Oui Non

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

Si oui, il autorise

- la diffusion papier du mémoire uniquement⁽⁴⁾
- la diffusion papier du mémoire et la diffusion électronique du résumé
- la diffusion papier et électronique du mémoire

Date et signature de l'enseignant :

H. Le Bris



(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 rédige 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

Remerciements

En premier lieu, merci à Sylvain Huchette, qui a eu la gentillesse de m'accueillir au sein de France Haliotis et de m'offrir cette opportunité de stage. Mes remerciements s'adressent également à mon maître de stage Guillaume, pour son encadrement et ses conseils.

Je tiens également à exprimer ma gratitude envers Alexandre, qui m'a guidée avec patience et expertise tout au long du stage. Merci pour ton accompagnement et l'autonomie que tu m'as accordée. Enfin, merci pour le temps et l'attention apportés à la relecture de ce rapport.

Je remercie également chaleureusement tout le reste de l'équipe production, Titouan, Mary, Lou-Ann, Xavier et Gaël, pour leur accueil et leur aide. Merci aussi aux stagiaires et saisonniers, Malo, Nalini et Paul, pour leur compagnie pendant les longues heures de séchoir.

Merci également à l'équipe commerciale, Hélène, Frédéric, Mathis, Gaëlle, pour leur bonne humeur et leur bienveillance.

En somme, je remercie toute l'équipe de France Haliotis, ce stage était une expérience très enrichissante durant laquelle j'ai apprécié côtoyer des gens passionnés par leur métier. Je suis reconnaissante d'avoir pu en apprendre autant et de contribuer, à ma manière, aux objectifs de France Haliotis.

Merci à mes proches, famille et amis, pour le soutien durant ces 6 mois.

Enfin, puisque ce stage clôture 3 années de cycle ingénieur, je tiens finalement à remercier toutes les belles rencontres que j'ai pu y faire, merci d'avoir rendu ces années aussi enrichissantes et inoubliables !

Table des matières

Remerciements	1-1
Table des matières	1-2
Liste des abréviations	1-4
Table des annexes	1-5
Table des figures	1-6
Table des tableaux	1-7
1 Introduction	1
1.1 Les algues et leur culture : historique et état des lieux de la filière	1
1.1.1 Les algues, une ressource ancestrale ancrée culturellement	1
1.1.2 Une filière mondiale à la croissance récente largement dominée par l'Asie.....	1
1.1.3 Filière européenne et française : un poids plume dans la filière mondiale	2
1.2 Présentation du modèle biologique étudié : <i>Ulva</i> spp	3
1.3 L'ulve, une algue mal-aimée malgré ses nombreux atouts	5
1.3.1 Les phénomènes de marées vertes et leur impacts sur l'image d' <i>Ulva</i> spp.....	5
1.3.2 Les nombreuses applications des algues vertes	6
1.4 La culture d'ulves, une production aquacole à fort potentiel	6
1.4.1 Mode de culture terrestre : avantages et inconvénients	6
1.4.2 L'ulve comme algue fourrage	7
1.4.3 Une algue prometteuse dans le développement de l'Aquaculture Multi Trophique Intégrée (AMTI).....	7
1.5 Présentation de l'entreprise et contextualisation du sujet	8
1.5.1 France Haliotis, une entreprise unique et diversifiée.....	8
1.5.2 Labellisation « Agriculture Biologique » en algoculture.....	9
1.5.3 La fertilisation : une composante essentielle de l'algoculture pourtant encore peu maîtrisée	9
2 Matériel et méthodes	11
2.1 Identification du modèle biologique : <i>Ulva</i> spp	11
2.2 Présentation des structures de culture d'<i>Ulva</i> spp	11
2.2.1 Eau et aération, deux composantes essentielles de la culture des ulves	11
2.2.2 Anciens bassins de nurserie aménagés pour la culture d'algues	12
2.2.3 Dispositif expérimental.....	12
2.2.4 Raceways : une montée en puissance de la production.....	13
2.3 Ensemencement, récolte et entretien des bassins	13
2.4 Fertilisation	13
2.5 Récolte de souches sauvages	15
2.6 Résumé des expériences réalisées	16
2.7 Mesures de biomasse et indicateurs calculés	20
2.8 Analyses statistiques réalisées et représentations graphiques	20
3 Résultats	21
3.1 Faisabilité d'une fertilisation minérale	21

Expérience 1 et 2 – Fertilisation minérale à base de nitrate de sodium	21
Expérience 3 – Fertilisation minérale à base de nitrate de sodium et de phosphate de calcium	22
Expérience 4 – Comparaison de plusieurs combinaisons de fertilisants minéraux conventionnels et biologiques	23
3.2 Optimisation d'une fertilisation mixte	24
Expérience 5 et 6 – Fertilisation mixte avec deux fertilisants organiques différents : Geogreen Plus et Geogreen Start	24
Expérience 7 – Taux de croissance en fonction de la concentration en phosphate inorganique	25
3.3 Comparaison de la croissance de différentes souches avec la fertilisation mixte	26
Expérience 8 – Souches de Kerazan et de Guisény	26
Expérience 9 – Souches de l'anse du Guillec, de Cléder, de Plouescat et de Brignogan	26
4 Discussion	27
4.1 L'échec d'un passage à une fertilisation entièrement minérale en AB : causes et alternatives	27
4.2 Fertilisation mixte : des résultats encourageants, mais quelle représentativité pour une production en raceways ?	28
4.3 Optimisation de la fertilisation : dose, pratiques et rejets	30
4.4 Sélection de souches : des résultats prometteurs qui soulignent l'importance de critères autres que la croissance	31
4.5 Aspect économique d'un changement de fertilisation et rentabilité de la production	32
4.6 Vers d'autres critères que la production de biomasse	34
5 Conclusion	34
Bibliographie	36
Sitographie	43
Annexe I – Synthèse des règlements encadrant la production biologique des algues dans l'Union Européenne	1
Annexe II – Calcul des coûts de production des bassins de culture	2
Annexe III – Analyse colorimétrique des thalles d'<i>Ulva</i> spp.	3

Liste des abréviations

AB : **A**griculture **B**iologique

Ca₃(PO₄)₂ : Phosphate de calcium (ou phosphate tricalcique)

CEVA : **C**entre d'**É**tude et de **V**alorisation des **A**lgues

CO₂ : Dioxyde de carbone

CRPMEM : **C**omité **R**égional des **P**êches **M**aritimes et des **É**levages **M**arins

CSAVM : **C**hambre **S**yndicale des **A**lgues et des **V**égétaux **M**arins

e.g. : Par exemple (*exempli grata*)

EGTOP : **E**xpert **G**roup for **T**echnical advice on **O**rganic **P**roduction

ETP : **É**quivalent **T**emps **P**lein

FAO : **F**ood and **A**griculture **O**rganization of the United Nations

GP : **G**eogreen **P**lus

GS : **G**eogreen **S**tart

INAO : **I**nstitut **N**ational de l'**O**rigine et de la qualité

i.e. : C'est-à-dire (*id est*)

K₂O : Oxyde de potassium

N : Azote

Na₃PO₄ : Phosphate de sodium

NaNO₃ : Nitrate de sodium

NH₄NO₃ : Nitrate d'ammonium

[P_i] : Concentration en phosphate inorganique (exprimé en μmol.L⁻¹)

P₂O₅ : Anhydride phosphorique

PVC : **P**oly**C**hlorure de **V**inyle

R&D : Recherche et développement (**R**esearch & **D**evelopment)

RVB : **R**ouge – **V**ert – **B**leu

SE : Erreur standard (**S**tandard **E**rror)

SGR : Taux de croissance spécifique (**S**pecific **G**rowth **R**ate)

sp : Espèce (**s**pecies)

TPE : **T**rès **P**etite **E**ntreprise

UE : **U**nion **E**uropéenne

Y : Rendement (**Y**ield)

Table des annexes

Annexe I – Synthèse des règlements encadrant la production biologique d'algues dans l'Union Européenne.....	1
Annexe II – Calcul des coûts de production des bassins de culture.....	2
Annexe III – Analyse colorimétrique des thalles d' <i>Ulva</i> spp.....	3

Table des figures

Figure 1. Évolution de la production mondiale d'algues entre 1950 et 2020 (© Phyconomy, 2023 Seaweed State of the Economy. Source des données : FAO. 2022. Global aquaculture production 1950-2020 (FishStatJ).)	1
Figure 2. Illustration des différentes morphologies du genre <i>Ulva</i> (© CEVA)	3
Figure 3. Cycle de vie de <i>Ulva</i> spp (© Bast, 2014)	4
Figure 4. Distribution d' <i>Ulva</i> spp sur les côtes françaises (© INPN)	5
Figure 5. Photographie d'un bassin de nurserie aménagé pour la culture d'ulves (© M. Lannou)	12
Figure 6. Montage expérimental (© M. Lannou)	12
Figure 7. Photographie des raceways (© France Halotis)	13
Figure 8. Carte (modifiée) des surfaces couvertes par les ulves en 2021 (CEVA) pour la côte Nord du Finistère. Les sites encadrés en orange sont les sites de récolte des souches sauvages.	15
Figure 9. Histogrammes présentant les taux de croissance (A) et rendements (B) journaliers moyens pour des ulves ayant reçu seulement du nitrate de sodium (F.min N) ou deux types de fertilisants organiques, ProAlg et Geogreen Plus (respectivement Forga ProAlg et Forga GP). (n=9)	21
Figure 10. Taux de croissance spécifique des ulves en fonction de la quantité de NaNO ₃ ajoutée dans le milieu de culture (n=12)	22
Figure 11. Histogramme présentant les taux de croissance (A) et rendements (B) journaliers moyens pour une fertilisation minérale à base de NaNO ₃ et Ca ₃ (PO ₄) ₂ (F.min NP) en comparaison à un fertilisant organique (Forga GP) (n=9)	23
Figure 12. Comparaison des taux de croissance pour différentes combinaisons de fertilisants minéraux et pour une fertilisation organique (Forga GP). (n=18)..... Error!	
Bookmark not defined.	
Figure 13. Comparaison des taux de croissance (A) et des rendements (B) journaliers moyens pour une fertilisation organique classique (Forga GP) et une fertilisation mixte (F.mixte GP : 25 cl Geogreen Plus + 100g NaNO ₃) (n=9)	24
Figure 14. Comparaison des taux de croissance (A) et des rendements (B) journaliers moyens pour une fertilisation organique classique (Forga GP) et une fertilisation mixte (F.mixte GS : 13 cl Geogreen Start + 100g NaNO ₃). Le coût de fertilisation par bassin est identique à celui de l'expérience 5, c'est-à-dire 1,02€. (n=9)	25
Figure 15. Courbe de l'évolution du SGR moyen en fonction de la quantité de phosphate inorganique apportée par le fertilisant.....	25
Figure 16. Comparaison des taux de croissance pour 3 souches d' <i>Ulva</i> spp ayant reçu une fertilisation mixte (n=9).....	26
Figure 17. Comparaison des taux de croissance journaliers pour 6 souches d' <i>Ulva</i> spp ayant reçu une fertilisation mixte (n=18)	27
Figure 18. Comparaison de la répartition des charges pour la production d'ulves dans des bassins de nurserie sur une phase de 7 jours, avec une fertilisation 100% organique (gauche) et une fertilisation mixte (droite).	32

Table des tableaux

Tableau 1. Avantages et inconvénients de la culture d'ulves à terre par rapport à la récolte et à la culture en mer (^a Huchette, com. pers. ; ^b Berthelot, 2018 ; ^c Bolton et al., 2016 ; ^d Shpigel et al., 1999 ; ^e CRPMEM Bretagne ; ^d García-Posa et al., 2020 ; ^e Hafting et al., 2015 ; ^f Berthelot, com. pers, 2023 ; ^g Sebök, et al., 2010 ; ^h Le, 2018) ...	7
Tableau 2. Synthèse des fertilisants organiques utilisés.....	14
Tableau 3. Synthèse des fertilisants chimiques utilisés	14
Tableau 4. Synthèse des expériences réalisées. La lettre « N » correspond aux bassins de nurserie et la lettre « B » aux bacs expérimentaux	18
Tableau 5. Tableau des coûts liés à deux fertilisations mixtes pour les bassins de nurserie et les raceways. Les lignes vertes représentent la formule de fertilisation mixte la plus économique. La ligne orange sert de référence de comparaison et représente les coûts de l'ancienne fertilisation (organique) pour l'ensemble des bassins de nurserie et des raceways.	32
Tableau 6. Tableau résumant les coûts de l'ancienne fertilisation (100 % organique), de la fertilisation mixte conçue, et des économies réalisées.	33

1 Introduction

1.1 Les algues et leur culture : historique et état des lieux de la filière

1.1.1 Les algues, une ressource ancestrale ancrée culturellement

La consommation des algues comme aliment est très ancienne. Au Chili, des traces fossilisées d'algues datant de plus de 12 000 ans confirment leur utilisation par les populations (Fitton, 2005). En Asie, les algues ont toujours été considérées comme une ressource noble et elles ont d'ailleurs imprégné les mythes et le folklore de plusieurs pays (Pérez-Lloréns *et al.*, 2020). Leur consommation est traditionnelle et toujours courante. Au Japon par exemple, la consommation annuelle est estimée à 1,5 à 2 kg par personne et par an (Zava & Zava, 2011). Dans d'autres pays du monde (France, Irlande, Islande, Pérou, Chili), leur utilisation est également ancestrale, mais elle renvoie généralement à une idée de pénurie et de frugalité (Pérez-Lloréns, 2020). Historiquement en France, et plus particulièrement en Bretagne, les algues servaient de combustibles, d'aliment pour le bétail (bezhin saout), d'engrais, et étaient transformées en pains de soude dans des fours à goémons que l'on retrouve toujours sur certaines côtes bretonnes (Sybill *et al.*, 2021). En tant qu'aliment, les algues ont connu un essor récent en France, notamment dans les années 2000 grâce à la popularisation de la gastronomie japonaise, mais leur consommation reste encore très faible (Lesueur & Comparini, 2015).

1.1.2 Une filière mondiale à la croissance récente largement dominée par l'Asie

En 2020, la production mondiale d'algues s'élevait à 36,17 millions de tonnes dans le monde, dont 35,01 millions provenant de l'aquaculture, soit environ 97 % (FAO, 2021a). En 70 ans, pour répondre à la demande mondiale, la production a été multipliée par 60 grâce à l'essor de l'aquaculture. La part des algues de récolte a, quant à elle, stagné depuis les années 50 (fig. 1).

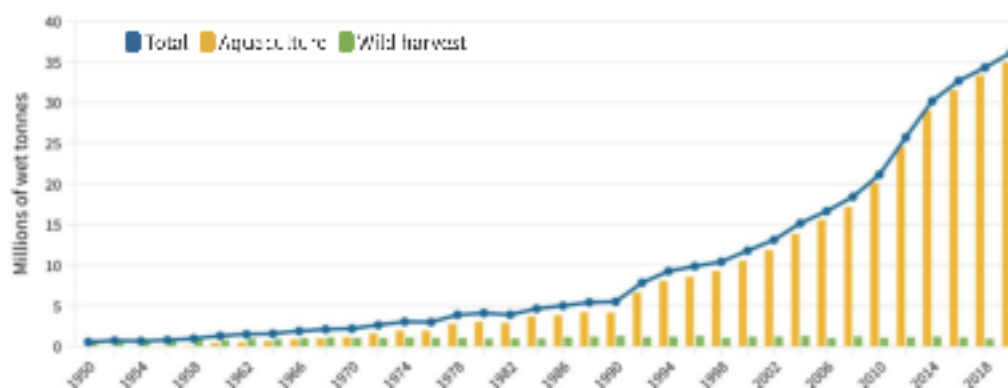


Figure 1. Évolution de la production mondiale d'algues entre 1950 et 2020 (© Phyconom y, 2023 Seaweed State of the Economy. Source des données : FAO. 2022. Global aquaculture production 1950-2020 (FishStatJ).)

En 2019, l'Asie produisait 97 % du volume mondial, et particulièrement la Chine et l'Indonésie avec des contributions respectives de 57 et 28 % (FAO, 2021a). Alors que la Chine produit en grande quantité des algues à destination de l'alimentation (Kombu), l'Indonésie se concentre plutôt sur des espèces telles que *Euचेuma* spp, *Kappaphycus* spp ou encore *Gracilaria* spp, dont des carraghénanes et de l'agar peu vent être extraits à des fins industrielles (FAO, 2018). Au niveau mondial, l'ulve est la 5^{ème} macroalgue verte cultivée, avec une production de 2155 tonnes en 2019, dont la majeure partie est produite en Afrique du Sud pour l'alimentation d'omeaux (FAO, 2021c). Ce volume est faible en comparaison à d'autres espèces, et dans le classement des principales espèces cultivées, la laitue de mer ne se hisse même pas au 10^{ème} rang (FAO, 2021b).

Cependant, il est à noter que selon certains chercheurs, les données concernant la production mondiale d'algues seraient surestimées. Ainsi, elle se situerait davantage aux alentours des 27 millions de tonnes en 2020 (Langford *et al.*, 2022 ; Porse & Rudolph, 2017 ; Hermans, 2023).

1.1.3 Filière européenne et française : un poids plume dans la filière mondiale

La production européenne ne représente que 1 % de la production mondiale. Contrairement aux volumes mondiaux, la majorité de la biomasse européenne provient de l'exploitation de la ressource sauvage. La production européenne en 2019 s'élève à 287 033 tonnes, dont moins de 3 % (900 tonnes) provenant de l'aquaculture (FAO, 2021b). En 2019, Les premiers pays producteurs étaient la Norvège (163 197 tonnes), la France (51 476 tonnes) et l'Irlande (29 542 tonnes) (FAO, 2021b). Les principales espèces produites sont des algues brunes, notamment des laminaires (*Laminaria digitata* et *Laminaria hyperborea*) et *Ascophyllum nodosum* (Lesueur *et al.*, 2015). Ce sont des algues utilisées essentiellement pour l'extraction d'hydrocolloïdes (FAO, 2018). La part de marché européenne de la production d'algues marines destinées à l'alimentation et à d'autres usages (*ie.* autres que les hydrocolloïdes), est inférieure à 1 % de la production totale de biomasse (Buschmann, 2017).

Si le secteur européen des algues reste aujourd'hui de taille modeste, le Blue Economy Report 2022 souligne que les conditions sont favorables pour en faire un secteur solide, durable et régénérateur au sein de la bioéconomie bleue de l'Union Européenne. Non seulement la communauté de l'innovation est en plein essor, mais la demande monte en flèche et la dynamique politique se met en place. Les algues sont d'ailleurs considérées comme un moyen de soutenir les objectifs du Green Deal européen (Commission Européenne, 2022).

En France, la majorité de la biomasse algale provient également de l'exploitation de la ressource naturelle. En 2021, près de 67 000 tonnes d'algues étaient issues de la pêche et 6 424 tonnes de la récolte (CRPME M Bretagne, 2022). En revanche, l'aquaculture n'a produit que 380 tonnes de biomasse en 2022 (Berthelot, com. pers.), principalement du wakamé

(*Undaria pinnatifida*) à hauteur de 71,4 % de la production totale. On retrouve ensuite la *Saccharina latissima* (22,3 %), *Ulva* spp (2,6 %) et *Chondrus crispus* (1,3 %) (Agreste, 2022b). Les deux tiers de la production sont utilisés pour l'alimentation humaine et animale (Agreste, 2023). En ce qui concerne la culture d'*Ulva* spp, France Haliotis est la première entreprise productrice française, une trentaine de tonnes sont produites annuellement. Concernant l'impact socio-économique de l'algoculture en France, l'enquête du Service de la Statistique et de la Prospective (SSP) de l'année 2018 dénombrait 13 entreprises cultivant et commercialisant des algues, dont seulement 9 en font leur activité principale. Cela représente 45 équivalents temps plein (ETP) au total, ce qui fait de ces entreprises des très petites entreprises (TPE) (Agreste, 2020). De plus, la valeur de la production française de macroalgues s'élevait à 0,54 millions d'euros en 2020 (Agreste, 2022b).

En matière d'algoculture (macroalgue) française, la Bretagne est meneuse dans le secteur. En effet, la région bénéficie d'une situation géographique et climatique favorable, ainsi qu'une multitude d'acteurs compétents (production, transformation, recherche, formation). (Comparini *et al.*, 2015). Couplé à la tradition historique de l'algue sur le territoire, il n'est pas étonnant que la majorité des acteurs de la filière française soient concentrés dans cette région (Kholler *et al.*, 2022).

1.2 Présentation du modèle biologique étudié : *Ulva* spp

Les algues du genre *Ulva* (Phylum *Chlorophyta*, Classe des *Ulvophyceae*, ordre des *ulvales* et famille des *Ulvaeceae*), appelées ulves ou laitue de mer, ont été identifiées pour la première fois par Linnaeus en 1753. Au sein de ce genre, de nombreuses espèces sont répertoriées, avec des différences morphologiques plus ou moins prononcées. Les algues du genre *Ulva* présentent deux morphologies typiques : une forme en lame et une forme tubulaire plus ou moins ramifiée, aplatie ou filamenteuse (fig. 2) (Hayden, 2003). Il est d'usage de désigner les algues à la morphologie en lame d'ulves (ou laitue de mer) et les algues à la morphologie tubulaire d'entéromorphes.



Figure 2. Illustration des différentes morphologies du genre *Ulva* (© CEVA)

Autrefois, ces deux morphologies étaient considérées comme deux genres différents, mais les travaux de Hayden (2003) portant sur leur ressemblance génétique ont permis de les rassembler sous le même genre *Ulva*. Au sein de ces deux groupes, les différences morphologiques sont très faibles, notamment pour les thalles foliacés. De plus, la morphologie est modulée non seulement par des facteurs génétiques, mais également par des facteurs environnementaux ou encore par des interactions avec le microbiome (Wichard *et al.*, 2015 ; Gao *et al.*, 2016 ; Alsufyani *et al.*, 2020). Par conséquent, l'utilisation de critères morphologiques pour identifier des espèces n'est pas une méthode fiable, et il est nécessaire de se baser sur des informations génétiques (Simon *et al.*, 2022 ; Fort *et al.*, 2021).

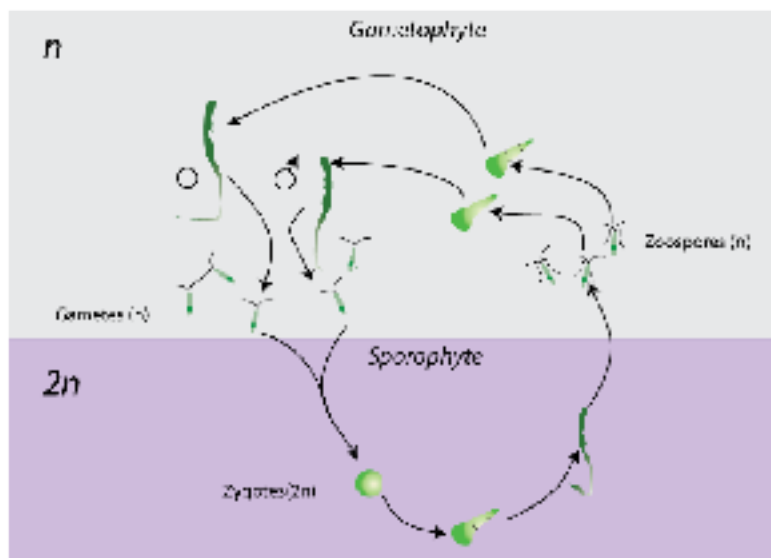


Figure 3. Cycle de vie de *Ulva* spp. (© Bast, 2014)

Les ulves ont plusieurs modes de reproduction : une reproduction sexuée, une reproduction asexuée, et enfin elles se développent par multiplication végétative. Leur cycle de vie (fig. 3) est haplo-diplophasique isomorphe, c'est-à-dire qu'il présente une alternance de générations, l'une haploïde (n) et l'autre diploïde (2n), d'aspect identique. La

reproduction asexuée a lieu grâce au sporophyte diploïde qui produit des zoospores haploïdes. Ces zoospores se transforment ensuite en pieds mâles ou femelles, appelés gamétophytes. Ces derniers relâchent des gamètes qui, à leur rencontre, vont former un zygote diploïde, le sporophyte : c'est la reproduction sexuée (Auby *et al.*, 1994). De nombreux facteurs semblent induire la sporulation : un choc thermique (Mantri *et al.*, 2011), la fragmentation des thalles (Nilsen & Nordby, 1975), un manque de nutriments (Mohsen *et al.*, 1974), la dessiccation (Smith, 1947), ou encore la photopériode et la phase lunaire (Lüning *et al.*, 2008). Ces facteurs peuvent entraîner la transformation des cellules végétatives en zoosporanges ou gamétanges (Lersten & Voth, 1960), ce qui provoque la destruction des tissus végétatifs (Kalita & Tytliano v, 2003). La reproduction végétative, quant à elle, repose sur la fragmentation des thalles qui crée de nouveaux individus. Le gamétophyte, le sporophyte et les zoospores peuvent se reproduire de cette façon (Alström-Rapaport *et al.*, 2010).

Dans le milieu naturel, les ulves peuvent vivre accrochées à un rocher par un petit disque, mais elles s'en détachent facilement sous l'action des courants et deviennent alors pélagiques. Présentes sur toutes les côtes françaises, on qualifie leur distribution d'ubiquiste (fig. 4). On les retrouve sur les côtes tout au long de l'année. Leur période de croissance a lieu au printemps et en été, grâce à l'augmentation de la photopériode et de la température (CEVA, 2009)



Figure 4. Distribution d'*Ulva* spp sur les côtes françaises (© INPN)

1.3 L'ulve, une algue mal-aimée malgré ses nombreux atouts

1.3.1 Les phénomènes de marées vertes et leur impact sur l'image d'*Ulva* spp

Le terme « algue verte » est bien souvent associé au phénomène des marées vertes qui touchent les baies bretonnes depuis les années 70. Le Comité d'Étude et de Valorisation des Algues (CEVA) décrit 3 types de marées vertes : celles d'arrachage, de vasières, et celles à ulves dérivantes. Ce sont ces dernières qui touchent principalement la Bretagne, en printemps et en été, conséquence directe de flux anormalement élevés en sels nutritifs (nitrate et phosphate) et des facteurs abiotiques liés aux baies sableuses (Chevassus-au-Louis *et al.*, 2012 ; CEVA, 2009). La surveillance des marées vertes dans plusieurs baies bretonnes ces 18 dernières années a montré que leur renouvellement est étroitement lié au stock algal résiduel de l'année précédente (Louis *et al.*, 2023). Ces épisodes de marées vertes sont fortement médiatisés, notamment quand des événements particuliers comme des accidents surviennent, ce qui a contribué à la mauvaise image des algues auprès des consommateurs (Marchand *et al.*, 2015).

Pourtant, les propriétés opportunistes de l'ulve, responsables des marées vertes, en font une algue de culture avec un fort potentiel pour l'aquaculture. Sa croissance est rapide : en bassins, son taux de croissance peut dépasser les 20 % \cdot jour⁻¹ (Lawton *et al.*, 2021) et les rendements peuvent approcher les 300 g \cdot m⁻²·jour⁻¹ (Zertuche-González, 2021). Par ailleurs, les ulves absorbent fortement les nutriments du milieu (Bolton *et al.*, 2016) ce qui leur permet d'atteindre des taux de protéines élevés (Fort *et al.*, 2020).

1.3.2 Les nombreuses applications des algues vertes

Au même titre que de nombreuses algues, les applications de *Ulva* spp sont multiples : alimentation humaine et animale, industries agro-alimentaires, industries pharmaceutiques, fertilisants... (Silva *et al.*, 2013 ; Divya *et al.*, 2015 ; Bolton *et al.*, 2009 ; FAO, 2018). De plus, elles suscitent un intérêt croissant en tant que matière première pour des applications bioénergétiques (Neveux *et al.*, 2014 ; Bruhn *et al.*, 2011 ; Van der Wal *et al.*, 2013) ou encore de nutraceutique (Kidgell *et al.*, 2019).

En ce qui concerne l'utilisation alimentaire, la laitue de mer est intéressante pour son fort taux potentiel en protéines. En effet, elle peut atteindre les 40 % de protéines (matière sèche), dépassant ainsi le maïs (10 %) ou encore le soja (9-19 %) (Fleurence *et al.*, 2012 ; Simon *et al.*, 2022). Il s'agit également d'une bonne source de minéraux dont les principaux sont le potassium, le magnésium, le sodium et le calcium (Fleurence, 2016 ; MacArtain *et al.*, 2007). En outre, les ulves possèdent des concentrations élevées en vitamines C, B3 et B12 (García-Casal *et al.*, 2007 ; MacArtain *et al.*, 2007).

1.4 La culture d'ulves, une production aquacole à fort potentiel

1.4.1 Mode de culture terrestre : avantages et inconvénients

Ulva spp est cultivée majoritairement dans des bassins à terre (Bolton *et al.*, 2016). La culture en mer n'est pas autorisée du fait du caractère invasif de l'algue (Avis du CRSPN de Bretagne n°2013-10-E espèces-Natura 2000). De plus, la culture à terre par reproduction végétative permet de potentiellement s'affranchir d'une édoserie, qui représenterait des coûts supplémentaires. Ce mode de production est privilégié pour des espèces intertidales vivant dans des eaux peu profondes et calmes, et dont les thalles se fragmentent aisément sous l'action des vagues (Kholler *et al.*, 2022). D'autres espèces concernées sont la dulse (*Palmaria palmata*) ou encore la Nori (*Porphyra* sp) (Kholler *et al.*, 2022).

Ulva spp peut être récoltée dans le milieu naturel, cependant il s'agit d'une algue présentant une variation spatio-temporelle forte, et elles peuvent disparaître d'une année à l'autre dans un endroit donné. Ainsi, la culture des ulves à terre présente de nombreux avantages, mais également quelques inconvénients, lesquels sont recensés dans le tableau 1.

Tableau 1. Avantages et inconvénients de la culture d'ulves à terre par rapport à la récolte et à la culture en mer (° Huchette, com. pers., 2023 ;^b Berthelot, 2018 ;^c Bolton et al., 2016 ;^d Shpigel et al., 1999 ;^e CRPMEM Bretagne ;^d García-Posa et al., 2020 ;^o Halting et al., 2015 ;^f Berthebt, com. pers., 2023 ;^g Sebök, et al., 2010 ;^h Le, 2018)

	Avantages	Inconvénients
Par rapport aux algues de récolte	<p>Sécurisation de l'approvisionnement^a</p> <p>Lissage du stock sur l'année^a</p> <p>Possibilité de sélection de souches^{c,f}</p> <p>Algue « propre » ne nécessitant pas de lavage préalablement à la transformation^b</p> <p>Standardisation des lots (couleur, taille...) pour les industriels^f</p>	<p>Coût de production : énergie, main d'œuvre, intrants, amortissement des structures de culture^{d,g}</p> <p>Rentabilité faible^e</p>
Liés à la culture à terre	<p>Meilleur contrôle des conditions de culture^c</p> <p>Amélioration des performances de croissance de l'ormeau^d</p> <p>Mise en place d'AMTI plus simple (exemple : recirculation d'eau)^c</p> <p>Possibilité d'enrichissement des algues : protéines^c, ulvanes^{h...}</p>	<p>Entretien des structures^d</p> <p>Occupation d'espace : indisponibilité ou prix élevés^{c,f}</p> <p>Nécessité de se situer près de la mer pour le pompage d'eau^g</p> <p>Risque de sporulation et de la perte de la biomasse d'un ou plusieurs bassins^b</p>

1.4.2 L'ulve comme algue fourrage

Les aliments formulés utilisés en aquaculture sont de plus en plus critiqués pour leur fort impact environnemental, car ils sont riches en huiles et farines de poissons issus de la pêche minière (Olsen, 2011). France Haliotis n'ayant jamais souhaité utiliser ce type d'aliments, les ormeaux ont toujours été nourris grâce aux algues. Lors de la diversification de l'entreprise vers l'algoculture (détaillée dans le point 1.5.1), l'ulve était un candidat parfait comme aliment du gastéropode. En effet, grâce au contrôle des conditions de culture, les ulves issues de l'algoculture peuvent être plus riches en protéines que des algues sauvages (> 40 %) (Fleurence et al., 2012). Une alimentation à base de laitue de mer enrichie en azote permet d'améliorer les taux de croissance spécifique des ormeaux et d'abaisser les taux de conversion (Shpigel et al., 1999). Elle favorise également l'immunité des ormeaux, grâce aux ulvanes présents dans l'algue (Lahaye & Robic, 2007 ; Lee et al., 1999 ; Sun et al., 2007).

1.4.3 Une algue prometteuse dans le développement de l'Aquaculture Multi Trophique Intégrée (AMTI)

Comme tous les végétaux, *Ulva* spp a besoin pour sa croissance de CO₂, d'azote et de phosphore. Les algues absorbent préférentiellement l'azote sous forme d'ion ammonium, qui

est déjà à l'état réduit et directement utilisable par les végétaux (Ale *et al.*, 2011). De manière générale, les ulves absorbent systématiquement la majeure partie (généralement plus de 70 %) de l'azote disponible, et une quantité significative mais plus faible (souvent autour de 25 %) du phosphore, dans des systèmes d'essai avec des effluents de poissons, de crevettes, d'ormeaux et de concombres de mer (Neori *et al.*, 1996 ; Wang *et al.*, 2007 ; Bolton *et al.*, 2009 ; Copertino *et al.*, 2009). Ces performances en font un très bon candidat en tant que biofiltre en aquaculture. Dans une ferme d'ormeaux en Afrique du Sud, la biomasse d'ulves produite est utilisée à la fois pour l'alimentation des animaux et pour la recirculation de l'eau (Bolton *et al.*, 2009).

1.5 Présentation de l'entreprise et contextualisation du sujet

1.5.1 France Haliotis, une entreprise unique et diversifié

France Haliotis est une entreprise productrice de l'ormeau européen (*Haliotis tuberculata*) et d'algues, créée en 2004 par Sylvain Huchette. Elle se situe à Lilia Plouguemeau (29), à quelques mètres de la mer. À terre, l'entreprise dispose de 2400 m² de surface de production pour les algues, et 550 m² pour les ormeaux. En mer, elle détient 7 hectares de concessions pour les cages d'ormeaux et les filières d'algues, soit 1,4 km de filières.

L'entreprise réalise l'entièreté du cycle d'élevage de l'ormeau, de la reproduction au grossissement. Le cycle de production dure 4 ans au total, dont 1 an en nurserie et 3 ans en mer. France Haliotis est la seule entreprise en Europe à élever ses ormeaux en mer. Régulièrement, leur nourrissage est assuré par des macroalgues récoltées à la main, ce qui représente un volume annuel d'environ 160 tonnes. En 2018, l'entreprise se diversifie avec une activité d'algoculture dont la production était, dans un premier temps, exclusivement destinée aux fourrages. Au vu du développement du secteur de l'algue alimentaire, les algues ont été valorisées pour l'alimentation humaine également.

La première algue cultivée chez France Haliotis était *Ulva* spp, dans des bassins à terre. La construction de 6 raceways en 2021 a permis d'atteindre des volumes de production importants (26 tonnes en 2022). En mer, l'entreprise cultive sur des filières les algues brunes *Alaria esculenta* et *Saccharina latissima*, dont les biomasses récoltées respectives sont de 600 kg et 7,5 tonnes en 2023. Enfin, France Haliotis dispose de deux cellules de séchage depuis 2022 pour réaliser la transformation d'une partie de la production d'algues. Comme pour les ormeaux, l'intégralité du cycle de production est réalisée au sein de l'entreprise, de la reproduction (pour les algues brunes), à la transformation pour une certaine partie de la production. Il est à noter qu'une partie de la vente se réalise au sein-même de l'entreprise, avec une activité de vente directe (ormeaux et algues).

France Haliotis se démarque aussi par son activité de R&D, notamment concernant la reproduction et les phases de nurserie de l'ormeau, ce qui lui confère un savoir-faire unique en France. Désormais, les travaux de R&D s'élargissent aux problématiques concernant l'algoculture. L'objectif principal est de parvenir à diminuer la récolte sauvage en développant les algues de culture, afin de limiter la pression sur les ressources naturelles. La culture est peu rentable pour le moment, notamment vis-à-vis du marché de l'algue alimentaire, mais selon Sylvain Huchette, il s'agit d'un pari sur l'avenir au vu de la diminution des ressources algales à prévoir.

1.5.2 Labellisation « Agriculture Biologique » en algoculture

En juillet 2010, l'entrée en vigueur du règlement Européen Bio 710/2009 a permis aux entreprises productrices d'algues d'obtenir la certification « Agriculture biologique » (AB). Ce texte est complété par plusieurs règlements européens (synthèse en Annexe I). L'Institut National de l'Origine et de la qualité (INAO) fournit un guide de lecture permettant de mettre en application le règlement européen (CSAVM, 2022), et les organismes certificateurs veillent au respect du cahier des charges

La production d'algues de France Haliotis est certifiée AB par eocert (FR-BIO-01). Cette labellisation s'inscrit tout d'abord dans le souhait de l'entreprise de réduire son impact environnemental et d'adopter une démarche durable. Il s'agit également d'une certification nécessaire pour se placer dans le marché de l'algue alimentaire français compétitif (Kholler *et al.*, 2022), car les consommateurs mettent l'accent sur l'aspect respectueux de l'environnement des algues (Comparini *et al.*, 2015). En 2021 en France, 77 % des volumes de macroalgues vendus étaient certifiés AB (Agreste, 2022a).

En algoculture, le cahier des charges du label AB repose sur deux axes principaux. En premier, la qualité de l'eau : elle doit être jugée bonne ou très bonne (au titre du classement DCE, Directive Cadre sur l'Eau n°2000/60 CE) ou classée en zone conchylicole A ou B. Le second volet concerne les pratiques de récolte et de culture. Pour la récolte, un guide des bonnes pratiques, conçu par InterBio Bretagne, aiguille les récoltants sur les pratiques durables à adopter. Quant à la culture, le label AB intègre de nombreux paramètres de culture, qui doivent être attestés par des documents précis consultables à tout moment par l'organisme certificateur : mises en culture, quantités produites, dates de récolte et destination, etc...

1.5.3 La fertilisation : une composante essentielle de l'algoculture pourtant encore peu maîtrisée

La fertilisation des cultures est un aspect primordial de la production, car elle a un impact majeur sur la productivité des bassins et sur le coût de production, ainsi que sur les qualités organoleptiques d'*Ulva* spp (DeBusk *et al.*, 1986).

L'efficacité des engrais organiques et minéraux sur les cultures d'ulves a déjà été démontrée (Robertson--Andersson *et al.*, 2003 et 2006 ; Berthelot, 2018). Cependant, il n'existe actuellement pas de fertilisant organique végétal spécialement conçu pour les besoins de l'algoculture labellisée AB. Le cahier des charges de l'INAO spécifie que les fertilisants adaptés sont des fertilisants organiques, d'origine 100 % végétale et/ou minérale. Depuis janvier 2023, sur les recommandations de l'EGTOP (Expert Group for Technical Advice on Organic Production), le règlement d'exécution (UE) 2023/121 autorise l'utilisation de nitrate de sodium (NaNO_3). Ce conseil d'expert a encouragé ce changement de législation, notamment car la production française de microalgues subissait une concurrence déloyale d'autres pays dont le cahier des charges AB est moins restrictif (CEVA, 2023). Néanmoins, l'utilisation de nitrate de sodium reste limitée à la production d'algues à terre dans des systèmes fermés. Le système de culture de France Haliotis étant semi-ouvert, il peut être fermé lors de la fertilisation des bassins de culture durant une période suffisante pour que l'algue absorbe les nutriments du milieu. De plus, des contrôles de rejets dans le milieu sont régulièrement effectués par l'entreprise. Après consultation de l'organisme certificateur, le système de France Haliotis respecte les conditions d'utilisation du nitrate de sodium.

Les avantages d'un basculement vers une fertilisation minérale (totale ou partielle) sont multiples. Le premier est l'abaissement des coûts de production, car les fertilisants minéraux sont généralement bien plus abordables que les fertilisants organiques (Tableau 2 et Tableau 3). Ensuite, l'utilisation de fertilisant liquide obscurcit la couleur des bassins, ce qui réduit la photosynthèse, et provoque plus de salissure (CEVA, 2023). Enfin, l'utilisation de fertilisants organiques peut impliquer un relargage d'une fraction organique dans l'océan, que l'on ne peut quantifier. Cette fraction va par la suite se minéraliser, et eutrophiser le milieu. Le passage à une fertilisation minérale, couplée à des contrôles réguliers des rejets dans le milieu, offrirait un plus grand contrôle des rejets grâce à une connaissance plus exacte des quantités d'ions nutritifs appliqués aux cultures.

La culture d'ulves en bassin se heurte donc toujours à des freins techniques, notamment concernant la fertilisation. Durant ce stage, la problématique était **d'optimiser les pratiques de fertilisation d'*Ulva* spp dans le cadre d'une production labellisée AB**. Plusieurs objectifs en découlent :

- Abaisser les coûts liés à la fertilisation en basculant vers une fertilisation minérale totale ou partielle, sans diminution des rendements
- Mettre au point une nouvelle formule de fertilisation permettant de réduire les risques de relargage d'engrais dans les effluents
- Sélectionner une ou plusieurs nouvelles souches adaptées à la nouvelle fertilisation

2 Matériel et méthodes

2.1 Identification du modèle biologique : *Ulva* spp

Le matériel biologique *Ulva* spp utilisé lors des expériences présentait exclusivement une morphologie « en lames ». Les entéromorphes ne rentrent pas dans le cadre d'étude de ce sujet.

Le génotypage des algues de culture de France Haliotis par l'université de Galway en collaboration avec la Station Biologique de Roscoff a permis d'identifier deux espèces dans la souche principale : *Ulva lacinulata* (anciennement *Ulva laetivirens*) et *Ulva australis*.

Dans le 3^{ème} volet, des souches sauvages d'*Ulva* spp ont été récoltées, mais aucun génotypage n'a été effectué. Cela n'a pas été jugé pertinent immédiatement car, pour la sélection d'individus sur des critères de performances de croissance et de productivité, il semblerait que la souche importe davantage que l'espèce (Lawton *et al.*, 2021).

2.2 Présentation des structures de culture d'*Ulva* spp

2.2.1 Eau et aération, deux composantes essentielles de la culture des ulves

France Haliotis est alimenté en eau de mer grâce à une station de pompage (6 kW) dans l'anse de Kerazan, à quelques mètres de l'exploitation. La pompe s'amorce 3 heures avant la pleine mer, et s'arrête 3 heures après. L'eau pompée se retrouve alors dans 5 bassins de stockage (250 m³ au total). Elle est ensuite redistribuée dans le réseau d'eau de l'entreprise, après filtrage par 4 filtres à poche (25 µm) qui sont entretenus quotidiennement.

Pour l'algoculture en bassin, l'aération est également un paramètre très important. Elle permet aux algues de se déplacer librement dans la colonne d'eau, et d'assurer un accès suffisant à la lumière ainsi que d'éviter l'accumulation des algues à la surface. De plus, le bullage semblerait favoriser la fragmentation des thalles, et donc la reproduction végétative de l'algue (Hanisak & Ryther, 1984). L'entreprise dispose de 2 soufflantes (6 kW) qui assure l'alimentation des bassins en air.

2.2.2 Anciens bassins de nurserie aménagés pour la culture d'algues



Figure 5. Photographie d'un bassin de nurserie aménagé pour la culture d'ulves (© M. Lannou)

Les bassins de culture d'*Ulva* spp sont d'anciens bassins de nurserie d'ormeaux (fig. 5). Composés d'une armature en bois à laquelle est fixée un liner blanc de piscine en PVC, ils forment des bassins de 3500 litres (5,70 m x 140 cm x 45 cm).

L'alimentation en eau de mer se fait en amont du bassin, et l'évacuation de l'eau se fait à l'autre extrémité, par un tube en PVC muni d'une crépine afin de ne pas perdre de biomasse. Le débit moyen est de 280 L.h⁻¹, ce qui correspond à environ 1,5 à 2 renouvellements d'eau par jour. Le système d'aération est constitué de deux rampes de bullage de part et d'autre d'une cloison qui sépare le bassin en deux parties.

2.2.3 Dispositif expérimental

Un dispositif expérimental a été conçu afin d'augmenter le nombre de tests possibles simultanément tout en allégeant le temps de manipulation (récolte, entretien, maintenance...).

Ce système est constitué de 18 bacs blancs de 170 litres (0,6 x 0,8 x 0,5 m), placés côte à côte en 2 rangées de 9 bacs (fig. 6). L'alimentation en eau de mer se fait par une rampe PVC dans laquelle 18 arrivées d'eau ont été placées en face de chaque bac. L'évacuation de l'eau se fait par une surverse constituée de 3 trous percés dans le bac. En moyenne, le débit est de 25 L.h⁻¹, ce qui correspond à 3 à 4 renouvellements d'eau journaliers.

Une rampe de bullage semblable à celles des bassins de nurserie est placée au fond de chaque bac pour assurer le brassage des algues.

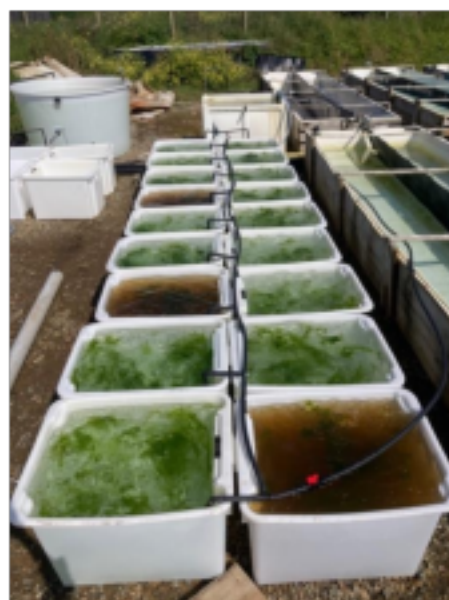


Figure 6. Montage expérimental (© M. Lannou)

2.2.4 Raceways : une montée en puissance de la production

France Haliotis dispose de 6 raceways pour la culture des ulves. Ce sont des bassins hors-sols d'un volume de 180 m³, disposant d'une cloison centrale et d'une pale qui permet de créer un courant circulaire pour la mise en suspension des algues (fig. 7).



Figure 7. Photographie des raceways (© France Haliotis)

L'approvisionnement en eau de mer est discontinu et a lieu lorsque que la station de pompage est immergée (*i.e.* 3 h avant et après la pleine mer). Le débit dépend du nombre de raceways en activité et de l'activité dans la nurserie. Quand les 6 raceways sont en activité, il y a un renouvellement d'eau tous les 2 à 3 jours environ.

2.3 Ensemencement, récolte et entretien des bassins

Au début des expériences, les bassins de nurserie sontensemencés avec une biomasse initiale de 1,5 kg (soit une densité de 0,19 kg.m⁻²), tandis que les bacs expérimentaux sontensemencés avec 100 g de biomasse (soit une densité de 0,21 kg m⁻²). Ces densités d'ensemencement sont plus faibles que celles retrouvées dans la littérature. Pour un rendement optimum, la densité recommandée est de 0,8 kg.m⁻² (DeBusk *et al.*, 1986). Cette biomasse initiale provient de bassins de productions (bassins de nurserie ou raceways) n'ayant pas été fertilisés au préalable (au moins 3 jours). De plus, la biomasse initiale pour chaque expérience provient d'un unique bassin afin d'obtenir un lot d'algues homogène.

Les récoltes sont réalisées à l'épuisette. Entre chaque récolte, les bassins sont nettoyés à l'aide d'eau de javel à une concentration de 0,129 mol.L⁻¹ puis rincés à l'eau de mer.

2.4 Fertilisation

Les différents fertilisants organiques utilisés lors des expériences respectent le cahier des charges AB (*i.e.* sont d'origine 100 % végétale). Ils sont listés dans le tableau ci-dessous (tab. 2), ainsi que leur composition (selon l'étiquette du produit) et leur cotation. Cette dernière a été réalisée par le fabricant, pour un achat d'une cuve de 1000 litres.

Tableau 2. Synthèse des fertilisants organiques utilisés

Fertilisant et fabricant	Composition (%)			Cotation (€)
	N total*	P ₂ O ₅ **	K ₂ O***	
Geogreen Plus (Angb aud)	3,7	2	4,1	3,11
Geogreen Start (Angb aud)	2,4	8	2,9	5,61
ProAlg (Penn Ar Bed)	3	3	6	3,45

* totalité organique

** soluble dans l'eau

Le fertilisant ProAlg contient des éléments supplémentaires : du bore (0,02 %), du cuivre (0,05 %), du molybdène (0,005 %) et du zinc (0,05 %).

Des échantillons des fertilisants ont été analysés par le plateau expérimental PACHIDERM pour le phosphate inorganique. Les concentrations en phosphate inorganique ([P_i]) du Geogreen Plus, Geogreen Start et ProAlg sont respectivement de 0,45 mol.L⁻¹, 1,14 mol.L⁻¹ et 0,52 mol.L⁻¹.

Les fertilisants minéraux (ou chimiques) sont des engrais d'origine minérale ou de synthèse. Leur utilisation est également très réglementée en AB. Ils se présentent sous forme solide. Les différents engrais minéraux utilisés lors des expériences sont détaillés dans le tableau 3.

Tableau 3. Synthèse des fertilisants chimiques utilisés

Nomenclature UICPA	Formule chimique	Solubilité dans l'eau à 20°C (g.L ⁻¹)	Forme	Utilisation en AB	Cotation (€/kg)
Nitrate de sodium	NaNO ₃	0,874	Poudre	Autorisée*	2,4
Phosphate de calcium	Ca ₃ (PO ₄) ₂	1,2.10 ⁻³	Poudre	Autorisée	4,5
Nitrate d'ammonium	NH ₄ NO ₃	1920	Billes solides	Interdite	0,43
Phosphate de sodium	Na ₃ PO ₄	110	Poudre	Interdite	4,5

* Seulement dans des bassins à terre en circuit fermé (règlement d'exécution (UE) 2023/121)

Certaines précautions doivent être prises lors de la fertilisation. Tout d'abord, puisque l'ajout de fertilisant provoque un échauffement de l'eau, il est préférable de réaliser la

fertilisation le soir ou le matin afin d'éviter une augmentation de la température trop importante qui pourrait induire une sporulation (Kalita & Tytlianov, 2003 ; Lüning *et al.*, 2008).

De plus, pour empêcher la fuite des nutriments du milieu, l'arrivée d'eau est coupée pendant 24 h après la fertilisation. C'est un laps de temps suffisant pour que les algues assimilent les ions nutritifs sans que le manque de renouvellement d'eau n'ait un impact négatif sur la biomasse (Jestin-Fagon, 2020).

2.5 Récolte de souches sauvages

Dans le cadre des expériences portant sur la comparaison de différentes souches d'ulves (expériences 8 et 9), des algues sauvages ont été récoltées dans plusieurs baies bretonnes touchées par les phénomènes de marées vertes (fig. 8). Comme expliqué en introduction (1.3.1), ces algues présentent des caractéristiques d'intérêt pour l'aquaculture. Par ailleurs, le cahier des charges en AB recommande le renouvellement fréquent des souches de culture afin de maintenir et développer la diversité des stocks de culture dans des installations fermées (Règlement (UE) n°2018/848).

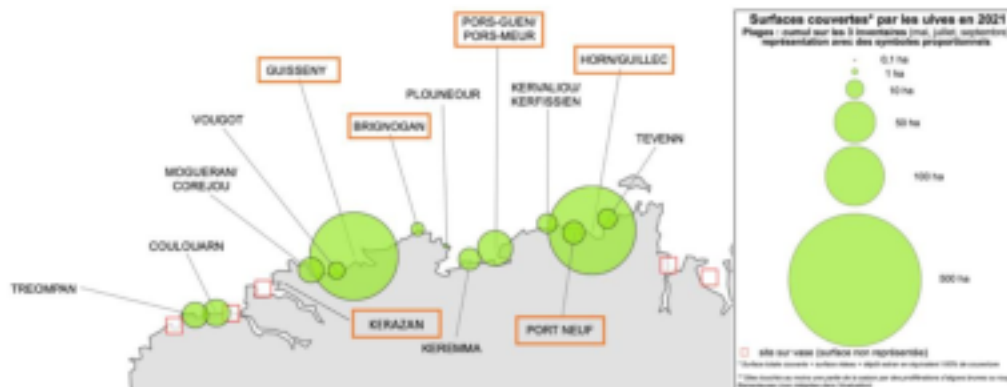


Figure 8. Carte (modifiée) des surfaces couvertes par les ulves en 2021 (CEVA) pour la côte Nord du Finistère. Les sites encadrés en orange sont les sites de récolte de souches sauvages.

Les souches provenant de Guisseny (48°38'27.7"N 4°26'46.5"W) et de Kerazhan (48°36'39.2"N 4°33'36.0"W) ont été récoltées en mai. Le site de Kerazhan ne figure pas parmi les plages touchées par les marées vertes, mais il s'agit du lieu de pompage et de rejet d'eau de mer de France Haliois. Les souches de Brignogan (48°39'58.9"N 4°19'16.6"W), Porsguen à Plouescat (48°39'30.8"N 4°13'19.4"W), Port-Neuf à Cléder (48°41'11.4"N 4°05'40.9"W), et de l'anse du Guillec (48°40'53.8"N 4°03'45.5"W) ont été récoltées en juillet. La récolte est réalisée manuellement et les algues sont transportées rapidement dans une boîte isotherme pour être isolées dans des bassins de culture.

2.6 Résumé des expériences réalisées

Pour répondre à la problématique étudiée, 9 expériences ont été menées, divisées en 3 volets de réflexion :

- Faisabilité d'une fertilisation entièrement minérale (expériences 1 à 4)

Dans un premier temps, une fertilisation minérale à base de nitrate de sodium exclusivement a été testée (expérience 1 et 2). Dans un second temps, une fertilisation minérale à base de nitrate de sodium et de phosphate de calcium (dans un ratio N:P de 10:1 (Atkinson, 1983)) a été expérimentée (expérience 3). Enfin, l'expérience 4, avait pour but de comparer l'effet de différentes combinaisons de sources de nitrates (nitrate de sodium et nitrate d'ammonium) et de phosphate (phosphate de calcium et phosphate de sodium) sur la croissance.

- Optimisation d'une fertilisation mixte : enrichissement d'une fertilisation organique par une fertilisation minérale (expériences 5 à 7)

L'objectif de cet axe est d'allier fertilisants organiques et minéraux, grâce au nitrate de sodium. Les expériences 5 et 6 ont servi à tester des fertilisations mixtes à base de deux fertilisants organiques différents, respectivement le Geogreen Plus et Geogreen Start, et de nitrate de sodium, d'origine minérale. Le Geogreen Start est environ deux fois plus concentré en phosphate inorganique que le Geogreen Plus (tab. 2). Les concentrations exactes en phosphate inorganiques des fertilisants n'étant pas encore connues au moment des expérimentations, la dose de Geogreen Start testée dans l'expérience 6 a été déterminée en s'alignant sur le coût de la fertilisation mixte de l'expérience 5. Enfin, l'expérience 7 avait pour but d'étudier l'effet de la concentration en phosphate inorganique apportée par le fertilisant sur la croissance des algues, afin de déterminer un volume minimum de fertilisant organique permettant de répondre aux besoins en phosphate des algues.

- Comparaison de croissance de différentes souches sauvages et de la souche de culture de France Haliotis avec une fertilisation mixte (expériences 8 à 9)

La fertilisation mixte élaborée dans l'axe précédent a été appliquée à des souches sauvages provenant de Guisseny (UG), de l'anse de Kerazan (UK) et à la souche cultivée (U) lors de l'expérience 8. De la même façon, dans l'expérience 9, la fertilisation mixte a été testée sur 4 nouvelles souches sauvages (provenant de l'anse du Guillec (GL), de Plouescat (UP), de Cléder (UC) et de Brignogan (UB), et une nouvelle fois sur les souches UK et U. Pour ces deux expériences, les croissances des différentes souches ont été comparées.

Pour toutes les expériences, chaque modalité et contrôle était réalisée en triplicats. De plus, les traitements étaient répartis de manière aléatoire dans les bassins expérimentaux afin de limiter le biais expérimental (luminosité, renouvellement d'eau, aération...).

Les expériences sont détaillées dans le tableau 4. La lettre « N » désigne les bassins de nurserie, et « B » les bacs expérimentaux.

Tableau 4. Synthèse des expériences réalisées. La lettre « N » correspond aux bassins de nurserie et la lettre « B » aux bacs expérimentaux.

Axe	N° expérience	Intitulé	Type de bassin	Nombre de bassins	Durée en jours	Modalités
<i>Faisabilité d'une fertilisation minérale</i>	1	Effet d'une fertilisation à base de nitrate de sodium sur la croissance et le rendement	N	9	10	F.Orga GP (témoin +): 1L de Geogreen Plus F.Orga ProAlg : 1 L de ProAlg F.min N : 100 g NaNO ₃
	2	Influence de différentes quantités de nitrate de sodium sur la croissance	N	12	7	T (témoin): aucun ajout de fertilisation N100 : 100 g NaNO ₃ N200 : 200 g NaNO ₃ N300 : 300 g NaNO ₃
	3	Effet d'une fertilisation à base de nitrate de sodium (NaNO ₃) et de phosphate de calcium (Ca ₃ (PO ₄) ₂) sur la croissance et le rendement	N	9	7	T (témoin): aucun ajout de fertilisation F.Orga GP (témoin +): 1 L de Geogreen Plus F.min NP : 100 g NaNO ₃ + 10 g Ca ₃ (PO ₄) ₂
	4	Comparaison de plusieurs combinaisons de fertilisants minéraux (AB et conventionnels) sur la croissance	B	18	7	T (témoin): aucun ajout de fertilisation F.Orga GP (témoin +): 5 cl de Geogreen Plus Bio : NaNO ₃ + Ca ₃ (PO ₄) ₂ Conventionnel : NH ₄ NO ₃ + Na ₃ PO ₄ M1 : NaNO ₃ + Na ₃ PO ₄ M2 : NH ₄ NO ₃ + Ca ₃ (PO ₄) ₂
<i>Optimisation d'une fertilisation mixte</i>	5	Effet du mélange d'une fertilisation mixte (Geogreen Plus et NaNO ₃) sur la croissance et le rendement	N	9	7	T (témoin): aucun ajout de fertilisation F.Orga GP (témoin +): 5 cl de Geogreen Plus F.mixte GP : 25 cl de Geogreen Plus + 100 g NaNO ₃

	6	Effet du mélange d'une fertilisation mixte (Geogreen Start et NaNO ₃) sur la croissance et le rendement	N	9	7	T (témoin) : aucun ajout de fertilisation F.mixte GP : 25 cl de fertilisant Geogreen Plus+ 100 g NaNO ₃ F. mixte GS : 13 cl de Geogreen Start + 100 g NaNO ₃
	7	Étude de la croissance en fonction de la concentration en phosphate inorganique apportée par le fertilisant organique (Geogreen Start)	B	18	7	T (témoin) : aucun ajout de fertilisant Gradient de GS : 1, 2, 3, 4 et 5 ml + 6,6 g NaNO ₃
<i>Comparaison de souches sauvages d'Uva spp à la souche cultivée par France Halotis</i>	8	Comparaison de la croissance de deux souches sauvages à la souche cultivée avec une fertilisation mixte	N	9	7	U : Souche cultivée par FH UG : Souche de Guissény UK : Souche de Kérazan Fertilisation : 25 cl GS + 100 g NaNO ₃
	9	Comparaison de la croissance de cinq souches sauvages à la souche cultivée avec une fertilisation mixte	B	18	7	U : Souche cultivée par FH UK : Souche de Kérazan UGL : Souche du Guillec UC : Souche de Cléder UB : Souche de Brignogan UP : Souche de Plouescat Fertilisation : 25 cl GS + 100 g NaNO ₃

2.7 Mesures de biomasse et indicateurs calculés

Avant chaque mesure de biomasse, les algues sont essorées à l'aide d'uneessoreuse industrielle (Essoreuse ES-200, Sammic) lors d'un cycle de 1 minute à 900 tr/mn afin d'enlever l'excédent d'eau de manière uniforme et standardisée. La biomasse ainsi essorée est ensuite pesée à l'aide d'une balance. Toutes les biomasses sont exprimées en poids humide. À partir de ces données, plusieurs indicateurs sont calculés.

L'indicateur de croissance utilisé est le **taux de croissance spécifique** (Specific Growth Rate, SGR), exprimé en % \cdot jour $^{-1}$, selon la formule de D'Elia & DeBoer (1978) :

$$SGR = \frac{\ln(W_t) - \ln(W_{t_0})}{\Delta t}$$

Avec W_t la biomasse finale, W_{t_0} la biomasse initiale et Δt le temps de culture en jours.

Le **rendement** (Y) est le rapport entre la biomasse récoltée et le facteur de production, ici un bassin, par unité de temps. On l'exprime en kg \cdot jour $^{-1}$.bassin $^{-1}$. Il se calcule selon l'équation d'E vans (1972) :

$$Y = \frac{W_t - W_{t_0}}{\Delta t}$$

Avec W_t la biomasse finale, W_{t_0} la biomasse initiale et Δt le temps de culture en jours.

2.8 Analyses statistiques réalisées et représentations graphiques

Les analyses statistiques ont été réalisées sur le logiciel Rstudio (version 4.2.1). Pour chaque expérience, une ANOVA à un facteur a été réalisée. La comparaison post-hoc des moyennes a été effectuée à l'aide du test de Tuckey. Ce test permet de déterminer si l'échantillon est composé de groupes qui diffèrent les uns des autres, à l'aide de la « différence significative honnête ». La vérification des hypothèses d'utilisation du modèle anova, c'est-à-dire la normalité des distributions et l'homogénéité des variances, est réalisée *a posteriori* à l'aide de, respectivement, un test de Shapiro-Wilk et un test de Bartlett ou de Levene pour une probabilité de 0,05. Aucun jeu de données n'a nécessité de transformation. Enfin, pour étudier la corrélation entre deux variables quantitatives (expérience 7), le coefficient de Pearson a été calculé.

Les graphiques ont été réalisés à l'aide du package ggplot2. Pour chaque traitement, la moyenne est indiquée. Les barres d'erreurs représentent l'erreur standard (SE), calculée de la manière suivante :

$$SE = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \text{ avec } \sigma \text{ l'écart type de la moyenne de la modalité, et } n \text{ le nombre d'individus.}$$

Les groupes déterminés à l'aide du test de Tuckey sont indiqués graphiquement par des lettres. Des lettres différentes représentent une différence significative entre les moyennes. Un effet est considéré significatif pour une p -value $< 0,05$.

3 Résultats

3.1 Faisabilité d'une fertilisation minérale

Expérience 1 et 2 – Fertilisation minérale à base de nitrate de sodium

Le taux de croissance des algues ayant reçu du nitrate de sodium étaient bien plus faibles que ceux ayant reçu une fertilisation organique. Le même constat peut être fait pour le rendement journalier, qui était médiocre pour le traitement F.min N (fig. 9). L'analyse statistique montrait un effet très significatif du type de fertilisation sur la croissance et le rendement journalier par bassin (respectivement $p = 0,0004$ et $p = 0,0003$). Par ailleurs, il n'y avait pas de différence significative de croissance entre les deux fertilisants organiques (ProAlg et Geogreen Plus), cependant le rendement journalier des algues fertilisées au ProAlg était meilleur celui du Geogreen Plus ($p = 0,03$).

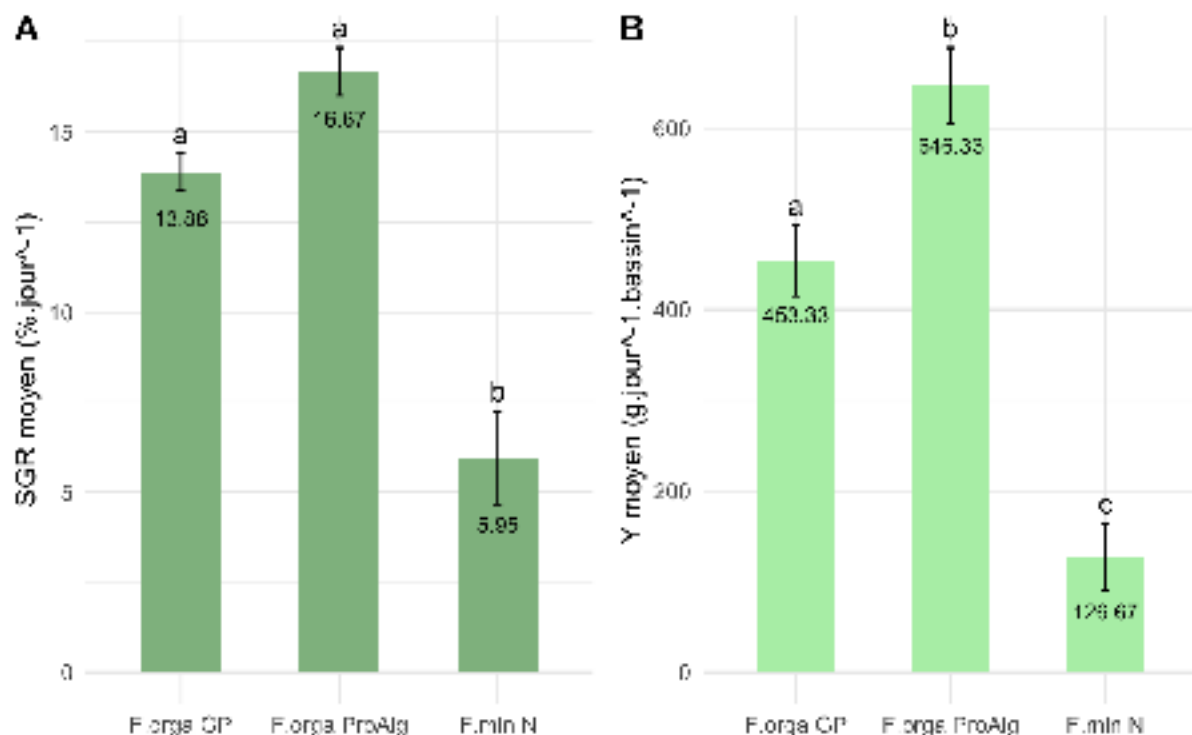


Figure 9. Histogrammes présentant les taux de croissance (A) et rendements (B) journaliers moyens pour des ulves ayant reçu seulement du nitrate de sodium (F.min N) ou deux types de fertilisants organiques, ProAlg et Geogreen Plus (respectivement F.orga ProAlg et F.orga GP). ($n=9$)

La croissance des algues a semblé s'abaisser quand la quantité de nitrate augmentait, avec un SGR de $10,76 \pm 0,7$ % jour⁻¹ pour la concentration la plus faible et $8,43 \pm 0,98$ % jour⁻¹

¹ pour une concentration 3 fois plus importante (fig. 10). Cependant, statistiquement, aucun effet de la quantité de nitrates sur la croissance des ulves n'a été observé ($p = 0,2414$). Ainsi, le taux de croissance des ulves n'augmentait pas avec la quantité de nitrates ajoutée dans l'eau, avec un taux de croissance spécifique stagnant aux alentours de $10\% \text{ jour}^{-1}$ (fig. 11).

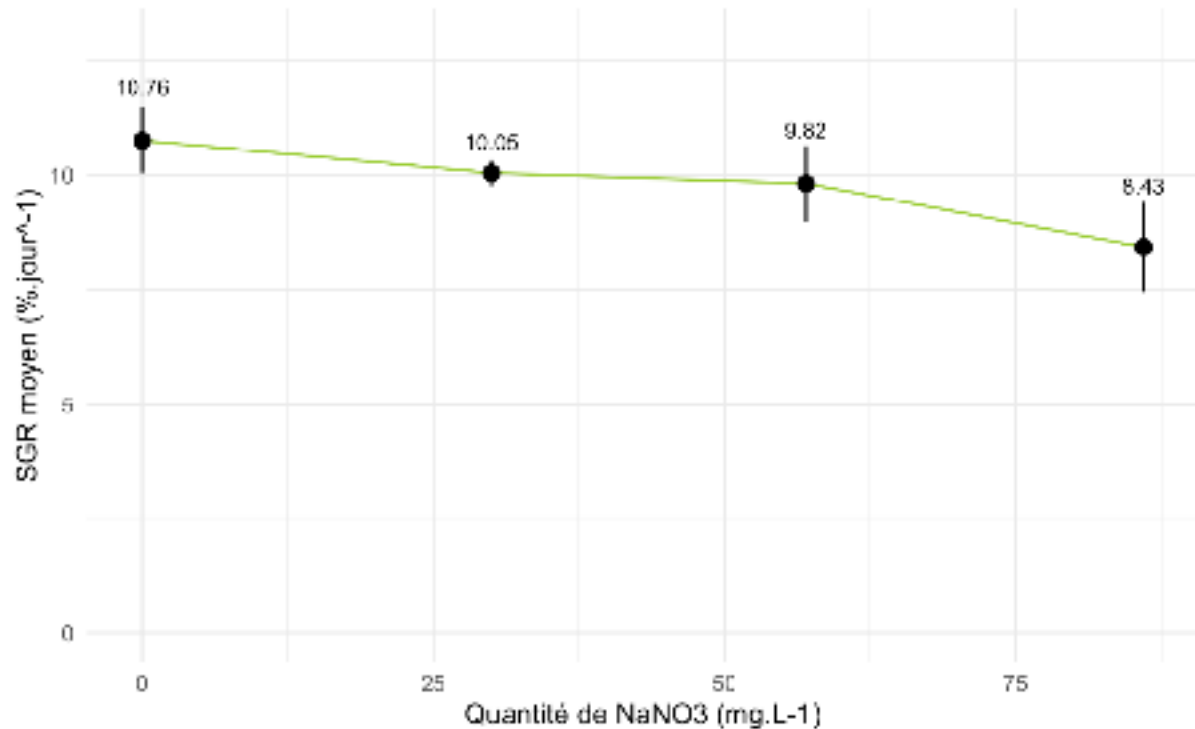


Figure 5. Taux de croissance spécifique des ulves en fonction de la quantité de NaNO3 ajoutée dans le milieu de culture ($n=12$)

Expérience 3 - Fertilisation minérale à base de nitrate de sodium et de phosphate de calcium

Les algues ayant reçu une fertilisation minérale à base de nitrate de sodium et de phosphate de calcium ne présentaient pas de différence significative de croissance et de rendement avec le témoin, qui n'a reçu aucune fertilisation ($p = 0,36$). En revanche, en moyenne, la fertilisation organique habituelle (F.orga GP) permettait d'obtenir un taux de croissance et un rendement convenable, respectivement $17,4\% \text{ jour}^{-1}$ et $652,38 \text{ g.j}^{-1} \text{ bassin}^{-1}$ (fig. 11).

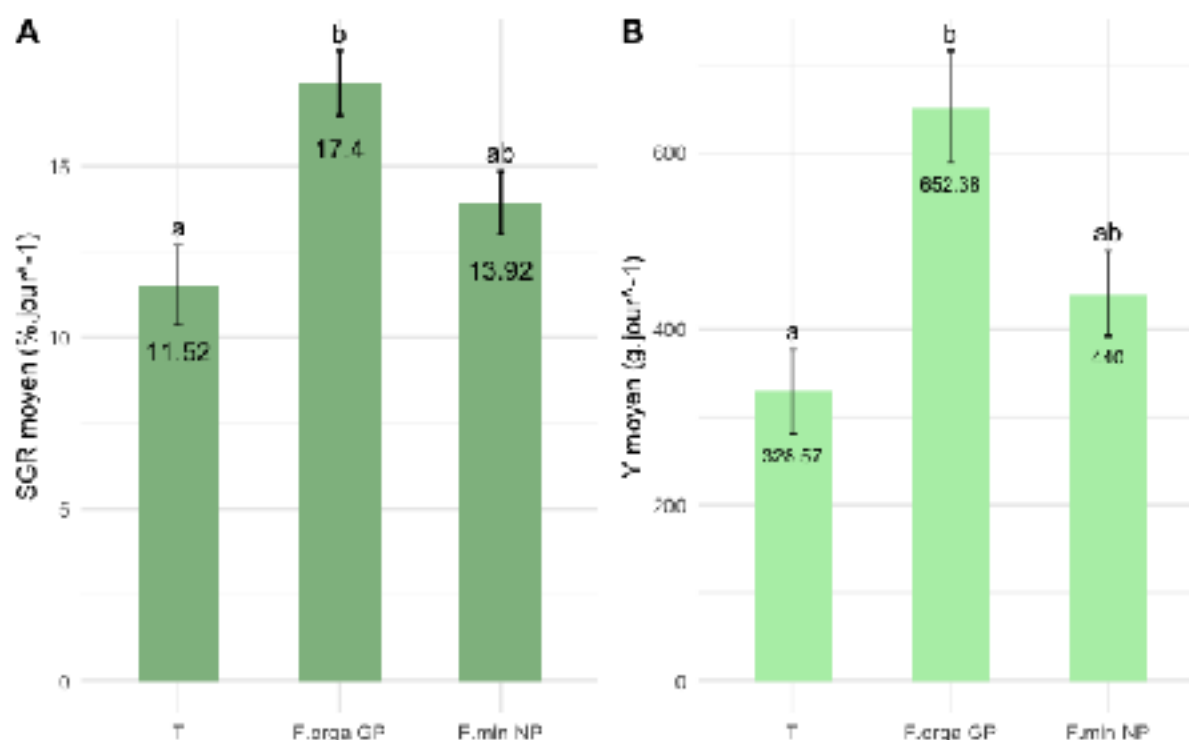


Figure 11. Histogramme présentant les taux de croissance (A) et rendements (B) journaliers moyens pour une fertilisation minérale à base de NaNO_3 et $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ (Fmin NP) en comparaison à un fertilisant organique (Forga GP) (n=9)

Expérience 4 – Comparaison de plusieurs combinaisons de fertilisants minéraux conventionnels et biologiques

Les taux de croissance atteints pour une fertilisation minérale composée de nitrate de sodium et de phosphate de sodium (M1) étaient semblables à ceux obtenus avec une fertilisation organique et une fertilisation minérale conventionnelle (fig. 12).

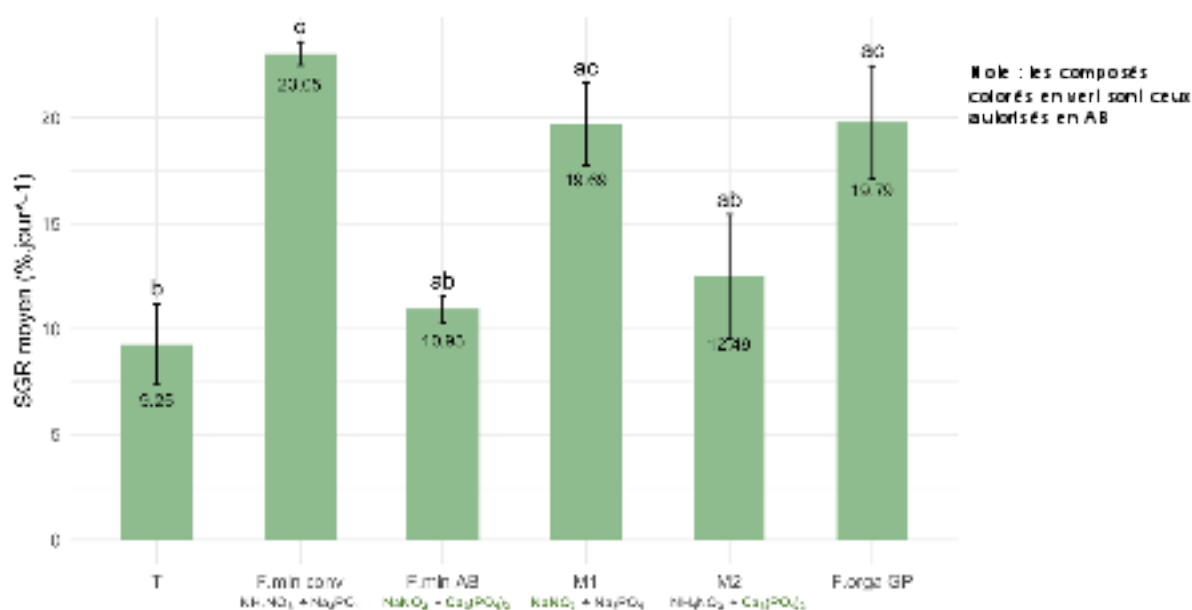


Figure 12. Comparaison des taux de croissance pour différentes combinaisons de fertilisants minéraux et pour une fertilisation organique (Forga GP). (n=18)

D'une part, aucune différence significative de croissance n'a été observée entre la fertilisation minérale conventionnelle et la fertilisation organique, avec des SGR respectifs de $23,05 \pm 0,55$ et $19,79 \pm 2,7$ $\% \cdot \text{jour}^{-1}$ ($p = 0,85$). Les taux de croissance avec la fertilisation M1 n'étaient pas significativement différents de ceux de la fertilisation minérale conventionnelle et organique ($p = 0,8$ et $p = 1$ respectivement). D'autre part, il n'y avait pas de différence significative de croissance entre la fertilisation minérale AB et le témoin avec des SGR respectifs de $10,93 \pm 0,62$ et $9,25 \pm 1,93$ $\% \cdot \text{jour}^{-1}$ ($p = 0,99$). La fertilisation M2 ne présentait pas de différence significative de croissance par rapport à la fertilisation minérale AB et le témoin, avec un SGR de $12,49 \pm 2,92$ $\% \cdot \text{jour}^{-1}$ ($p = 0,99$ et $p = 0,85$ respectivement).

3.2 Optimisation d'une fertilisation mixte

Expérience 5 et 6 – Fertilisation mixte avec deux fertilisants organiques différents : Geogreen Plus et Geogreen Start

Les résultats de l'expérience 5 ont montré qu'une fertilisation mixte permettait d'atteindre les mêmes taux de croissance qu'une fertilisation organique, avec des SGR supérieurs à 20 $\% \cdot \text{jour}^{-1}$ ($p = 0,8$) (fig. 13). De plus, ce mode de fertilisation permettait d'atteindre des rendements très corrects avec près de 1 $\text{kg} \cdot \text{jour}^{-1} \cdot \text{bassin}^{-1}$. Pour l'expérience 6, les coûts liés à la fertilisation sont les mêmes, ce qui correspond à un volume de Geogreen Start de 13 cl . Il n'y avait pas d'effet significatif du type de fertilisant (GP ou GS) utilisé sur la croissance et les rendements ($p = 0,23$ et $p = 0,18$), bien que la croissance et le rendement semblaient en moyenne meilleur pour le Geogreen Start (fig. 14).

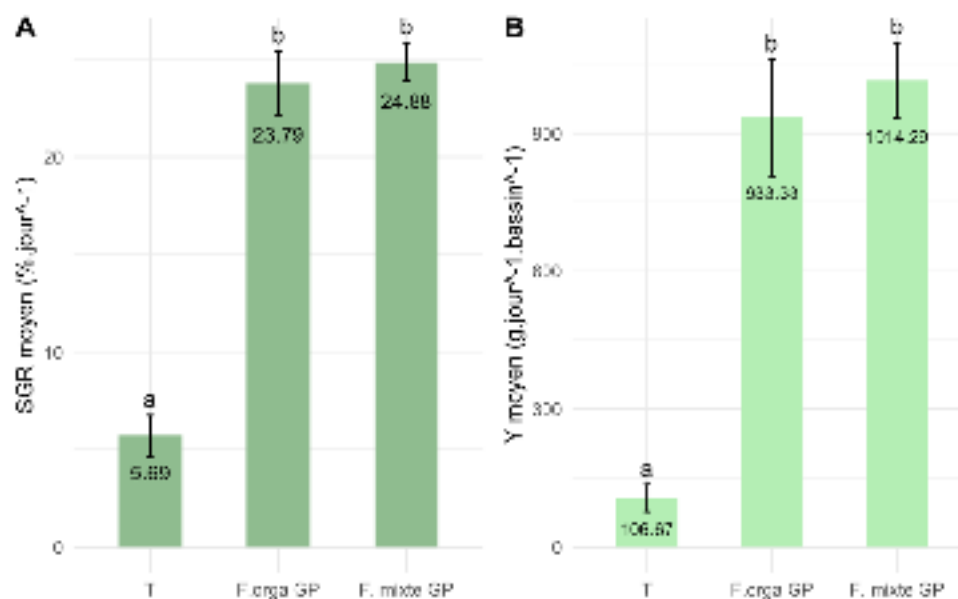


Figure 13. Comparaison des taux de croissance (A) et des rendements (B) journaliers moyens pour une fertilisation organique classique (F.orga GP) et une fertilisation mixte (F. mixte GP : 25 cl Geogreen Plus + 100g $\text{N} \cdot \text{NO}_3$) ($n=9$)

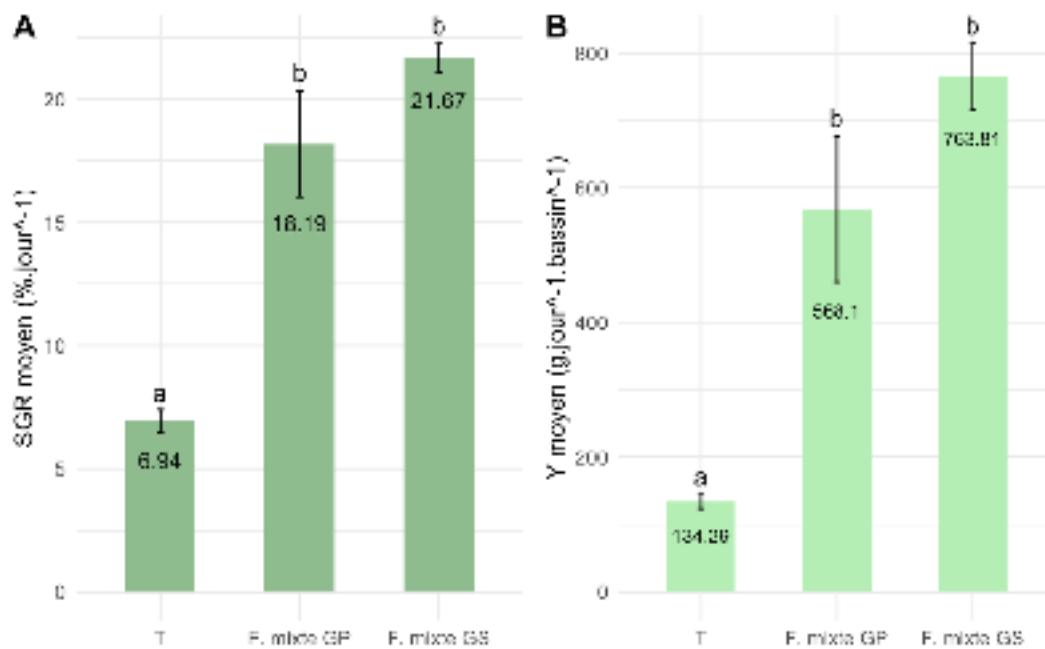


Figure 14. Comparaison des taux de croissance (A) et des rendements (B) journaliers moyens pour une fertilisation organique classique (Forga GP) et une fertilisation mixte (F mixte GS : 13 cl Geogreen Start + 100g NaNO₃). Le coût de fertilisation par bassin est identique à celui de l'expérience 5, c'est-à-dire 1,02€. (n=9)

Expérience 7 – Taux de croissance en fonction de la concentration en phosphate inorganique

L'ajout de fertilisant, même en petite quantité ($[P_i] = 6,6 \mu\text{mol.L}^{-1}$) a entraîné une augmentation de 65% du taux de croissance par rapport aux algues non fertilisées (fig.15).

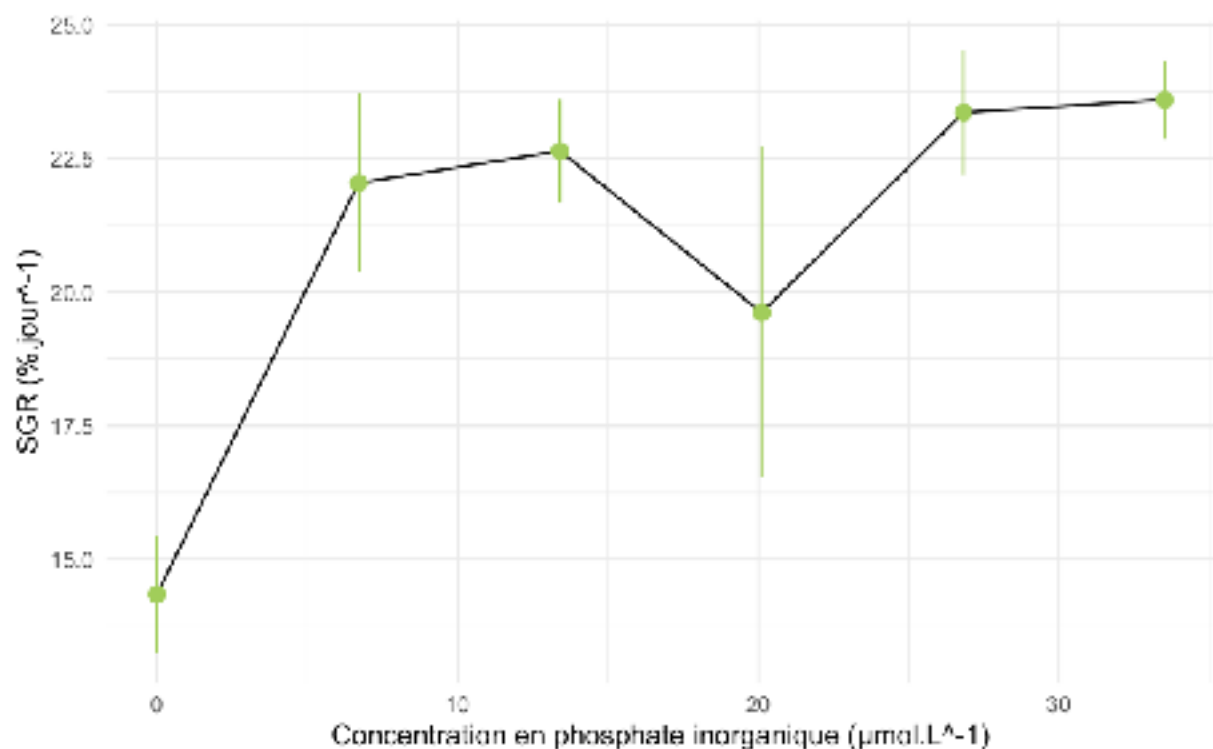


Figure 15. Courbe de l'évolution du SGR moyen en fonction de la quantité de phosphate inorganique apportée par le fertilisant

Cependant, les SGR moyens semblaient atteindre un pallier dès la première modalité de concentration testée. Aucune corrélation entre les SGR moyens et la concentration en phosphate des bassins fertilisés n'a été prouvée statistiquement (Pearson, $p = 0,49$). Pour la concentration de $20 \mu\text{mol.L}^{-1}$, le SGR moyen chutait sous les $20 \text{ \%}.\text{jour}^{-1}$, avec une valeur de $19,62 \pm 3,1 \text{ \%}.\text{jour}^{-1}$. Concernant cette modalité, la variabilité entre les 3 réplicas est grande.

3.3 Comparaison de la croissance de différentes souches avec la fertilisation mixte

Expérience 8 – Souches de Kerazan et de Guissény

Les taux de croissance moyens obtenus étaient semblables pour les trois souches étudiées (fig. 16). D'ailleurs les taux de croissance moyens des souche U et UG étaient très proches, respectivement $20,16 \pm 0,7 \text{ \%}.\text{jour}^{-1}$ et $20,17 \pm 0,98 \text{ \%}.\text{jour}^{-1}$. En moyenne, le taux de croissance de la souche UK était plus faible ($18,33 \pm 0,52 \text{ \%}.\text{jour}^{-1}$), mais statistiquement, aucun effet significatif de la souche sur la croissance n'a été constaté ($p = 0,22$).

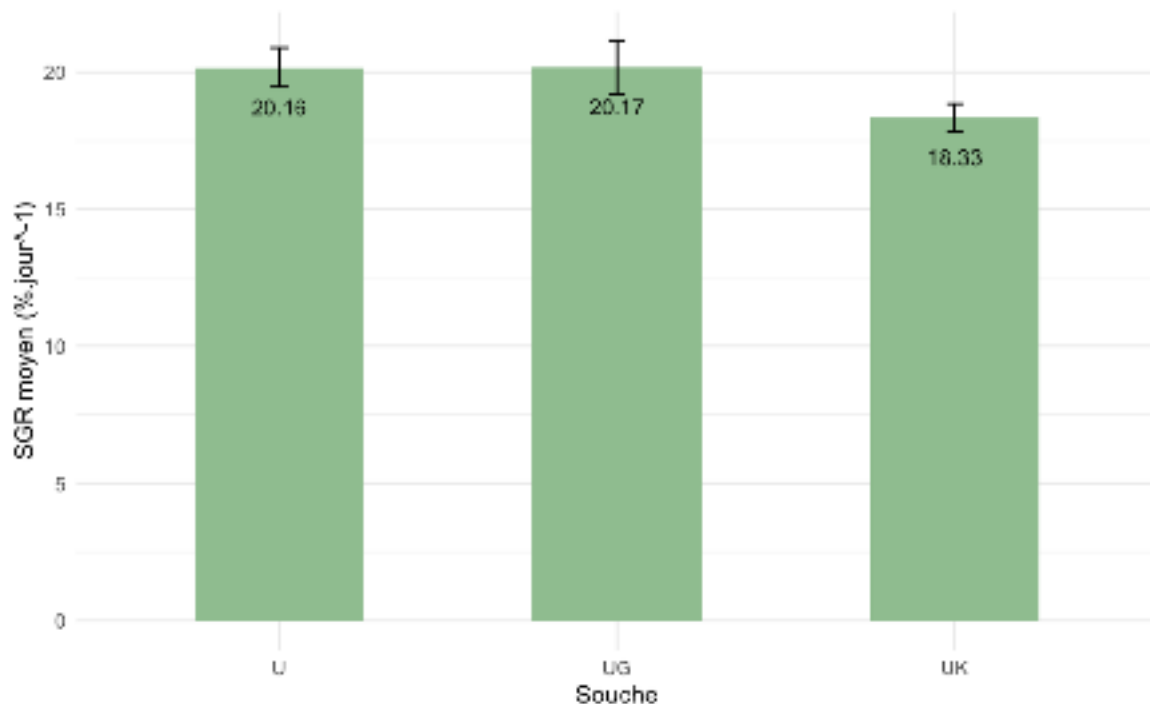


Figure 16. Comparaison des taux de croissance pour 3 souches d'*Ulva* spp ayant reçu une fertilisation mixte ($n=9$)

Expérience 9 – Souches de l'anse du Guillec, de Cléder, de Plouescat et de Brignogan

La souche de cultivée (U), reste la souche avec le SGR maximum ($23,75 \pm 0,21 \text{ \%}.\text{jour}^{-1}$). Cependant, statistiquement, les souches UK, UC, et UGL ont atteint des taux de croissance similaires (respectivement $p = 0,1$; $p = 0,5$; $p = 0,9$), tous supérieurs à $20 \text{ \%}.\text{jour}^{-1}$. La souche

UB présentait une croissance plus faible, et UP arrive dernière avec un SGR moyen inférieur à 15 % \cdot jour $^{-1}$ (fig. 17).

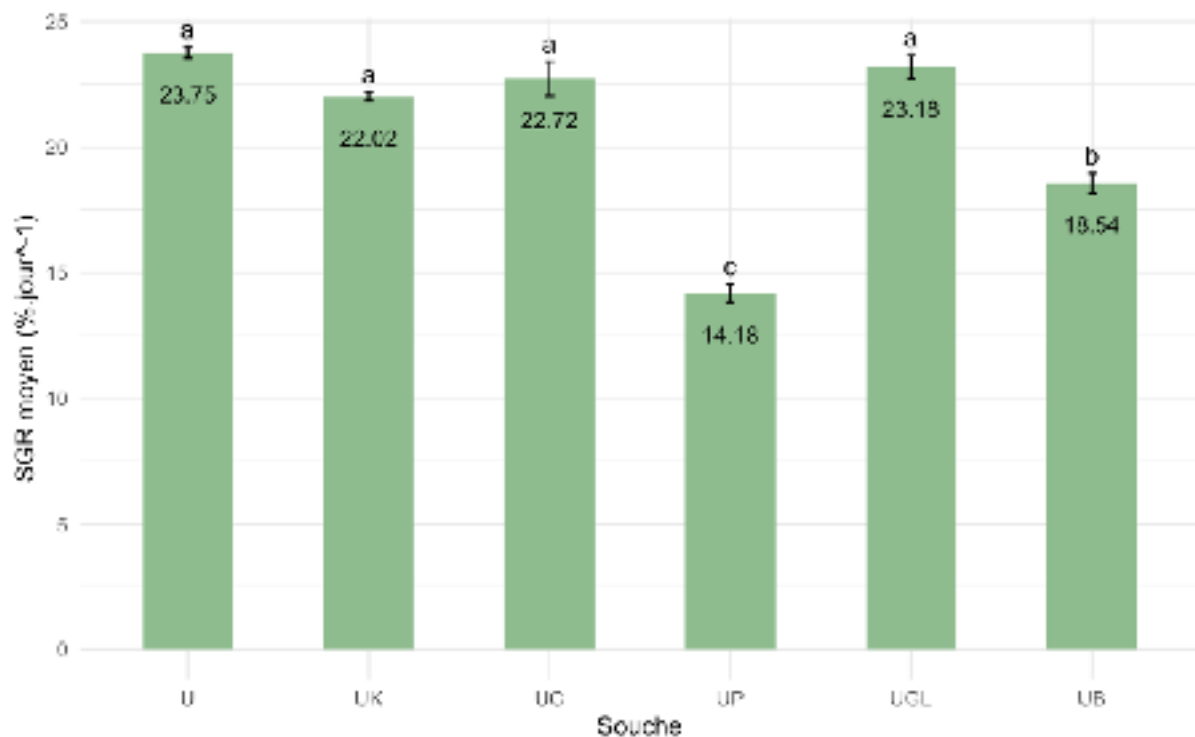


Figure 17. Comparaison des taux de croissance journaliers pour 6 souches d'*Ulva* spp ayant reçu une fertilisation mixte (n=18)

4 Discussion

4.1 L'échec d'un passage à une fertilisation entièrement minérale en AB : causes et alternatives

Pour les végétaux, les facteurs limitant la croissance sont la teneur en azote et en phosphore inorganique du milieu (Smith *et al.*, 1999). Pour les algues, l'élément limitant entre l'azote et le phosphore ne fait pas consensus au sein de la communauté scientifique et a engendré de nombreux débats (Howarth, 1988). En ce qui concerne la laitue de mer dans le milieu naturel, et particulièrement dans le cas des marées vertes, l'azote est le facteur limitant car le phosphate semble toujours en excès par rapport aux besoins de l'algue (CEVA, 2009).

Cependant, les résultats des deux premières expériences ont bien montré que l'ajout de nitrates seul ne suffisait pas à favoriser la croissance des algues, et que les quantités de phosphate présentes dans l'eau de mer n'étaient pas suffisantes. L'hypothèse d'une fertilisation minérale avec uniquement du nitrate de sodium a donc été écartée. Ces résultats ont également servi à souligner l'importance du phosphate, qui est source de phosphore pour les algues. C'est un élément essentiel à leur croissance, car c'est un constituant majeur de l'ARN et, par conséquent, il est impliqué dans la synthèse des protéines (Sternner & Elser,

2002). C'est également un constituant des phospholipides, et des nucléotides tels que l'adénosine triphosphate (ATP), « monnaie énergétique » impliquée dans de nombreux processus tels que la photosynthèse, la division et la croissance cellulaire (Douglas *et al.*, 2014).

L'échec de la fertilisation minérale à base de nitrate de sodium et de phosphate de calcium de l'expérience 3 s'expliquait facilement par la faible solubilité du phosphate de calcium dans l'eau ($1,2 \cdot 10^{-3} \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ dans l'eau à 20°C) (Chow, 2001). Les résultats de l'expérience 4 ont semblé confirmer cette hypothèse, puisque que la modalité M1 (NaNO_3 + phosphate de sodium*, interdit en AB*) présentait des bons taux de croissance, alors que la modalité M2 (NaNO_3 + phosphate de calcium**, autorisé en AB**) semblait n'avoir aucun effet sur la croissance, ce qui suggère que le phosphate de calcium n'est pas adapté pour la fertilisation des ulves. Il est quasiment insoluble dans l'eau, mais il l'est dans l'acide chlorhydrique et l'acide nitrique dilué (Budavari, 1996). Toutefois, l'utilisation de ces solvants n'est pas autorisée en AB.

Compte tenu de ces résultats, il devenait clair que le passage d'une fertilisation organique à une fertilisation 100 % minérale, pour une production labellisée AB, n'est pas envisageable dans l'état actuel de la législation. En effet, le phosphate de calcium est le seul composé minéral de phosphate autorisé en AB.

Il a été décidé d'apporter le phosphate nécessaire aux algues par des engrais organiques autorisés en AB, et d'apporter la majorité de l'azote nécessaire avec une fertilisation minérale, le nitrate de sodium.

Deux principaux enjeux émergent avec cette fertilisation mixte. Premièrement, celui de **trouver un équilibre entre coûts de fertilisation et croissance**, en réduisant le volume d'engrais organique utilisé, tout en gardant des taux de croissance importants. Deuxièmement, la **maîtrise des rejets dans le milieu** est primordiale, notamment en ce qui concerne les ions phosphate. Des analyses des effluents avaient montré un léger rejet de phosphate dans le milieu (Jestin-Fagon, 2020), or la réglementation AB indique les concentrations en phosphate dans les effluents ne devraient être plus élevées qu'en entrée du système. Un des objectifs de ce sujet portait donc sur l'abaissement des rejets potentiels en phosphate dans le milieu par l'utilisation d'engrais en réduisant les doses appliquées.

4.2 Fertilisation mixte : des résultats encourageants, mais quelle représentativité pour une production en raceways ?

Les expériences portant sur la fertilisation mixte ont pu montrer qu'un mélange de fertilisant organique et de fertilisant minéral permettait d'atteindre des taux de croissance et rendements similaires à l'utilisation de fertilisant organique seul, tout en abaissant les frais liés

à la fertilisation (4.5). La formule de fertilisation retenue, pour un bassin de nurserie, a été la suivante : 13 cL de Geogreen Start complété par 100 g de nitrate de sodium. Cela correspondait à une concentration en phosphate de $42,3 \mu\text{mol.L}^{-1}$, et une quantité de nitrates dissous de $334 \mu\text{mol.L}^{-1}$. Il est à noter que le fertilisant organique apportait également une fraction d'azote que l'on ne pouvait quantifier précisément. Le passage d'une fertilisation organique à cette formule fertilisation mixte permet une réduction des apports de phosphate de près de 70 %.

L'expérience 7 semblait montrer qu'une concentration faible en phosphate ($[P_i] = 6,6 \mu\text{mol.L}^{-1}$) suffisait à atteindre des taux de croissance supérieurs à $20 \text{ \%}.\text{jour}^{-1}$, puisqu'un palier a été atteint dès le premier volume de fertilisant testé. Cette concentration était la plus faible testée, mais elle semblerait suffire pour atteindre des taux de croissance corrects (Suthar *et al.*, 2019). De plus, il y avait une grande variabilité des biomasses, surtout pour le point à $20 \mu\text{mol.L}^{-1}$, qui pourrait s'expliquer par un défaut de l'environnement expérimental. Notamment, le débit d'eau qui était très variable d'un bac à l'autre à cause de la conception de la rampe PVC assurant l'alimentation en eau, mais également à cause de la variabilité des débits d'eau selon l'activité principale de l'entreprise. Ce dernier biais était également vrai pour les bassins de nurserie, ce qui a pu expliquer en partie les variabilités entre les réplicas. Le nombre de renouvellements d'eau a un impact sur la stabilité du pH, la modération de la température, l'apport de macro et micro-nutriments et l'évacuation de métabolites toxiques (DeBusk *et al.*, 1986). Ainsi, le modèle des bacs expérimentaux, bien que pratiques pour pouvoir multiplier les modalités testées et dont l'utilisation est moins chronophage que les bassins de nurserie, s'avèrait avoir des limites en termes de biais expérimental. Étant donné les résultats obtenus, il serait intéressant de transposer les volumes appliqués dans les bassins de nurserie, afin de déterminer si des concentrations aussi faibles en phosphates permettraient véritablement d'atteindre des taux de croissance aussi élevés.

En raison du manque de données dans la littérature sur l'utilisation de fertilisants organiques sur la culture d'ulves, les doses testées lors des expériences ont été décidées de manière empirique. L'obtention d'une dose remplissant les objectifs était déjà un résultat très prometteur, mais elle pourrait être encore adaptée. La priorité serait d'ajuster le volume de fertilisant organique, car c'est le paramètre le plus coûteux de la fertilisation. D'une part, l'expérience 7 suggèrait que la quantité de phosphate pourrait encore être abaissée car des bons SGR étaient obtenus avec des volumes faibles d'engrais. D'autre part, la fertilisation mixte à partir de Geogreen Plus présentait les mêmes performances de croissance avec une concentration en phosphate inorganique plus faible ($[P_i] = 32,1 \mu\text{mol.L}^{-1}$), ce qui sous-entendait également que le phosphate était probablement en excès dans la formule de fertilisation retenue. Par ailleurs, il s'agit du seul levier pour réguler la quantité de phosphate rejetée dans le milieu. Ensuite, la dose de nitrate de sodium optimale pourrait aussi être étudiée, mais de

manière moins urgente car son coût est plus faible et que les ulves ont de très grandes capacités d'absorption du nitrate, il n'y a pas de rejets à signaler dans les effluents (Jestin-Fagon, 2020).

Enfin, il sera essentiel de valider la formule de fertilisation élaborée dans les raceways. En effet, ce sont les structures qui représentent environ 85% des surfaces de production de la laitue de mer de l'entreprise. Il sera nécessaire d'expérimenter ces nouvelles doses dans les raceways et suivre les rendements sur plusieurs mois, ainsi que de surveiller la composition des effluents. Concernant ce dernier point, des analyses sont en cours pour quantifier les quantités de nitrate, d'ammonium et de phosphate présentes dans l'eau des raceways à la réouverture des débits d'eau, soit 24 heures après la fertilisation. La dernière forme d'ion azoté, le nitrite, ne sera pas quantifié car il est en quantités négligeables dans l'eau ($< 0,025 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$; Jestin-Fagon, 2020).

4.3 Optimisation de la fertilisation : dose, pratiques et rejets

Outre les doses appliquées, d'autres composantes de la fertilisation seraient intéressantes à étudier plus longuement, comme la fréquence de fertilisation. Grâce aux capacités de stockage d'azote importantes dans les tissus de l'ulve (Debusk *et al.*, 1986), la fertilisation « pulse », c'est-à-dire une fertilisation hebdomadaire et non pas continue, est avantageuse car elle permet de contrôler le développement d'épiphytes (Ryther *et al.*, 1981). Toutefois, si les analyses des effluents montraient des concentrations en phosphate trop élevées, il serait alors envisageable de procéder à une fertilisation bi-hebdomadaire en divisant les doses par deux. De plus, bien que la fertilisation pulse n'ait apparemment pas d'influence sur la croissance par rapport à une fertilisation quotidienne, elle a été associée à des variations de colorimétrie (Berthelot, 2018). Effectivement, les algues fertilisées quotidiennement étaient d'un vert plus prononcé que celles fertilisées de façon hebdomadaire, elles seraient potentiellement plus riches en protéines (Robertson-Andersson, 2003).

Comme souligné par Zertuche-González et ses collaborateurs dans ses récents travaux (2021), la synchronisation de la récolte et de la fertilisation serait essentielle pour le développement d'une production commerciale d'*Ulva* spp, particulièrement dans l'optique de garantir un taux de protéines minimum. Si les ulves de culture peuvent atteindre des taux de protéines très hauts (jusqu'à 40 %, Fleurence *et al.*, 2012), elles peuvent également atteindre des valeurs très faibles ($< 5 \%$, Shpigel, 1999). Il serait primordial de réfléchir au moment de récolte pour ne pas perdre le taux de protéine potentiel offert par la laitue de mer.

Enfin, un autre enjeu serait de parvenir à adapter la dose de fertilisant à la biomasse dans les bassins. La même dose de fertilisant est apportée toutes les semaines, or la biomasse augmente, ce qui entraînerait une plus grande compétition pour les nutriments. En cas de

carence, des phénomènes de sporulation pourraient avoir lieu et mener à la perte de la totalité de la biomasse assez rapidement, il serait essentiel d'assurer une quantité suffisante de nutriments (Zertuche-González *et al.*, 2021). Néanmoins, il est très complexe d'estimer la biomasse dans les bassins, surtout dans les raceways, et il serait nécessaire d'élaborer des modèles de croissance prenant en compte les paramètres principaux qui influeraient sur la croissance des algues (nutriments, luminosité, température...).

4.4 Sélection de souches : des résultats prometteurs qui soulignent l'importance de critères autres que la croissance

Aucune souche présentant des meilleurs taux de croissance que la souche déjà cultivée par France Haliotis (U) n'a pu être trouvée. Cela pourrait s'expliquer par un phénomène de sélection ayant opéré au cours de ces 4 dernières années de culture, qui aurait mené à la sélection des individus absorbant rapidement et efficacement les ions nutritifs apportés par les fertilisants. Dans les baies sujettes aux marées vertes, les ulves sont soumises à une pression de sélection forte pour l'accès aux nutriments et à la lumière, ce qui a mené à la sélection de souches à la croissance rapide et aux caractéristiques métaboliques différentes des ulves ne provenant pas de marées vertes (Fort, 2020). Il serait probable que le même phénomène ait eu lieu en culture.

Toutefois, plusieurs souches (UK, UC, UGL) ont atteint des taux de croissance similaires à la souche cultivée U. Il serait *a priori* possible de renouveler la souche cultivée, pour contrer un possible appauvrissement génétique (conformément au cahier des charges AB) sans diminuer les volumes produits. Il serait d'ailleurs intéressant pour l'entreprise de réaliser l'analyse d'un pool génétique de la souche U, afin de vérifier si elle a subi appauvrissement génétique. De plus, si les taux de croissance étaient similaires, les morphologies ne l'étaient pas. Ainsi, une souche comme celle de Kerazan avait un thalle de grande taille (plusieurs dizaines de cm), assez épais et peu perforé. Ce sont des critères recherchés par certains transformateurs d'algues, qui désirent une algue de culture ressemblant le plus possible à une algue sauvage (Berthelot, com. pers., 2023). Un autre avantage à la sélection de souches provenant de marées vertes semblerait qu'elles rentabilisent plus efficacement les flux d'azote pour la synthèse de protéines que les autres algues vertes (Fort *et al.*, 2020).

Étant donné les multiples usages des algues de France Haliotis, il pourrait être judicieux de disposer de plusieurs souches simultanément. Ainsi, une souche comme celle provenant de Kerazan, pourrait être seulement réservée à la vente en tant qu'algue alimentaire, alors que l'on privilégiera une souche à la croissance rapide pour le nourrissage des ormeaux.

4.5 Aspect économique d'un changement de fertilisation et rentabilité de la production

Le principal résultat de ces travaux était la possibilité de diviser par 3 les frais hebdomadaires liés à la fertilisation des bassins de nurserie, et par 5 ceux des raceways (tableau 5).

Tableau 5. Tableau des coûts liés à deux fertilisations mixtes pour les bassins de nurserie et les raceways. Les lignes vertes représentent la formule de fertilisation mixte la plus économique. La ligne orange sert de référence de comparaison et représente les coûts de l'ancienne fertilisation (organique) pour l'ensemble des bassins de nurserie et des raceways.

Type de bassin			Nurserie	Raceway
Coût de l'ancienne fertilisation (100 % organique)			124,4 €	746,4 €
Doses fertilisation mixte	Fertilisant organique	Geogreen Plus (GP)	25 cL	13 L
		Geogreen Start (GS)	13 cL	6,7 L
	Nitrate de sodium (NaNO ₃)		100g	5,14 kg
Coût fertilisation mixte	Coût hebdomadaire par bassin	GP + NaNO ₃	1,02€	57,77
		GS + NaNO₃	0,97 €	49,92
	Coût total	GP + NaNO ₃	40,80 €	346,62 €
		GS + NaNO₃	38,80 €	299,52 €

Ainsi, alors que les frais de fertilisation comptaient pour 12 % des charges de production avec la fertilisation organique, ils ne représenteraient plus que 4 % avec la fertilisation mixte (fig.18).

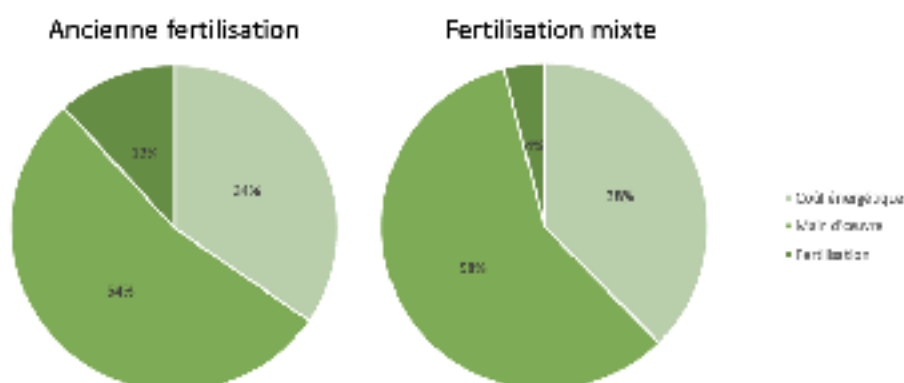


Figure 18. Comparaison de la répartition des charges pour la production d'ulves dans des bassins de nurserie sur une phase de 7 jours, avec une fertilisation 100% organique (gauche) et une fertilisation mixte (droite).

Il est également intéressant de prendre en considération l'impact de ces nouvelles pratiques sur les coûts de production des bassins de culture. Pour une phase de culture de 7 jours, en considérant que les 40 bassins de nurserie sont en activité, le coût de production

hebdomadaire par bassin est de 11,08 € pour une fertilisation mixte avec le Geogreen Start (calculs en Annexe II). Avec ces mêmes hypothèses, le coût de production hebdomadaire d'un bassin était de 13,21 € avec l'ancienne dose de fertilisant. À l'échelle d'une année de production, l'économie potentielle sur les coûts de fertilisation serait considérable. En considérant la période de production s'étalant du début du printemps à la fin de l'été (soit 26 semaines), et l'intégralité des bassins en activité simultanément, l'entreprise peut espérer une économie de plus de 15 000 € par an (tab. 6)

Tableau 6. Tableau résumant les coûts de l'ancienne fertilisation (100 % organique), de la fertilisation mixte conçue, et des économies réalisées.

	Unité	Nurserie	Circulaire	Raceway
Nombre de bassins		40	9	5
Volume des bassins	l	3500	10000	18000
Ancien coût hebdomadaire F. orga (GP) par bassin	€/sem/bassin	3,11	5,33	124,40
Volume fertilisant organique (GS)	L	0,13	0,37	6,70
Masse NaNO ₃	kg	0,10	0,29	5,14
Coût hebdomadaire F mixte par bassin	€/sem/bassin	0,97	2,77	49,92
Coût hebdomadaire pour tous les bassins	€/sem	38,77	24,95	249,54
Économie par bassin	€/sem/bassin	2,14	6,56	74,48
Économie sur tous les bassins	€/sem	85,63	59,02	446,85
Économie sur une année	€	2226,33	1534,64	11518,41
Économie totale sur une année	€	15379,38		

Malgré cette économie, le prix de vente de la laitue de mer resterait élevé en comparaison des algues de récolte, qui ne nécessitent pas de main d'œuvre d'entretien, d'intrants, d'énergie et moins d'amortissement de matériel (Tableau 1). En conséquence, le prix de vente est, lui aussi, assez haut, à environ 7 €/kg, en comparaison à des algues de récolte dont le prix de vente se situe généralement entre 2 et 2,50 €/kg en AB (Berthelot, com. pers.). De ce fait, l'activité d'algues alimentaires de l'entreprise reposerait dans un sens sur la volonté des entreprises acheteuses de faire l'effort de payer plus cher, pour avoir la garantie d'une algue de qualité et pour soutenir l'activité. Cependant, il sera primordial de continuer à œuvrer pour la baisse des coûts de production, afin de se maintenir sur un marché tendu dans un contexte commercial international très compétitif.

En somme, à ce jour, la production de laitue de mer resterait peu rentable économiquement, et son développement nécessitera la croissance du marché, ainsi que de lever les freins techniques afin d'abaisser les frais de production (Araújo *et al.*, 2021). Toutefois, les stocks naturels sont limités et les besoins des industriels grandissants, la demande croissante pour des algues de culture sera à prévoir.

La double activité de France Haliotis lui permet de supporter cette faible rentabilité. En effet, l'entreprise détient un savoir-faire dans la culture d'algues de qualité pour l'alimentation humaine, mais en cas de manque de client ou de baisse de qualité, les algues pourront toujours être valorisées comme fourrage et peu de pertes seront à déplorer. Des travaux

portant sur le calcul du taux de conversion des omeaux de France Haliotis ont estimé la valeur des ulves à destination de fourrage à 11 €/kg (Grosjean, 2020), mais cette valeur serait sans doute surestimée, car les calculs ne prenaient pas en compte la mortalité et la masse d'algues utilisée pour le nourrissage était plus faible que la réalité.

4.6 Vers d'autres critères que la production de biomasse

L'algoculture « occidentale » ayant réellement émergé il y a une cinquantaine d'années, elle n'en est encore qu'à ses prémices. Pour une production d'algues, le principal indicateur étudié est la croissance, qui renseigne sur la capacité du système à produire de la biomasse. Avec l'intérêt grandissant pour les algues, il serait probable que d'autres critères émergent.

Le premier serait la teneur en protéines des tissus de la laitue de mer. Grâce à ses capacités d'absorption d'azote impressionnantes, elle suscite de plus en plus d'intérêt en tant que source de protéines végétales, il serait très intéressant d'étudier plus en profondeur la relation entre fertilisation et teneur en protéines. Lors des expériences 1, 2 et 3, des analyses colorimétriques ont été réalisées sur les thalles (protocole et résultats en Annexe III). Il existerait une corrélation entre couleur du thalle et teneur en protéines des tissus (Robertson-Andersson, 2003 ; Berthelot, 2018), et il a pu être constaté lors des expériences que la couleur des thalles fonçait avec la concentration en nitrates. Ces résultats préliminaires suggéraient que l'optimisation de la fertilisation pourrait être une voie pour améliorer les teneurs en protéines des algues, et ainsi, être capable de garantir une teneur en protéines minimale pour des acheteurs.

Un autre critère émergent sur le marché de l'algue seraient ses qualités organoleptiques. En effet, l'essor récent de la cuisine à base d'algues dans la gastronomie occidentale, la « phycogastronomie » laisserait présager de nouvelles attentes et exigences concernant les algues alimentaires. Bien qu'elles bénéficient d'une image d'aliment sain et nutritif (Bras *et al.*, 2015), l'accent devra être mis sur les qualités organoleptiques pour développer le marché. L'appréciation culinaire des algues passerait par leur arôme, mais également par les sens : couleur, texture... (Mouritsen *et al.*, 2018). Ce sont tant de caractéristiques qui pourraient être influencées par les conditions de culture (Lahaye *et al.*, 1995 ; Turan & Tekogul, 2014), l'axe des qualités organoleptiques serait fondamental à explorer pour s'adapter au marché occidental.

5 Conclusion

La problématique de ce stage portait sur l'optimisation de la fertilisation d'*Ulva* spp, en conditions d'Agriculture Biologique, en étudiant la possibilité d'un basculement d'une fertilisation 100 % organique vers une fertilisation minérale (totale ou partielle). Le point de

départ de ce projet était le changement législatif récent concernant les engrais minéraux autorisés (règlement d'exécution (UE) 2023/121), et plus particulièrement l'autorisation du nitrate de sodium. Les résultats obtenus ont été complétés par un travail portant sur la sélection de souche et ses performances avec la fertilisation élaborée.

Les travaux ont permis d'aboutir à une formule de fertilisation mixte, alliant fertilisant organique et nitrate de sodium minéral. Ce changement représenterait une division par 3 des frais de fertilisation, et une économie potentielle de 15 000 € sur une année pour l'entreprise, pour des rendements qui resteraient inchangés. Cela a d'ailleurs eu pour conséquence immédiate la baisse du prix de vente de la laitue de mer fraîche.

L'échec de la conversion vers une fertilisation 100% minérale soulignait bien les contraintes qu'impose le label AB en matière d'apports de nutriments, car peu de composés minéraux sont autorisés. La fertilisation mixte fait office de bon compromis, en permettant un avantage économique à l'entreprise, et potentiellement un meilleur contrôle des effluents.

Les données sur la fertilisation des algues en AB étant rares, une approche empirique a été adoptée. La laitue de mer, grâce à sa croissance végétative et rapide, est un modèle biologique adapté pour multiplier les essais empiriques. Les prochains travaux de R&D de l'entreprise pourront porter sur l'ajustement des doses retenues à l'issue de ces expérimentations. D'autres paramètres de la fertilisation pourront également être étudiés : fréquence de fertilisation, moment optimum de récolte, adaptation des quantités de fertilisants à la biomasse...

Le second résultat important était la sélection d'une nouvelle souche de culture, celle récoltée dans l'anse de Kerazan. Avec la fertilisation mixte, elle présentait des taux de croissance similaires à la souche de culture de France Haliotis. Par ailleurs, elle disposait d'une morphologie plus attrayante pour le marché de l'algue alimentaire. Afin d'en identifier l'espèce, un génotypage de la souche pourrait être envisagé pour mieux appréhender ses besoins en culture.

Pour conclure, France Haliotis est une entreprise forte de sa double casquette de producteur d'omaeux et d'algues, qui lui permet d'assurer le développement de son activité d'algoculture malgré sa faible rentabilité à l'heure actuelle. Toutefois, les résultats obtenus lors de ce stage sont encourageants, et montrent que des freins techniques peuvent être levés pour y remédier. Ces travaux, dont le point de départ était l'autorisation d'un nouvel engrais minéral en AB, suggèrent également que le développement de l'algoculture française passera par l'évolution du cahier des charges AB, que beaucoup de professionnels du secteur estiment encore trop écarté de la réalité (Kholler *et al.*, 2021).

Bibliographie

- Agreste** (2020) Enquête Aquaculture 2018 - Recensement Pisciculture, culture d'algues et de cyanobactéries 2018. <https://agreste.agriculture.gouv.fr/agreste-web/disaron/Chd2003/detail/>
- Agreste** (2022a) Enquête Aquaculture 2021. <https://agreste.agriculture.gouv.fr/agreste-web/disaron/Chd2308/detail/>
- Agreste** (2022b) Hausse de la production de spiruline et baisse de celle d'algues. Primeurs n°7. <https://agreste.agriculture.gouv.fr/agreste-web/disaron/Pri2207/detail/>
- Agreste** (2023) Graph'Agri 2022. Pêche et Aquaculture. 96–98 <https://agreste.agriculture.gouv.fr/agreste-web/disaron/GraFra2022IntegraV/detail/>
- Ale MT, Mikkelsen JD, Meyer AS** (2011) Differential growth response of *Ulva lactuca* to ammonium and nitrate assimilation. *J Appl Phycol* **23**: 345–351. DOI : [10.1007/s10811-010-9546-2](https://doi.org/10.1007/s10811-010-9546-2)
- Alström-Rapaport C, Leskinen E, Pamilo P** (2010) Seasonal variation in the mode of reproduction of *Ulva intestinalis* in a brackish water environment. *Aquatic Botany* **93**: 244–249. DOI : [10.1016/j.aquabot.2010.08.003](https://doi.org/10.1016/j.aquabot.2010.08.003)
- Alsufyani T, Califano G, Deicke M, Grueneberg J, Weiss A, Engelen AH, Kwantes M, Mohr JF, Ulrich JF, Wichard T** (2020) Macroalgal–bacterial interactions: identification and role of thalassin in morphogenesis of the seaweed *Ulva* (Chlorophyta). *Journal of Experimental Botany* **71**: 3340–3349. DOI : <https://doi.org/10.1093/jxb/eraa066>
- Araújo R, Vázquez Calderón F, Sánchez López J, Azevedo IC, Bruhn A, Fluch S** (2021) Current Status of the Algae Production Industry in Europe: An Emerging Sector of the Blue Bioeconomy. *Frontiers in Marine Science*. DOI : <https://doi.org/10.3389/fmars.2020.626389>
- Atkinson MJ, Smith SV** (1983) C:N:P ratios of benthic marine plants. *Limnology and Oceanography* **28**: 568–574. DOI : <https://doi.org/10.4319/lo.1983.28.3.0568>
- Auby I, Manaud F, Maurer D, Trut G** (1994) Étude de la prolifération des algues vertes dans le bassin d'Arcachon. URL : <https://archimer.ifremer.fr/doc/00000/1653/>
- Bast F** (2014) An Illustrated Review on Cultivation and Life History of Agronomically Important Seaplants. *In* Pomin, ed, *Seaweed: Mineral Composition, Nutritional and Antioxidant Benefits and Agricultural Uses*. Nova Publishers, pp 39–70. ISBN : 978-1-63117-571-8
- Berthelot A** (2018) Mise en place d'une culture du genre *Ulva* dans les conditions d'une Agriculture Biologique pour l'alimentation animale et humaine. Rapport de stage M2. Université Caen Normandie, France Haliotis
- Bolton JJ, Robertson-Andersson DV, Shuuluka D, Kandjengo L** (2009) Growing *Ulva* (Chlorophyta) in integrated systems as a commercial crop for abalone feed in South Africa: a SWOT analysis. *J Appl Phycol* **21**: 575–583. DOI : [10.1007/s10811-008-9385-6](https://doi.org/10.1007/s10811-008-9385-6)
- Bolton JJ, Cyrus M, Macey B, Brand M, Joubert M** (2016) Why grow *Ulva*? Its potential role in the future of aquaculture. DOI : [10.1127/pip/2016/0058](https://doi.org/10.1127/pip/2016/0058)
- Bras Q, Ritter L, Fasquel D, Lesueur M, Lucas S, Gouin S** (2014) Étude de la consommation des algues alimentaires en France. Programme IDEALG Phase 1. Étude nationale. URL : <https://hal.science/hal-01209015/>
- Bruhn A, Dahl J, Nielsen HB, Nikolaisen L, Rasmussen MB, Markager S, Olesen B, Arias C, Jensen PD** (2011) Bioenergy potential of *Ulva lactuca*: Biomass yield,

- methane production and combustion. *Bioresource Technology* **102**: 2595–2604. DOI : [10.1016/j.biortech.2010.10.010](https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.10.010)
- Budavari S** (1996) *The Merck index: an encyclopedia of chemicals, drugs, and biologicals*, 12th ed. Merck, Whitehouse Station, NJ. ISBN : 978-0-911910-12-4
- Buschmann AH, Camus C, Infante J, Neori A, Israel Á, Hernández-González MC, Pereda SV, Gomez-Pinchetti JL, Golberg A, Tadmor-Shalev N, et al** (2017) Seaweed production: overview of the global state of exploitation, farming and emerging research activity. *European Journal of Phycology* **52**: 391–406. DOI : [10.1080/09670262.2017.1365175](https://doi.org/10.1080/09670262.2017.1365175)
- Chevassus-au-Louis B, Andral B, Femenias A, Bouvier M** (2012) Bilan des connaissances scientifiques sur les causes de prolifération des algues vertes. Application à la situation en Bretagne et propositions. Ministère de l'écologie, du développement durable, des transports et du logement & Ministère de l'agriculture, de l'alimentation, de la pêche, de la ruralité et de l'aménagement du territoire. URL : <https://www.vie-publique.fr/rapport/32466-bilan-des-connaissances-scientifiques-sur-les-causes-de-proliferation-de>
- Chow LC** (2001) Solubility of Calcium Phosphates. Monographs in Oral Science. NIST 18.
- Commission Européenne** (2022) Directorate-General for Maritime Affairs and Fisheries. The EU Blue Economy Report 2022. Publications Office of the European Union, LU. URL : <https://data.europa.eu/doi/10.2771/793264>
- Comparini C, Lesueur M, Marchand M** (2015) Les algues comme aliments éthiques. *Projet Idealg*. URL : [hal-01823949](https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01823949)
- Copertino M da S, Tormena T, Seeliger U** (2009) Biofiltering efficiency, uptake and assimilation rates of *Ulva clathrata* (Roth) J. Agardh (*Chlorophyceae*) cultivated in shrimp aquaculture waste water. *J Appl Phycol* **21**: 31–45. DOI : [10.1007/s10811-008-9357-x](https://doi.org/10.1007/s10811-008-9357-x)
- CSRPN de Bretagne** (2013) Avis n°2013-10-Espèces-Natura 2000. Liste des espèces d'algues éligibles à l'algoculture dans les schémas des structures conchylicoles. Sur saisine ETAT/DREAL. URL : https://www.bretagne.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/2013_10_Avis_algoculture_valide_cle619b12.pdf
- D'Elia CF, DeBoer JA** (1978) Nutritional Studies of Two Red Algae. II. Kinetics of Ammonium and Nitrate Uptake¹, 2. *Journal of Phycology* **14**: 266–272. DOI : [10.1111/j.1529-8817.1978.tb00297.x](https://doi.org/10.1111/j.1529-8817.1978.tb00297.x)
- DeBusk TA, Blakeslee M, Ryther JH** (1986) Studies on the Outdoor Cultivation of *Ulva lactuca* L. **29**: 381–386. DOI : [10.1515/botm.1986.29.5.381](https://doi.org/10.1515/botm.1986.29.5.381)
- Divya K, Roja N, Padal S** (2015) Influence of seaweed liquid fertilizer of *Ulva lactuca* on the seed germination, growth, productivity of *Abelmoschus esculentus*. *Int J Pharmacol Res* **5**: 344–346.
- Douglas EJ, Haggitt T, Rees T** (2014) Supply- and demand-driven phosphate uptake and tissue phosphorus in temperate seaweed. *Aquatic Biology* **23**: 49–63. DOI : [10.3354/ab00601](https://doi.org/10.3354/ab00601)
- Evans GC** (1972) *The Quantitative Analysis of Plant Growth*. University of California Press. ISBN : 978-0-520-09432-1
- FAO** (2018) The global status of seaweed production, trade and utilization. *Globefish Research Program Volume 124*. 120. URL : <https://www.fao.org/documents/card/ru/c/CA1121EN/>
- FAO, Cai J** (2021 a) Global status of seaweed production, trade and utilization. URL : <https://www.competecaribbean.org/wp-content/uploads/2021/05/Global-status-of-seaweed-production-trade-and-utilization-Junning-Cai-FAO.pdf>

- FAO** (2021b) Global seaweeds and microalgae production, 1950-2019. WAPI factsheet to facilitate evidence-based policy making and sector management in aquaculture. URL : <https://www.fao.org/3/cb4579en/cb4579en.pdf>
- FAO** (2021c) Seaweeds and microalgae: an overview for unlocking their potential in global aquaculture development. DOI : [10.4060/cb5670en](https://doi.org/10.4060/cb5670en)
- Fitton JH** (2005) Fucoidans: healthful saccharides from the sea. *Glycoscience & Nutrition* **6**: 1–6
- Fleurence J** (2016) Chapter 5 - Seaweeds as Food. *In* J Fleurence, I Levine, eds, *Seaweed in Health and Disease Prevention*. Academic Press, San Diego, pp 149–167. DOI : [10.1016/B978-0-12-802772-1.00005-1](https://doi.org/10.1016/B978-0-12-802772-1.00005-1)
- Fleurence J, Morançais M, Dumay J, Decottignies P, Turpin V, Munier M, Garcia-Bueno N, Jaouen P** (2012) What are the prospects for using seaweed in human nutrition and for marine animals raised through aquaculture? *Trends in Food Science & Technology* **27**: 57–61. DOI : [10.1016/j.tifs.2012.03.004](https://doi.org/10.1016/j.tifs.2012.03.004)
- Fort A, Mannion C, Fariñas-Franco JM, Sulpice R** (2020) Green tides select for fast expanding *Ulva* strains. *Science of The Total Environment* **698**: 134337. DOI : [10.1016/j.scitotenv.2019.134337](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134337)
- Fort A, McHale M, Casella K, Potin P, Usadel B, Guiry MD, Sulpice R** (2021) Foliose *Ulva* species Show Considerable Inter-Specific Genetic Diversity, Low Intra-Specific Genetic Variation, and the Rare Occurrence of Inter-Specific Hybrids in the Wild. *Journal of Phycology* **57**: 219–233. DOI : [10.1111/jpy.13079](https://doi.org/10.1111/jpy.13079)
- Gao G, Zhong Z, Zhou X, Xu J** (2016) Changes in morphological plasticity of *Ulva prolifera* under different environmental conditions: A laboratory experiment. *Harmful Algae* **59**: 51–58. DOI : [10.1016/j.hal.2016.09.004](https://doi.org/10.1016/j.hal.2016.09.004)
- García-Casal MN, Pereira AC, Leets I, Ramírez J, Quiroga MF** (2007) High iron content and bioavailability in humans from four species of marine algae. *The Journal of Nutrition* **137**: 2691–2695
- García-Poza S, Leandro A, Cotas C, Cotas J, Marques JC, Pereira L, Gonçalves AMM** (2020) The Evolution Road of Seaweed Aquaculture: Cultivation Technologies and the Industry 4.0. *International Journal of Environmental Research and Public Health* **17**: 6528. DOI : [10.3390/ijerph17186528](https://doi.org/10.3390/ijerph17186528)
- Grosjean C** (2020) Optimisation des conditions d'élevage pour le pré-grossissement des juvéniles d'ormeaux (*Haliotis tuberculata*). Rapport de stage M2. Agrocampus Ouest, France Haliotis
- Hafting JT, Craigie JS, Stengel DB, Loureiro RR, Buschmann AH, Yarish C, Edwards MD, Critchley AT** (2015) Prospects and challenges for production of seaweed bioactives. *Journal of Phycology* **51**: 821–837. DOI : <https://doi.org/10.1111/jpy.12326>
- Hanisak MD, Ryther JH** (1984) Cultivation biology of *Gracilaria tikvahiae* in the United States. *In* CJ Bird, MA Ragan, eds, *Eleventh International Seaweed Symposium*. Springer Netherlands, Dordrecht, pp 295–298. DOI : [10.1007/978-94-009-6560-7_57](https://doi.org/10.1007/978-94-009-6560-7_57)
- Hayden HS, Blomster J, Maggs CA, Silva PC, Stanhope MJ, Waaland JR** (2003) Linnaeus was right all along: *Ulva* and *Enteromorpha* are not distinct genera: *European Journal of Phycology*: Vol 38, No 3. *European Journal of Phycology* **38**: 277–294. DOI : <https://doi.org/10.1080/1364253031000136321>
- Hermans S** (2023) 2023 Seaweed State of the Industry. *Phyconomy*, URL : <https://phyconomy.net/articles/2022-seaweed-review/>
- Howarth RW** (1988) Nutrient limitation of net primary production in marine ecosystems. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics* **19**: 89–110. DOI : <https://doi.org/10.1146/annurev.es.19.110188.000513>

- Jestin--Fagon M** (2022) Suivi de la qualité nutritionnelle de l'algue *Ulva* sp en fonction de la fertilisation autorisée en agriculture biologique, effet sur les paramètres physico-chimiques de l'eau de mer. IUT Brest-Morlaix, Option Agronomie
- Journal officiel de l'Union Européenne** (2007) Règlement (CE) n° 834/2007 du Conseil du 28 juin 2007 relatif à la production biologique et à l'étiquetage des produits biologiques et abrogeant le règlement (CEE) n° 2092/91. URL : <http://data.europa.eu/eli/reg/2007/834/oj/fra>
- Journal officiel de l'Union Européenne** (2018) Règlement (UE) 2018/848 relatif à la production biologique et à l'étiquetage des produits biologiques, et abrogeant le règlement (CE) N°834/2007 du Conseil. URL : <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2018/848/oj>
- Journal officiel de l'Union Européenne** (2021) Règlement d'exécution (UE) 2021/1165 de la Commission du 15 juillet 2021 autorisant l'utilisation de certains produits et substances dans la production biologique et établissant la liste de ces produits et substances. URL : http://data.europa.eu/eli/reg_impl/2021/1165/oj/fra
- Journal officiel de l'Union Européenne** (2023) Règlement d'exécution (UE) 2023/121 de la commission du 17 janvier 2023 modifiant et rectifiant le règlement d'exécution (UE) 2021/1165 autorisant l'utilisation de certains produits et substances dans la production biologique et établissant la liste de ces produits et substances. URL : http://data.europa.eu/eli/reg_impl/2023/121/oj/eng
- Kalita TL, Tytlianov EA** (2003) Effect of Temperature and Illumination on Growth and Reproduction of the Green Alga *Ulva fenestrata*. Russian Journal of Marine Biology **29**: 316–322. DOI : <https://doi.org/10.1023/A:1026361627982>
- Kholler D, Lavarde F, Chaigneau G** (2022) Présentation et développement de l'algoculture en France. Conseil général de l'alimentation, de l'agriculture et des espaces ruraux. URL : <https://www.vie-publique.fr/rapport/286950-presentation-et-developpement-de-l-algoculture-en-france>
- Kidgell JT, Magnusson M, de Nys R, Glasson CRK** (2019) Ulvan: A systematic review of extraction, composition and function. Algal Research **39**: 101422. DOI : [10.1016/j.algal.2019.101422](https://doi.org/10.1016/j.algal.2019.101422)
- Lahaye M, Gomez-Pinchetti J-L, del Rio MJ, Garcia-Reina G** (1995) Natural decoloration, composition and increase in dietary fibre content of an edible marine algae, *Ulva rigida* (Chlorophyta), grown under different nitrogen conditions. Journal of the Science of Food and Agriculture **68**: 99–104. DOI : [10.1002/jsfa.2740680116](https://doi.org/10.1002/jsfa.2740680116)
- Lahaye M, Robic A** (2007) Structure and Functional Properties of Ulvan, a Polysaccharide from Green Seaweeds. Biomacromolecules **8**: 1765–1774. DOI : <https://doi.org/10.1021/bm061185q>
- Langford A, Zhang J, Waldron S, Julianto B, Siradjuddin I, Neish I, Nuryartono N** (2022) Price analysis of the Indonesian carrageenan seaweed industry. Aquaculture **550**: 737828. DOI : [10.1016/j.aquaculture.2021.737828](https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2021.737828)
- Lawton RJ, Sutherland JE, Glasson CRK, Magnusson ME** (2021) Selection of temperate *Ulva* species and cultivars for land-based cultivation and biomass applications. Algal Research **56**: 102320. DOI : [10.1016/j.algal.2021.102320](https://doi.org/10.1016/j.algal.2021.102320)
- Le B, Shin J-A, Kang M-G, Sun S, Yang SH, Chung G** (2018) Enhanced growth rate and ulvan yield of *Ulva pertusa* using light-emitting diodes (LEDs). Aquacult Int **26**: 937–946. DOI : [10.1007/s10499-018-0260-4](https://doi.org/10.1007/s10499-018-0260-4)
- Lee J-B, Hayashi K, Hayashi T, Sankawa U, Maeda M** (1999) Antiviral Activities against HSV-1, HCMV, and HIV-1 of Rhamnan Sulfate from *Monostroma latissimum*. Planta Med **65**: 439–441. DOI : [10.1055/s-2006-960804](https://doi.org/10.1055/s-2006-960804)

- Lersten NR, Voth PD** (1960) Experimental Control of Zoid Discharge and Rhizoid Formation in the Green Alga *Enteromorpha*. *Botanical Gazette* **122**: 33–45. DOI : [10.1086/336083](https://doi.org/10.1086/336083)
- Lesueur M, Comparini C** (2015) La filière des algues dans le monde, en Europe, en France. Synthèse de résultats. Cellule études et transfert, AGRO CAMPUS OUEST. 4 p. URL : <https://hal.science/hal-01343425/document#:~:text=Projet%20IDEALG,%27Europe%20puis%20d%27Océanie.>
- Louis J, Ballu S, Rossi N, Lasbleiz M, Perrot T, Daniel C, Cellier L, Hénaff F, Richier S** (2023) Multi-year renewal of green tides: 18 years of algal mat monitoring (2003–2020) on French coastline (Brittany region). *Marine Pollution Bulletin* **193**: 115173. DOI : [10.1016/j.marpolbul.2023.115173](https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2023.115173)
- Lüning K, Kadel P, Shaojun P** (2008) Control of reproduction rhythmicity by environmental and endogenous signals in *Ulva pseudocurvata* (*Chlorophyta*). *Journal of Phycology* **44**: 866–873. DOI : <https://doi.org/10.1111/j.1529-8817.2008.00535.x>
- MacArtain P, Gill CIR, Brooks M, Campbell R, Roland I** (2007) Nutritional Value of Edible Seaweeds. *Nutrition Reviews* **65**: 535–543. DOI : <https://doi.org/10.1111/j.1753-4887.2007.tb00278.x>
- Mantri VA, Singh RP, Bijo AJ, Kumari P, Reddy CRK, Jha B** (2011) Differential response of varying salinity and temperature on zoospore induction, regeneration and daily growth rate in *Ulva fasciata* (*Chlorophyta*, Ulvales). *J Appl Phycol* **23**: 243–250. DOI : [10.1007/s10811-010-9544-4](https://doi.org/10.1007/s10811-010-9544-4)
- Marchand M, Lesueur M, Gouin S** (2015) Les algues vues au travers de la presse Projet Idealg.
- Mohsen AF, Khaleata AF, Hashem MA, Metwalli A** (1974) Effect of Different Nitrogen Sources on Growth, Reproduction, Amino Acid, Fat and Sugar Contents in *Ulva fasciata* Delile (Part III). **17**: 218–222. DOI : [10.1515/botm.1974.17.4.218](https://doi.org/10.1515/botm.1974.17.4.218)
- Mouritsen OG, Rhatigan P, Pérez-Lloréns JL** (2019) The rise of seaweed gastronomy: phycogastronomy. *Botanica Marina* **62**: 195–209. DOI : <https://doi.org/10.1515/bot-2018-0041>
- Neori A, Krom MD, Ellner SP, Boyd CE, Popper D, Rabinovitch R, Davison PJ, Dvir O, Zuber D, Ucko M, et al** (1996) Seaweed biofilters as regulators of water quality in integrated fish-seaweed culture units. *Aquaculture* **141**: 183–199. DOI : [10.1016/0044-8486\(95\)01223-0](https://doi.org/10.1016/0044-8486(95)01223-0)
- Neveux N, Yuen AKL, Jazrawi C, Magnusson M, Haynes BS, Masters AF, Montoya A, Paul NA, Maschmeyer T, de Nys R** (2014) Biocrude yield and productivity from the hydrothermal liquefaction of marine and freshwater green macroalgae. *Bioresource Technology* **155**: 334–341. DOI : [10.1016/j.biortech.2013.12.083](https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.12.083)
- Nilsen G, Nordby Ø** (1975) A sporulation-inhibiting substance from vegetative thalli of the green alga *Ulva mutabilis*, Føyn. *Planta* **125**: 127–139. DOI : [10.1007/BF00388699](https://doi.org/10.1007/BF00388699)
- Olsen Y** (2011) Resources for fish feed in future mariculture. *Aquaculture Environment Interactions*. 1, 187–200 p. DOI : <https://doi.org/10.3354/aei00019>
- Pérez-Lloréns JL, Mouritsen OG, Rhatigan P** (2020) Seaweeds in mythology, folklore, poetry, and life. *J Appl Phycol* **32**: 3157–3182. DOI : <https://doi.org/10.1007/s10811-020-02133-0>
- Porse H, Rudolph B** (2017) The seaweed hydrocolloid industry: 2016 updates, requirements, and outlook. *Journal of Applied Phycology*. DOI : [10.1007/s10811-017-1144-0](https://doi.org/10.1007/s10811-017-1144-0)
- Robertson-Andersson D** (2003) The cultivation of *Ulva lactuca* (*Chlorophyta*) in an integrated aquaculture system, for the production of abalone feed and the

- bioremediation of aquaculture effluent. Master Thesis. University of Cape Town. URL : <https://open.uct.ac.za/handle/11427/6175>
- Robertson-Andersson DV, Leitao D, Bolton JJ, Anderson RJ, Njobeni A, Ruck K** (2006) Can Kelp Extract (KELPAK®) be Useful in Seaweed Mariculture? *J Appl Phycol* **18**: 315–321. DOI : [10.1007/s10811-006-9030-1](https://doi.org/10.1007/s10811-006-9030-1)
- Ryther JH, Corwin N, DeBusk TA, Williams LD** (1981) Nitrogen uptake and storage by the red alga *Gracilaria tikvahiae* (McLachlan, 1979). *Aquaculture* **26**: 107–115. DOI : [10.1016/0044-8486\(81\)90114-9](https://doi.org/10.1016/0044-8486(81)90114-9)
- Seböck S, Herppich WB, Hanelt D** (2019) Outdoor cultivation of *Ulva lactuca* in a recently developed ring-shaped photobioreactor: effects of elevated CO₂ concentration on growth and photosynthetic performance. *Botanica Marina* **62**: 179–190. DOI : [10.1515/bot-2018-0016](https://doi.org/10.1515/bot-2018-0016)
- Shpigel M, Ragg N, Lupatsch I, Neori A** (1999) Protein content determines the nutritional value of the seaweed *Ulva lactuca* L for the abalone *Haliotis tuberculata* L. and *H. Discus hannai* Ino. *Journal of Shellfish Research* **18**: 227–233.
- Silva M, Vieira L, Almeida AP, Kijjoa A** (2013) The Marine Macroalgae of the Genus *Ulva*: Chemistry, Biological Activities and Potential Applications. DOI : [10.4172/2332-2632.1000101](https://doi.org/10.4172/2332-2632.1000101)
- Simon C, McHale M, Sulpice R** (2022) Applications of *Ulva* Biomass and Strategies to Improve Its Yield and Composition: A Perspective for *Ulva* Aquaculture. *Biology* **11**: 1593. DOI : [10.3390/biology11111593](https://doi.org/10.3390/biology11111593)
- Smith GM** (1947) On the Reproduction of Some Pacific Coast Species of *Ulva* on JSTOR. *American Journal of Botany* **34**: 80–87. DOI : <https://doi.org/10.2307/2437232>
- Smith VH, Tilman GD, Nekola JC** (1999) Eutrophication: impacts of excess nutrient inputs on freshwater, marine, and terrestrial ecosystems - ScienceDirect. *Environmental Pollution* **100**: 179–196. DOI : [https://doi.org/10.1016/S0269-7491\(99\)00091-3](https://doi.org/10.1016/S0269-7491(99)00091-3)
- Stemer RW, Elser JJ** (2002) *Ecological Stoichiometry: The Biology of Elements from Molecules to the Biosphere*. Princeton University Press.
- Sun HH, Mao WJ, Fang F, Li HY** (2007) Polysaccharides from marine green seaweed *Ulva* species and their characteristics. *Agro Food Industry Hi-Tech* **18**: 28–29.
- Suthar P, Gajaria TK, Reddy CRK** (2019) Production of quality seaweed biomass through nutrient optimization for the sustainable land-based cultivation. *Algal Research* **42**. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.algal.2019.101583>
- Sybill S, Taillens M, Laurans M, Frangouides K** (2021) Histoires d'Algues en Finistère. URL : <https://archimer.ifremer.fr/doc/00740/85159/>. Consulté le 20/08/2023
- Turan G, Tekogul H** (2014) The Turkish Mezzes Formulated with Protein-Rich Green Sea Vegetable (Chlorophyta), *Ulva rigida*, Cultured in Onshore Tank System. *Journal of Aquatic Food Product Technology* **23**: 447–452. DOI : [10.1080/10498850.2012.723307](https://doi.org/10.1080/10498850.2012.723307)
- Van der Wal H, Sperber BLHM, Houweling-Tan B, Bakker RRC, Brandenburg W, López-Contreras AM** (2013) Production of acetone, butanol, and ethanol from biomass of the green seaweed *Ulva lactuca*. *Bioresource Technology* **128**: 431–437. DOI : [10.1016/j.biortech.2012.10.094](https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.10.094)
- Wang H, Liu C-F, Qin C-X, Cao S-Q, Ding J** (2007) Using a macroalgae *Ulva pertusa* biofilter in a recirculating system for production of juvenile sea cucumber *Apostichopus japonicus*. *Aquacultural Engineering* **36**: 217–224. DOI : [10.1016/j.aquaeng.2007.01.008](https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2007.01.008)

Wichard T, Charrier B, Mineur F, Bothwell JH, Clerck OD, Coates JC (2015) The green seaweed *Ulva*: a model system to study morphogenesis. *Frontiers in Plant Science* 6. ISSN : 1664-462X

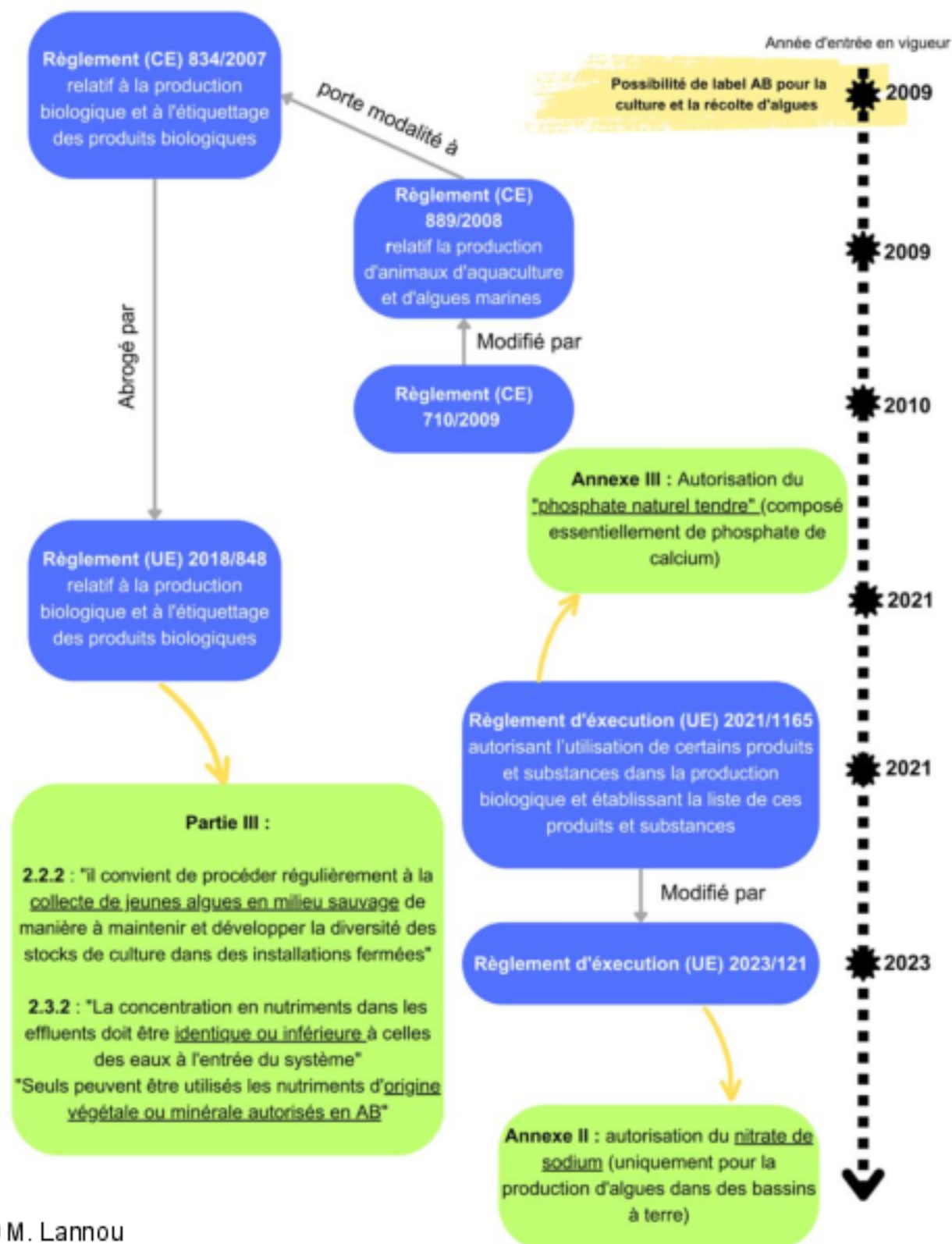
Zava TT, Zava DT (2011) Assessment of Japanese iodine intake based on seaweed consumption in Japan: A literature-based analysis. *Thyroid Res* 4: 14. DOI : [10.1186/1756-6614-4-14](https://doi.org/10.1186/1756-6614-4-14)

Zertuche-González (2021) Seasonal and interannual production of sea lettuce (*Ulva sp.*) in outdoor cultures based on commercial size ponds. *Journal of the World Aquaculture Society* 52: 1047–1058. DOI : <https://doi.org/10.1111/jwas.12773>

Sitographie

- CEVA** (2023) De nouvelles matières fertilisantes pour la production d'algues Bio à terre. CEVA Blog, <https://blog.ceva-algues.com/de-nouvelles-matieres-fertilisantes-pour-la-production-dalgues-bio-a-terre/#:~:text=Sur%20les%20recommandations%20de%20l,terre%2C%20dans%20des%20installations%20fermées>. Consulté le 27/03/2023
- CEVA** Description du phénomène de marées d'algues vertes. CEVA, <https://www.ceva-algues.com/document/description-du-phenomene-blooms-algues-vertes-et-differents-types-de-marees-vertes/>. Consulté le 4/08/2023
- CEVA** (2009) Mécanismes et causes des marées vertes à ulves dérivantes. CEVA, <https://www.ceva-algues.com/document/mecanismes-et-causes-des-marees-vertes-a-ulves-derivantes/>. Consulté le 4/08/2023
- Chambre syndicale algues et végétaux marins** (2022) Certification biologique. CSAVM, <https://www.chambre-syndicale-algues.org/certification-biologique/>. Consulté le 4/08/2023
- CRPMEM Bretagne** L'algoculture marine en Bretagne. Bretagne Pêche, <https://www.bretagne-peches.org/la-peche-bretonne/recolte-dalgues-et-algoculture-en-bretagne/lalgoculture-marine-en-bretagne/>. Consulté le 7/08/2023
- CRPMEM Bretagne** Récolte d'algues et algoculture en Bretagne. Bretagne Pêche, <https://www.bretagne-peches.org/la-peche-bretonne/recolte-dalgues-et-algoculture-en-bretagne/>. Consulté le 7/08/2023
- Muséum National d'Histoire Naturelle** *Ulva lactuca* L., 1753 - Laitue de mer. Inventaire National du Patrimoine Naturel, https://inpn.mnhn.fr/espece/cd_nom/73383. Consulté le 12/04/2023
- Observatoire de l'Environnement en Bretagne** (2022) Surfaces couvertes par les ulves cumulées lors des 3 inventaires de surveillance de la saison 2021. <https://bretagne-environnement.fr/dataset/les-algues-vertes-en-bretagne/resource/d942d441-3b54-40e7-9e7b-c2b9bbd5bdc8>. Consulté le 15/07/2023

Annexe I – Synthèse des règlements encadrant la production biologique des algues dans l'Union Européenne



© M. Lannou

Les encadrés verts correspondent aux éléments réglementaires pertinents concernant le sujet d'étude (fertilisation et renouvellement des souches).

Annexe II – Calcul des coûts de production des bassins de culture

Données de départ

- Les frais de fonctionnement quotidiens d'un bassin de nurserie en termes énergétique (*ie* bullage et pompage d'eau) s'élèvent à 1,30€ (Berthelot A., com. pers.). La plateforme dispose de 40 bassins de nurserie, qu'on considère tous en activité.
- Il a été estimé que la charge de travail liée à la plateforme des 40 bassins de nurserie (récolte, entretien, maintenance), représente un ETP rémunéré au Smic, soit 11,52€ brut de l'heure en 2023. Les charges patronales ne sont pas prises en compte.
- Les frais liés à la fertilisation des bassins avant ces travaux s'élevaient à 3,11€ hebdomadaires par bassin, à raison d'un litre de Geogreen Plus par bassin chaque semaine.
- La nouvelle formule de fertilisation retenue est la suivante : 13 cl de Geogreen Start + 100g de NaNO₃. Le coût hebdomadaire par bassin s'élève alors à 0,97€.
- Les amortissements ne sont pas pris en compte

Le calcul du **coût de production (CP)** hebdomadaire pour la totalité des bassins de nurserie se fait de la manière suivante :

$$CP = \text{Main d'oeuvre} + \text{frais énergétiques} + \text{frais de fertilisation}$$

$$CP = 11,52 * 35 + 1,3 * 40 + \text{coût fertilisation} * 40$$

Résultats :

Fertilisation	Coût de production hebdomadaire (€)	
	Pour l'ensemble de la plateforme	Par bassin
F. organique (1L Geogreen Plus)	528,62	13,21
F. mixte (13 cl Geogreen Start + 100g NaNO ₃)	443,02	11,08

Annexe III – Analyse colorimétrique des thalles d'*Ulva* spp

Protocole

Pour les 3 premières expériences, 10 individus par bassin étaient prélevés puis photographiés. Pour ce faire, un système de photographie a été mis en place dans une pièce sans fenêtre, avec comme seules sources de lumières 2 lampes placées de part et d'autre de l'appareil. Les algues étaient ensuite étalées sur un plateau blanc avec un fond d'eau, et un appareil photo était placé toujours au même endroit grâce à un système de tréteaux.



Exemple de photographie réalisée

Le traitement d'image a été réalisé sur le logiciel ImageJ. Pour chaque individu, un carré de 900 pixels était tracé manuellement et analysé afin d'obtenir les valeurs Rouge-Vert-Bleu (RVB) moyennes dans ce carré.

Résultats

Pour les 3 expériences, l'analyse statistique (ANOVA) a montré un effet significatif de l'ajout de fertilisant minéral (nitrate de sodium seul ou nitrate de sodium + phosphate de calcium) sur le code RVB des sections d'algues photographiées. En générant les codes RVB moyens des différents traitements, il a été constaté que les algues recevant une fertilisation minérale étaient en général plus foncées que les contrôles n'ayant pas reçu de fertilisation. Étant donné le lien

entre couleur du thalle et teneur en protéines des tissus (Robertson-Andersson, 2003), ces résultats suggèrent que la teneur en protéines des tissus a été enrichie via la fertilisation. Ces résultats préliminaires soulignent la pertinence de quantifier les taux de protéines en fonction des pratiques de fertilisation.



Diplôme : Ingénieur
Spécialité : Agronome
Spécialisation / option : Sciences Halieutiques et Aquacoles / AQUA
Enseignant référent : LE BRIS Hervé

Auteur(s) : LANNOU Morgane

Organisme d'accueil : SCEA France Haliotis

Adresse : 70 Aod Kerazan

Date de naissance* : 21/05/2000

Lilia

Nb pages : 35

Annexe(s) : 3

29880 Plouguerneau

Année de soutenance : 2023

Maître de stages : COLIN Guillaume,
BERTHELOT Alexandre

Titre français : **Optimisation des pratiques de fertilisation d'*Ulva* spp dans le cadre d'une production labellisée « Agriculture Biologique »**

Titre anglais : Optimisation of fertilization practices for a certified "Organic Farming" *Ulva* spp production

Résumé : Pour la production d'*Ulva* spp dans des bassins à terre, la fertilisation est un paramètre primordial, avec un impact important sur la croissance des algues. Sous le label « Agriculture Biologique », l'utilisation de fertilisants est encadrée, et seuls les fertilisants organiques (d'origine 100% végétale) et minéraux sont autorisés. Actuellement, l'entreprise n'utilise que des fertilisants organiques coûteux. La potentialité d'un basculement vers une fertilisation minérale (nitrate de sodium et phosphate de calcium) et vers une fertilisation mixte (fertilisant organique complété par du nitrate de sodium minéral) ont été étudiées. De plus, six souches d'*Ulva* spp ont été récoltées dans le milieu sauvage et mises en culture avec la fertilisation mixte conçue, leur croissance a été comparée à la souche cultivée par l'entreprise. Les taux de croissance spécifiques (SGR) avec une fertilisation minérale étaient faibles (5-10 %·jour⁻¹) en comparaison à la fertilisation mixte (> 20%·jour⁻¹). Cette dernière correspondait à une concentration en phosphate de 42,3 µmol.L⁻¹ apportée par un engrais organique et un ajout de nitrate minéral de 334 µmol.L⁻¹. Avec cette formule, aucune souche sauvage n'a dépassé les SGR de la souche déjà cultivée, mais plusieurs ont obtenu des résultats similaires. La fertilisation mixte est la formulation qui permet de maintenir les SGR obtenus avec l'ancienne fertilisation, tout en divisant les frais par trois. De plus, une souche provenant de l'anse de Kerazan a été sélectionnée pour sa croissance correcte et sa morphologie plus adaptée au marché de l'algue alimentaire.

Abstract : Fertilisation is an essential culture parameter of *Ulva* spp production in land-based ponds, with a major impact on the seaweeds. Under the "Organic Agriculture" label, the use of fertilisers is regulated, and only organic fertilisers of 100% plant origin and mineral fertilisers are authorised. Currently, France Haliotis only uses organic fertilisers, which are costly. The possibility of switching to a mineral fertilisation (sodium nitrate and calcium phosphate) and a mixed fertilisation (organic fertiliser supplemented by mineral sodium nitrate) was studied. In addition, six strains of *Ulva* sp were harvested from the wild and grown with the mixed fertilisation formula developed, in order to compare them with the strain grown by the company. Specific growth rates (SGR) with mineral fertilisation were low (5-10%.day⁻¹) compared with mixed fertilisation (> 20 %.day⁻¹). This fertilisation corresponds to an inorganic phosphate concentration of 42.3 µmol.L⁻¹ provided by an organic fertiliser) and an addition of mineral nitrate of 334 µmol.L⁻¹. With this formula, no wild strain exceeded the SGR of the strain already grown, but several obtained similar results. The mixed fertilization is the formula which maintains the SGR obtained with the old fertilization while reducing costs by a factor of three. In addition, a strain harvested from the Kerazan cove has been selected for its satisfactory growth and its morphology, which is better suited to the food seaweed market.

Mots-clés : *Ulva* spp ; fertilisation ; Agriculture Biologique ; culture en bassin ; production ; algoculture ; sélection de souche

Key Words : *Ulva* spp; fertilization; Organic Farming; in-land culture; production; seaweed farming; strain selection