



PROTEGE



# Développement de la culture de macro-algues en soutien des filières aquacoles en Polynésie française

## Rapport final

Direction des ressources  
marines de Polynésie française

Février 2024



DIRECTION DES  
RESSOURCES MARINES  
*PU FA'AHOTU MOANA*

Le projet régional océanien des territoires pour la gestion durable des écosystèmes, PROTEGE, est un projet intégré qui vise à réduire la vulnérabilité des écosystèmes face aux impacts du changement climatique en accroissant les capacités d'adaptation et la résilience. Il cible des activités de gestion, de conservation et d'utilisation durables de la diversité biologique et de ses éléments en y associant la ressource en eau. Il est financé par le 11<sup>ème</sup> Fonds européen de développement (FED) au bénéfice des territoires de la Nouvelle-Calédonie, de la Polynésie française, de Pitcairn et de Wallis et Futuna.

L'objectif général du projet est de construire un développement durable et résilient des économies des pays et territoires d'Outre-mer (PTOM) face au changement climatique en s'appuyant sur la biodiversité et les ressources naturelles renouvelables.

Le premier objectif spécifique vise à renforcer la durabilité, l'adaptation au changement climatique et l'autonomie des principales filières du secteur primaire. Il est décliné en deux thèmes :

- Thème 1 : la transition agro-écologique est opérée pour une agriculture, notamment biologique, adaptée au changement climatique et respectueuse de la biodiversité ; les ressources forestières sont gérées de manière intégrée et durable.
- Thème 2 : les ressources récifo-lagonaires et l'aquaculture sont gérées de manière durable, intégrée et adaptée aux économies insulaires et au changement climatique.

Le second objectif spécifique veut renforcer la sécurité des services écosystémiques en préservant la ressource en eau et la biodiversité. Il se décline également en 2 thèmes :

- Thème 3 : l'eau est gérée de manière intégrée et adaptée au changement climatique
- Thème 4 : les espèces exotiques envahissantes sont gérées pour renforcer la protection, la résilience et la restauration des services écosystémiques et de la biodiversité terrestre.

La gestion du projet a été confiée à la Communauté du Pacifique (CPS) pour les thèmes 1, 2 et 3 et au programme régional océanien pour l'environnement (PROE) pour le thème 4, par le biais d'une convention de délégation signée le 26 octobre 2018 entre l'Union européenne, la

CPS et le PROE. La mise en œuvre du projet est prévue sur 4 ans.

Ce rapport est cité comme suit :

Direction des ressources marines de Polynésie française, 2024, Développement de la culture de macro-algues : Rapport final

Bilan d'activités, Polynésie française, 37 pages (sans annexes)

*Cette publication a été produite avec le soutien financier de l'Union européenne. Son contenu relève de la seule responsabilité de Direction des ressources marines de Polynésie française et ne reflète pas nécessairement les opinions de l'Union européenne.*

## Table des matières

### Table des matières

<b>1</b>	<b>Introduction .....</b>	<b>7</b>
1.1	Contexte .....	7
1.2	Objectifs.....	8
<b>2</b>	<b>Bilan et Perspectives: <i>Ulva</i> et <i>Acanthophora</i>.....</b>	<b>8</b>
2.1	<i>Ulva</i> .....	8
2.2	<i>Acanthophora</i> .....	9
<b>3</b>	<b>Bilan : <i>Gracilaria</i>.....</b>	<b>10</b>
3.1	Récolte sauvage.....	1
3.2	Premiers essais de culture.....	1
3.2.1	Essais préliminaires .....	1
3.2.2	Essais en bacs .....	1
3.2.3	Essais lagunaires .....	2
3.2.4	Conclusions des premiers essais, problématiques émergentes.....	2
3.3	Développement de l'itinéraire de culture .....	3
3.3.1	Contraintes méthodologiques.....	3
3.3.2	Culture lagunaire .....	5
3.3.3	Epiphytisme .....	9
3.3.4	Ecloserie sexuée et végétative, saisonnalité .....	10
3.3.5	Nutrition azotée.....	12
3.3.6	Ergonomie, amélioration des procédés .....	14
3.3.7	Culture en bacs .....	16
3.3.8	Coculture et bassin-terre.....	16
3.4	Modélisation économique.....	16
3.4.1	Un outil de R&D.....	16
3.4.2	Un outil évolutif destiné à l'accompagnement des futurs algoculteurs .....	17
3.5	Aval .....	18
3.5.1	Réglementation .....	18
3.5.2	Conditionnement en frais, durée de vie organoleptique et microbiologique .....	20
3.5.3	Analyses nutritionnelles et métaux lourds.....	21
3.5.4	Communication .....	22
3.6	Taxonomie et invasivité.....	23

3.7	Autres espèces cultivées .....	24
<b>4</b>	<b>Perspectives <i>Gracilaria</i> .....</b>	<b>25</b>
4.1	Culture lagunaire .....	25
4.1.1	Structure de R&D flottante autonome.....	25
4.1.2	R&D.....	25
4.1.3	Transfert .....	26
4.2	Culture en bac et bioremédiation .....	27
4.2.1	Optimiser le protocole de culture en bacs .....	27
4.2.2	Bioremédiation .....	28
4.3	Aval .....	28
4.4	Diversification .....	28
<b>5</b>	<b>Bilan financier.....</b>	<b>1</b>
<b>6</b>	<b>Annexes Photos .....</b>	<b>1</b>

## Résumé exécutif

Titre de l'action	Développement de la culture de macro-algues en soutien des filières aquacoles en Polynésie française (Action 5B.1.5 du plan de mise en œuvre PROTEGE)
Auteurs	Direction des ressources marines de Polynésie française (Corentin SALVAN)
Collaborateurs	
Editeurs	
Année d'édition du rapport	2024

Objectif de l'action	<p>L'objectif initial de l'action était de :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Offrir aux consommateurs un nouveau produit (consommation humaine)</li> <li>- Développer de techniques nouvelles en aquaculture (en co-culture puis éventuellement en Aquaculture Multitrophique Intégrée ou AMTI)</li> <li>- Soutenir d'autres filières aquacoles (prophylaxie sur les élevages de platax, complément alimentaire pour les crevettes en cage ou les marava)</li> </ul>
Contexte	<p>Parallèlement à une stratégie de diversification piscicole, la DRM a souhaité mettre en place un projet de culture de macroalgues avec comme objectif de les mettre en valeur localement : soit en les utilisant en tant que bioremédiation pour le traitement d'eaux de productions aquacoles, soit en les intégrant dans l'alimentation aquacole selon les espèces et les stades de production, soit sur le marché de la consommation humaine.</p> <p>En Polynésie française, les algues font partie de l'alimentation ancestrale, notamment aux Marquises. Aujourd'hui, l'algue la plus consommée est le Rimu Vine (<i>Caulerpa chmenitzia</i>) qui est exporté des Australes vers Tahiti. La Polynésie importe également des algues, principalement du Nori pour les sushis (<i>Porphyra</i> sp.) et du Wakamé assaisonné et surgelé (<i>Undaria pinnatifida</i>). Etant donné le potentiel de croissance de la filière, la DRM souhaite fournir aux communautés locales des protocoles de culture lagonaire et de culture en bacs capables d'alimenter le marché tahitien avec un produit de qualité tout en diminuant la pression sur la ressource sauvage cueillie. En 2023, les algues des Australes sont toujours à 100% issues de cueillette.</p> <p>D'autre part, la DRM a également souhaité étudier le potentiel des macroalgues à biore médier les effluents de la future <i>Zone Biomarine de Faratea</i> (Aruhotu – Biomarine), un parc aquacole sur lequel il est prévu une quinzaine d'hectares d'élevage intensif de crevettes.</p>
Méthodologie	<p>Afin d'atteindre cet objectif, la méthode reposait sur :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Essais de culture sur 3 espèces de macroalgues pré-identifiées (<i>Caulerpa</i>, <i>Gracilaria</i>, <i>Ulva</i>).</li> <li>- Estimation des potentiels en culture (croissance, productivité, qualité, fiabilité).</li> <li>- Mise en place des protocoles de culture propres à chaque espèce.</li> </ul>

	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Réalisation des essais d'applications par rapport aux objectifs présélectionnés (bioremédiation, alimentation humaine, AMTI).</li> <li>- Production de guides de référence : rédiger des itinéraires techniques d'élevage en cage et en éclosion.</li> </ul>
<p>Résultats et conclusions</p>	<p>Pour <i>Ulva</i>, la culture est maîtrisée en bacs et permet d'envisager des systèmes de bioremédiation opérationnels.</p> <p>Pour <i>Acanthophora</i>, les différents essais réalisés en bac et sur cordages n'ont pas donné de résultats satisfaisants.</p> <p>Pour <i>Gracilaria</i>, la culture en bac et en lagon est maîtrisée, notamment grâce à la détermination de méthodes prophylactiques pour réduire l'épiphytisme. L'itinéraire cultural développé lors des différents essais autorise une exploitation commerciale rentable, transférable à court terme. Les travaux sur l'aval de la filière de production ont permis de valider une méthode de conditionnement, de confirmer la salubrité du produit, enfin de définir une stratégie de communication.</p>
<p>Limites de l'action</p>	<p>Les avancés sont importantes mais il reste à faire. Les travaux réalisés durant PROTEGE sur <i>Gracilaria</i> devront être poursuivis pour :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Continuer à optimiser les itinéraires de cultures,</li> <li>- Confirmer la viabilité économique par des essais pilotes multisites de longue durée,</li> <li>- Transférer la technique aux privés,</li> <li>- Appuyer en communication la mise sur le marché de l'algue,</li> <li>- Évaluer son intérêt en bioremédiation.</li> </ul>

# 1 Introduction

## 1.1 Contexte

Au niveau mondial, l'exploitation des algues marines connaît un essor inédit dû à différents facteurs :

- L'engouement pour la nourriture « healthy » et l'avènement d'une cuisine fusion globalisée, ouvre le marché des algues à l'occident,
- Les nombreuses possibilités offertes par les algues dans la formulation de biomatériaux pour une industrie durable,
- La découverte de molécules algales d'intérêts cosmétiques et pharmaceutiques,
- La possibilité offerte par les cultures d'algues de développer des ressources primaires décarbonées, voire dans certaines conditions de séquestrer du carbone (via le coulage d'une partie de la biomasse algale cultivée dans les abysses, une solution très débattue aujourd'hui),
- La nécessité de nourrir une population littorale mondiale croissante, et de lui assurer des revenus complémentaires dans un contexte de raréfaction des pêcheries littorales et de changement climatique.

En Polynésie française, les algues font partie de l'alimentation de façon ancestrale, notamment aux Marquises (Henua Enata), où pas moins de six espèces sont toujours cueillies sur le littoral et consommées fraîches<sup>1</sup>. Aux Australes, l'algue la plus consommée est le Rimu Vine (*Caulerpa chmenitzia*) qui est exporté vers Tahiti où il s'échange aux alentours de 4000 f cfp/kg.

La Polynésie importe également des algues, principalement du Nori pour les sushis (*Porphyra* sp.) et du Wakamé assaisonné et surgelé (*Undaria pinnatifida*). Une étude de marché de 2014, conduite par des élèves de l'Université de Polynésie Française (UPF), n'a pas permis de donner une estimation du tonnage consommé annuellement par les polynésiens. La tendance semble à la hausse à Tahiti, particulièrement concernant le Wakamé, qui est devenu commun dans la grande distribution, et dont la présence est de plus en plus régulière dans les magasins et épiceries de proximité populaires.

Le rapport des polynésiens aux macroalgues est donc sous l'influence de dynamiques mondiales récentes ainsi que de pratiques alimentaires ancestrales.

En 2014, la *Direction des Ressources Marines* (DRM) a travaillé en partenariat avec l'UPF sur la culture du Rimu Vine aux Australes. L'objectif de l'étude était de fournir aux communautés des protocoles de culture lagonaire et de culture en bacs capables d'alimenter le marché tahitien avec un produit de qualité tout en diminuant la pression sur la ressource sauvage cueillie. En 2023, les algues des Australes sont toujours à 100% issues de cueillette.

En 2018, la volonté de la DRM de développer des systèmes de culture de macroalgues dans le cadre du programme PROTEGE est en partie dictée par la nécessité de bioremédier les effluents de la future *Zone Biomarine de Faratea* (Aruhotu – Biomarine), un parc aquacole sur lequel il est prévu une quinzaine d'hectares d'élevage intensif de crevettes.

---

<sup>1</sup> La consommation des algues en Polynésie française : premiers résultats d'une enquête

Le souhait de la DRM de développer des cultures d'algues fait également suite au programme INTEGRE, au cours duquel la DRM avait travaillé au développement de l'élevage d'une espèce de poisson herbivore : le Marava (*Siganus argenteus*).

## 1.2 Objectifs

Dans ce contexte, l'objectif de la DRM avec PROTEGE en 2019 était de développer les méthodes de culture de trois espèces d'algues à définir, à des fins de :

- Bioremédiation,
- Prophylaxie en élevage aquacole,
- Alimentation animale et/ou humaine.

Les espèces de macroalgues retenues pour ce projet ont été déterminées au cours d'un atelier participatif incluant des agents de la DRM ainsi que deux experts en macroalgues (Nicolas Neveux et Mayalen Zubia). Les espèces sélectionnées au cours de cet atelier sont :

- *Ulva lactuca*,
- *Acanthophora spicifera*,
- *Gracilaria parvispora*.

## 2 Bilan et Perspectives: *Ulva* et *Acanthophora*

### 2.1 *Ulva*

Après plusieurs prélèvements et essais infructueux en petits volumes en septembre et octobre 2020, un système de goutte-à-goutte a été mis en place fin 2020 pour compléter les cultures en nutriments (N/P). Le système d'enrichissement, composé de deux bacs de stockage de 2m<sup>3</sup> surélevés et couverts de bâches opacifiantes pour éviter le développement d'algues opportunistes, alimente la zone de culture grâce à un réseau de distribution en tuyau d'irrigation opaque. Des vannes permettent de doser précisément l'enrichissement en nutriments dans chaque bac de culture.

Enrichies en continu, les ulves étaient cultivées en bullage libre dans des bacs cylindroconiques ou rectangulaires (type « raceway ») de 200 à 400l.

La principale difficulté rencontrée pour la culture végétative des ulves était l'apparition de phénomènes de sporulation spontanés, au cours desquels les algues se fragmentent et blanchissent. Ces phénomènes, qui requerraient le redémarrage des cultures avec des algues « neuves », sont dus principalement à de fortes pluviométries dans des bassins insuffisamment renouvelés pour empêcher une dessalure. La couverture des bacs par des tôles transparentes permet de réduire efficacement les épisodes de sporulation.

A grande échelle, notamment dans un système de bioremédiation de grande surface qui n'autorise pas des renouvellements en eau suffisants pour limiter la dessalure, la couverture par des tôles transparentes aura un coût important. Dans la *Zone Biomarine de Faratea*, exposée aux vents d'Est et soumise toute l'année à d'importantes précipitations, cette couverture sera sans doute impérative pour pérenniser les cultures.

Par ailleurs, cultivées en eau brute, les ulves avaient tendance à se dégrader en saison chaude : présence de galles sur les thalles, épiphytisme encroûtant et fragmentation. Cette dégradation apparente pourrait poser problème pour une commercialisation dans l'alimentation humaine. En début de saison fraîche (mai 2021), les algues dégradées par la saison chaude et les épisodes de sporulation se sont améliorées, mais n'ont jamais

atteint les performances enregistrées avec les ulves prélevées en ce même début de saison fraîche. Ainsi, une culture pérenne à des fins de bioremédiation devra sans doute requérir le renouvellement régulier des algues à partir de spécimens sauvages sains, à partir de cultures souches ou par production de semences par sporulation.

Ces problèmes de culture ne sont pas insurmontables et permettent d'envisager des systèmes de bioremédiation efficaces. Le principal problème avec les ulves réside plutôt dans la valorisation des productions. Les ulves peuvent être commercialisées comme :

- Amendement pour l'agriculture (très faible valeur ajoutée),
- Biostimulant pour l'agriculture (forte valeur ajoutée mais secteur hautement concurrentiel dans un marché saturé par des « poudres de perlimpinpin », davantage fruits de conceptions marketings plutôt que de R&D sérieuse),
- Aliment aquacole, pour la culture de poissons herbivores ou d'ormeaux (très faible valeur ajoutée, filières inexistantes en Polynésie française),
- Aliment humain, moyennant une transformation de l'algue fraîche (fabrication de chips, séchage, salaison humide, tartares d'algues).

Au cours du programme PROTEGE, l'expert en bioremédiation Nicolas Neveux a contribué par son expertise au bon déroulement des essais de culture d'ulves. Lors de sa visite en Polynésie française en septembre 2023 pour « l'Atelier Bioremédiation » organisé par la DRM au bénéfice des futurs exploitants de la *Zone Biomarine de Faratea*, Nicolas Neveux a précisé que l'essentiel des revenus de *Pacific Bio* (la société de bioremédiation australienne qui l'emploie en qualité de directeur R&D) sont issus de prestations de bioremédiation rémunérées par des organismes publics pour la dépollution d'effluents urbains. Les revenus issus de la valorisation des ulves elles-mêmes, principalement des biostimulants, sont négligeables.

Cet exemple pose la question du modèle économique sous-jacent au développement de la bioremédiation. La bioremédiation, ici rémunérée comme service environnemental lorsqu'elle est opérée par une entreprise privée au profit d'un organisme public, doit-elle être imposée aux exploitants privés par des normes de rejet coercitives ? Est-il possible de concevoir un système de bioremédiation économiquement incitatif du seul fait de ses productions ? Si non, peut-on au moins envisager que la valorisation de ces productions couvre tout ou partie des coûts de la bioremédiation imposée aux exploitants ?

Les essais sur les ulves, conduits pendant un an d'octobre 2020 à octobre 2021 dans la *Zone* « macroalgues », ont été suspendus en novembre 2021 pour les essais de culture avec *Gracilaria*.

A l'issue de PROTEGE, il n'est pas prévu que la DRM reprenne les essais avec *Ulva*. Il revient aujourd'hui aux futurs exploitants de Aruhotu, informés lors de l'Atelier Bioremédiation du savoir-faire d'entreprises spécialisées comme *Pacific Bio*, de réaliser des tests à l'échelle opérationnelle pour juger de l'opportunité d'employer les ulves pour bioremediier leurs effluents.

## 2.2 *Acanthophora*

Entre 2020 et 2022, des thalles d'*Acanthophora spicifera* ont été prélevés sur divers sites et mis en culture de diverses façons : attachés sur des cordages, en bullage libre, posé sur un substrat sablonneux, libre en cagette lagonaire. Différents degrés d'enrichissement en azote et renouvellement en eau ont été expérimentés.

Dans le meilleur des cas, Cliquez ici pour entrer du texte. il a été possible de maintenir les algues un mois, avant que les thalles pâlisent et se fragmentent.

La littérature sur cette espèce est très limitée. Néanmoins, des essais de culture réalisés en Inde<sup>2</sup> indiquent que *Acanthophora* est capable de multiplication végétative et donne des résultats intéressants en croissance sur cordes ou mailles tubulaires en étang et lagon.

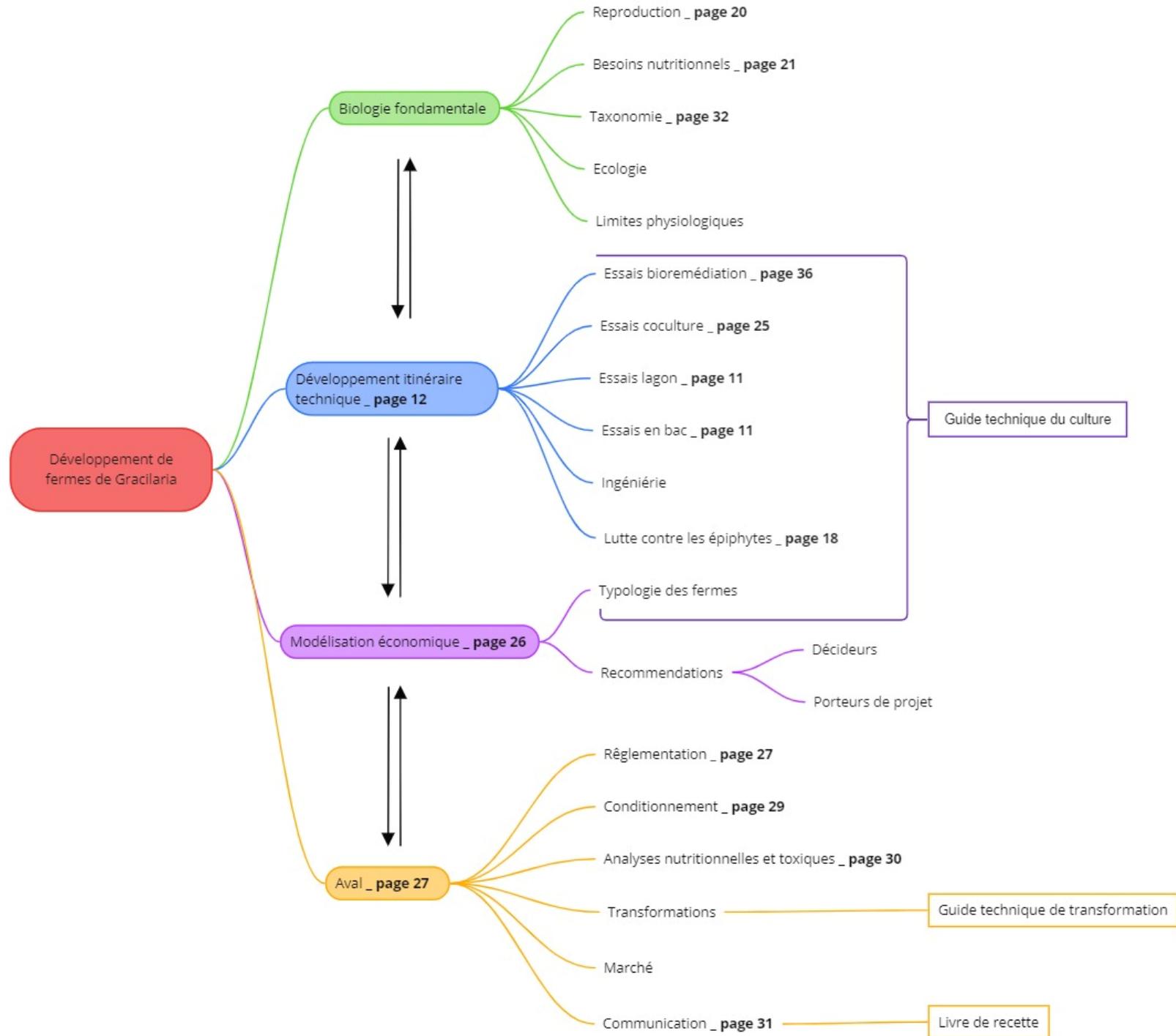
En 2023, la découverte de quantité importante d'*Acanthophora* dans la baie de Phaéton à Taravao aurait pu donner lieu à des essais de coculture en étang avec des crevettes (en maille tubulaire, en cagettes suspendues et libres sur le fond du bassin). Ces essais n'ont pu avoir lieu compte tenu de la priorité donnée aux travaux sur *Gracilaria* à partir de fin 2021.

### **3 Bilan : *Gracilaria***

Les travaux menés dans le cadre du développement de la culture de *Gracilaria* peuvent être résumés selon le schéma euristique suivant :

---

<sup>2</sup> Mohamed, Gulshad (2000) *High yield of Acanthophora spicifera from culture at Minicoy lagoon, Lakshadweep*. Marine Fisheries Information Service, Technical and Extension Series, 163. pp. 3-4.



### 3.1 Récolte sauvage

Introuvable à Tahiti en 2020, une première mission à Moorea début 2021 sur des sites connus de Mayalen Zubia n'a pas non plus permis de trouver de *Gracilaria*. Une seconde mission en octobre 2021 permettra finalement de trouver quelques dizaines de grammes d'une gracilaire très épiphytée dans les baies de Opunohu et à Paopao.

Quelques jours après, plusieurs dizaines de kilogrammes d'une autre gracilaire sont trouvés sur l'estran à Faa'a. Ce site unique fera l'objet de visites trimestrielles d'observation jusqu'à la fin du programme. C'est à partir de 10 kg de ce stock sauvage que seront lancés les premiers essais de culture fin octobre 2021.

En 2022, quelques dizaines de grammes de la *Gracilaria* de Moorea seront également trouvés entre 6 et 12m de profondeur à l'embouchure de la rivière Vavi à Vairao.

### 3.2 Premiers essais de culture

#### 3.2.1 Essais préliminaires

A l'instar des premiers essais sur *Acanthophora*, et malgré une littérature technique et scientifique conséquente, les premiers essais sur la *Gracilaria* de Faa'a seront très variés :

- Essais de thalles amarrés sur treilles (treille PEHD de 5mm), avec enrichissement continu, sans enrichissement ou avec enrichissement nocturne
- Essais en bullage libre dans des bacs cylindro-coniques ou des bassins type raceways
- Essais de thalles amarrés sur cordages
- Essais de thalles plantés dans un substrat sablonneux

Les croissances sont importantes dans toutes les conditions enrichies, avec un maximum de 250% de croissance hebdomadaire atteint dans un raceway blanc en bullage libre.

En quelques semaines, les premières difficultés apparaissent avec la contamination rapide des supports de culture par des algues vertes : *Cladophora* et ulves filamenteuses principalement. Le temps de nettoyage des supports épiphytés (treilles et cordages), associé à la main d'œuvre déjà conséquente pour attacher les thalles individuellement sur les supports au démarrage des cultures, ne semble pas réaliste dans le cadre d'une activité économiquement viable, ce qui a conduit à éliminer toutes les cultures « amarrées » dès novembre 2021.

#### 3.2.2 Essais en bacs

Les cultures sur supports sont donc abandonnées au profit des seules cultures en bullage libre. En culture libre, il suffit de déplacer les algues pour nettoyer le bac régulièrement. Comme les algues se contaminent aussi, impliquant des temps de tris de plus en plus conséquents bientôt incompatibles avec le développement d'une activité rentable, les travaux sur le bullage libre se focalisent dès novembre sur des moyens prophylactiques pour réduire l'épiphytisme :

- Différents voiles d'ombrage sont déployés sur les bassins : 40%, 65%, 75%, 85%. S'ils réduisent la croissance des gracilaires, les ombrages permettent aussi de réduire considérablement la croissance des algues opportunistes. Au fil des mois, on constatera qu'un ombrage compatible avec la croissance des algues (65-75%) n'empêche pas d'avoir à trier longuement les algues. Seuls les ombrages supérieurs à 80% évitent d'avoir à trier. La croissance des gracilaires est alors très faible, les ombrages à 85% ne sont intéressants que pour du stockage longue durée.
- L'enrichissement continu en goutte-à-goutte est suspendu, pour ne conserver qu'un enrichissement nocturne d'une quinzaine d'heures qui fait suite au tri hebdomadaire des épiphytes. Les algues rouges

étant capables de stocker l'azote pendant quelques semaines sous forme de phycobilines, cette fertilisation post-tri donne un avantage compétitif aux *Gracilaria* par rapport aux algues vertes, contraintes à croître dans un milieu oligotrophe sans réserve constituée.

Les cultures en bullage libre avec ombrage à 75% et enrichissement hebdomadaire permettent en deux mois de passer de 10kg à 80kg de biomasse. Pour accueillir les *Gracilaria*, une dizaine de bacs de 1,5 à 2m<sup>3</sup> sont installés dans l'urgence fin 2021 et la zone d'essais « alevinage » de la DRM (8 bacs de 1m<sup>3</sup>) est investie.

### 3.2.3 Essais lagunaires

Les premiers essais lagunaires ont lieu en décembre 2021. Pour ces premiers tests, une vingtaine de cagettes est construite avec des chutes du grillage en PEHD employé pour le programme ostréicole de la DRM. Les algues cultivées libres dans ces cagettes lagunaires suspendues sont enrichies une fois par semaine dans des bacs hors-sols. Le premier essai a permis des croissances hebdomadaires de 10-20%, malgré des pertes importantes par le fond, dont les mailles sont trop larges (16mm). Après modification par ajout d'une maille plus fine, la biomasse doublera tous les quinze jours.

Cette première réussite lagunaire conduit à construire une centaine de cagettes similaires supplémentaires afin de mener début 2022 un essai d'envergure dont l'ambition est de déterminer : la densité, l'ombrage et la fréquence d'enrichissement idéals pour la culture lagunaire.

### 3.2.4 Conclusions des premiers essais, problématiques émergentes

Malgré des croissances importantes et des résultats encourageants, les premiers mois d'essais ont mis en exergue des problématiques propres au développement de la culture de *Gracilaria* :

- La nécessité d'une culture biphasique, au cours de laquelle une phase de croissance en milieu oligotrophe succède à une phase d'enrichissement eutrophe en bullage libre.

Dans le lagon de Vairao, les essais sans enrichissement ne permettent pas de maintenir une croissance continue. La phase de fertilisation est donc une nécessité qui a un impact sur l'ensemble de l'itinéraire technique à définir. La fréquence des fertilisations est un paramètre économique à optimiser pour trouver un compromis entre le coût de l'étape d'enrichissement (main d'œuvre, amortissement et maintenance des structures dédiées de fertilisation) et la productivité des algues pendant la période de croissance en milieu oligotrophe, qui diminue progressivement dans les semaines suivant le bain azoté.

L'enrichissement ponctuel, s'il a un coût pour l'algoculteur, a néanmoins l'avantage de permettre l'implantation des fermes dans des zones lagunaires oligotrophes, loin des zones eutrophes souvent très anthropisées, qui peuvent être problématiques pour diverses raisons : pollutions d'origine humaine, accumulation de sédiments terrigènes, conflits d'usage de l'espace maritime, syndrome « NIMBY », etc.

- L'épiphytisme, principalement par des algues vertes filamenteuses.

La contamination lors des premiers mois de culture n'a cessé d'augmenter jusqu'à contraindre l'équipe à une phase de tri hebdomadaire systématique avant les bains de fertilisation. Les algues les plus contaminées étaient alors placées dans des bacs dédiés couverts avec un voile à 90%. Dès ces premiers essais, la détermination d'une méthode de lutte curative ou prophylactique contre cet épiphytisme est apparue comme une condition préalable impérative pour espérer développer des fermes rentables.

- Les débouchés commerciaux.

Dans le monde, la *Gracilaria* est exploitée principalement pour l'extraction de polysaccharides gélifiants : l'agar. La *Gracilaria* séchée produite pour l'agar s'échange à 1-2\$/kg (soit 0.1-0.2\$/kg en frais). À ce

prix, vu le coût de la main d'œuvre en Polynésie française, et vu la nécessité d'une fertilisation périodique, il est inconcevable de considérer l'agar comme un débouché potentiel.

En Asie du Sud-Est, au Japon et à Hawaï'i, la *Gracilaria* est aussi exploitée pour l'alimentation humaine. À Hawaï'i, où elle est consommée traditionnellement avec le poisson cru (Poké), le prix en supermarché est aux alentours de 20\$/kg pour l'algue fraîche. En préparation vinaigrée (Ogo Namasu) le prix constaté est d'environ 50\$/kg.

Vu les prix des algues alimentaires en Polynésie et vu les similarités culturelles et culinaires qui lient Hawaï'i à la Polynésie française, notamment la consommation quotidienne de poisson cru et la cueillette d'algues sauvages pour l'accompagner, c'est l'algue alimentaire fraîche qui a été retenue comme débouché le plus réaliste.

Le développement d'un itinéraire de culture pour la consommation humaine est plus contraignant que pour l'agar, puisqu'il impose une maîtrise complète de la qualité organoleptique (aspect visuel, texture, goût), une maîtrise des risques sanitaires (risque microbiologique, métaux lourds,), la capacité à produire une algue parfaitement exempte d'épiphytes.

### 3.3 Développement de l'itinéraire de culture

À partir de début 2022, la décision a été prise de focaliser les efforts du programme « macroalgues » sur *Gracilaria*, au détriment des autres d'espèces qui ne présentaient pas de perspectives de développement économique aussi encourageantes.

L'objectif était de définir des itinéraires techniques économiquement viables pour la culture en lagon et à terre.

#### 3.3.1 Contraintes méthodologiques

Les essais de culture d'algues posent quelques difficultés qui entraînent des répercussions méthodologiques :

- L'interdépendance des paramètres à optimiser.

Pour définir une méthode de production, il s'agit de déterminer les paramètres qui maximisent la productivité des unités de culture. En mer, les paramètres qui intéressent le fermier sont : la densité optimale d'ensemencement des cagettes, la profondeur des cagettes, la fréquence de balnéation. En bac, ce seront : la densité optimale, le degré d'ombrage, la fréquence de balnéation, le taux de renouvellement.

Or, ces paramètres sont souvent corrélés. Le niveau d'ombrage optimum, par exemple, n'est valable qu'à une densité particulière, car plus la densité augmente, plus les algues subissent un « auto-ombrage ». De même, le taux de renouvellement minimum qui garantit de ne pas limiter les algues en carbone ne sera valable que pour une densité et un ombrage donnés, qui définissent l'intensité de l'activité photosynthétique.

Par conséquent, les expérimentations visant à optimiser les paramètres cultureux requièrent souvent de nombreuses unités expérimentales pour traiter plusieurs conditions simultanées. En pratique, comme il n'est pas toujours possible de multiplier les conditions testées, on est contraint d'estimer les paramètres de cultures optimums les uns après les autres en fixant les autres variables autour de valeurs empiriques cohérentes, puis de procéder par tâtonnement en affinant chacun des paramètres successivement.

- La durée des expérimentations.

S'agissant de productions végétales, les variations des conditions de culture ne sont pas observables instantanément. Un changement de protocole met parfois plusieurs semaines à se traduire en données de

croissance. Aussi, les essais de culture doivent être initiés avec des algues stabilisées, cultivées à l'identique pendant plusieurs semaines, idéalement dans des conditions proches de l'expérimentation. Lors des essais de 2022 à 2023, les algues étaient prélevées dans des bacs en bullage libre très ombragés (85%) dédiés à la fourniture d'algues standardisées. En procédant ainsi, on garantit une homogénéité d'ensemencement des unités expérimentales. Néanmoins, les résultats des deux à trois premières semaines d'essai traduisent davantage l'historique culturel des algues que les conditions étudiées, et sont donc inexploitable.

En plus de cette durée initiale minimale avant de commencer à observer les effets des conditions de culture étudiées, s'ajoute la variabilité environnementale, principalement météorologique. En effet, une expérimentation courte peut être influencée par une relativement longue période de faible ensoleillement, ou par des épisodes de pluies exceptionnels. Ces effets météorologiques ont d'importantes répercussions qui sont difficiles à quantifier. Aussi, pour présenter des résultats extrapolables en conditions météorologiques moyennes, les essais doivent être suffisamment longs pour lisser les variations météorologiques expérimentales. Les essais les plus courts visant à estimer les paramètres de culture ne peuvent durer moins de deux mois : deux semaines sont perdues par la persistance de « l'historique culturel » des algues ensemencées, puis suivies par un minimum de six cycles de croissance d'une semaine dont les données sont exploitables. Si les conditions climatiques sont trop extrêmes sur ces huit semaines, on peut choisir de prolonger l'expérimentation, afin d'observer la réponse des différentes méthodes de culture sur un large spectre de conditions environnementales.

Enfin, pour être validé complètement, un itinéraire de culture devrait être testé pendant au moins un an (et pourrait proposer des adaptations saisonnières).

Le facteur environnemental le plus déterminant pour les algues est l'irradiance. Par conséquent, à partir de 2022, des capteurs « PAR » capables de quantifier l'irradiance d'intérêt photosynthétique ont été déployés sur les essais en mer et en bacs.

- La simulation économique

S'agissant d'une culture biphasique, l'itinéraire technique optimum ne peut être déterminé par la seule maximisation du rendement par unité de production. En effet, pour prendre un exemple illustratif, il suffit de considérer l'optimisation de la fréquence d'enrichissement.

Pour maximiser le rendement, l'expérimentation indique qu'il faudrait procéder à deux balnéations par semaine de l'ensemble des algues de la ferme. Or, pour réaliser deux bains par semaine, le fermier devrait disposer de presque deux fois plus d'unités de balnéations (bacs à terre) et devrait multiplier en conséquence la main-d'œuvre consacrée à l'étape de fertilisation. Cet effort supplémentaire ne se traduit pas par un doublement des rendements. A l'inverse, un bain toutes les deux semaines réduit la productivité. Mais cette perte de productivité est-elle compensée par la réduction des coûts ?

Pour répondre de façon rationnelle à ce type d'interrogation, à partir du deuxième semestre 2022 les résultats des essais de culture en mer ont été évalués en intégrant les données expérimentales dans un modèle économique approximatif des futures fermes. Ce modèle permet de rendre compte de l'opportunité économique qu'il y a à opter pour un protocole de culture plutôt qu'un autre.

- Une difficulté logistique : isoler les différentes conditions lors des enrichissements.

Enfin, les essais de culture en mer requièrent de maintenir les différentes conditions testées séparées pendant les bains de fertilisation. Pour tester huit conditions de cultures différentes, il est donc nécessaire de disposer de huit bacs de balnéation séparés. En 2023, le démantèlement de la « zone alevinage » a réduit les capacités expérimentales à 4 conditions simultanées.

### 3.3.2 Culture lagonaire

De janvier 2022 à décembre 2023, une douzaine d'essais lagunaires ont été effectués. Plutôt que de les aborder tous individuellement, ils sont ici regroupés en trois périodes correspondant globalement au type de développement mené.

#### 3.3.2.1 Janvier-Septembre 2022

- *Définition d'une méthode de culture lagonaire originale*

À la suite d'un essai préliminaire réussi avec une vingtaine de cagettes (50cm x 50cm, maille de 16mm), une centaine de cagettes similaires ont été construites afin de bénéficier de nombreuses unités expérimentales pour les essais de base dont l'objectif était de cerner les paramètres techniques fondamentaux. La première expérimentation « ombrage/densité », démarrée en février à l'occasion du stage de master 2 de Terahiti Faatauirā, comprenait 96 cagettes ensemencées à trois densités différentes et mises en culture sous quatre ombrages distincts (0, 30%, 60%, filtre vert). Ces douze conditions étaient chacune répliquées huit fois. Cet essai s'est rapidement soldé par une fragmentation des thalles, des pertes importantes par échappement à travers les mailles trop larges, ou par prédation lorsque le courant poussait les algues contre les parois des cagettes.

Les causes de la fragmentation et donc des pertes de biomasse par échappement des fragments de thalles, n'ont pas été clairement identifiées en 2022. Plusieurs hypothèses explicatives ont alors été évoquées :

- Une pathologie provoquée par la stagnation des algues qui aurait favorisé les dépôts de sédiments, de silt et de diatomées sur les thalles,
- Un effet de saisonnalité, la température de l'eau ayant notablement augmenté depuis les premiers essais en décembre 2021,
- Un problème de contamination pathologique, favorisée par un bain d'enrichissement commun à l'ensemble des algues utilisées pour l'expérimentation,
- Une dessalure superficielle causée par de fortes précipitations en février.
- Une perte de capacité de reproduction clonale.

Aujourd'hui, l'hypothèse retenue pour expliquer ces fragmentations et blanchiments des thalles est celle d'une mauvaise gestion de l'hydrodynamisme pendant les bains d'enrichissement, les quantités très élevées d'algues requises pour l'expérimentation ayant conduit à baigner beaucoup plus d'algues que d'habitude dans des bassins insuffisamment aérés pour maintenir les algues en mouvement perpétuel.

L'hypothèse de la saisonnalité a été rejetée lors de la saison chaude 2022-2023. Quant à l'hypothèse d'une dégénérescence des algues par reproduction clonale, elle sera testée et rejetée en juillet 2022. En revanche, les dépôts excessifs et la dessalure peuvent induire des épisodes pathologiques, comme cela sera observé dans les essais ultérieurs, mais ne sont pas la cause principale de l'échec de cette première expérimentation .

L'essai suivant avait pour but de tester différentes fréquences de balnéation afin de voir s'il était possible d'enrichir moins souvent les algues. Pour cette expérimentation, les cagettes ont été divisées en deux sites, l'un calme, favorisant les dépôts, l'autre beaucoup plus agité, caractérisé par de forts courants alimentés par la houle.

Dès le début de l'essai, une houle importante a engendré des courants forts sur les deux sites. Les algues, plaquées contre les parois des cagettes, dépassaient à travers les mailles trop larges et étaient immédiatement consommées par les poissons herbivores. 75% de la biomasse a ainsi été perdue en moins de 48 heures.

Les essais avec ces cagettes inadaptées aux conditions lagunaires ont repris en juillet dans un bassin-terre bloomé, en coculture avec des huîtres. L'objectif en bassin-terre, où il n'y a pas de courant, était de comparer

les performances d'algues sauvages fraîchement récoltées avec les algues en culture végétative depuis le mois d'octobre. Cet essai a permis d'écarter l'hypothèse d'une dégénérescence précoce des thalles reproduits végétativement. En l'absence de courant, les cagettes à large maille n'ont pas subi d'échappement et ont permis de retrouver les croissances observées entre décembre et janvier. En revanche, la culture en bassin-terre est très sujette à l'épiphytisme par algues filamenteuses et balanes.

Dès le deuxième essai lagunaire infructueux, de nouvelles cagettes ont été construites avec des mailles PEHD de 5mm. Ces cagettes étaient dotées d'un cadre en bambou pour leur permettre de flotter. Les essais lagunaires avec ces cagettes, menés avec un meilleur hydrodynamisme lors des enrichissements, ont permis de retrouver des croissances positives. La déformation des modèles à cadre en bambou lors des fortes houles a plus tard conduit à les remplacer par des cadres en PVC collé, beaucoup plus rigides. Ces cagettes permettaient de conserver la biomasse y compris lors d'un épisode de fragmentation mineur.

Cependant, sans ombrage, ces cagettes flottantes très exposées nécessitaient des tris hebdomadaires particulièrement chronophages, compromettant toutes perspectives de développement économique.

Entre juillet et août 2022, le test d'un filtre vert déployé sur ces cagettes flottantes et un bac a démontré l'intérêt de la réduction du spectre lumineux pour prévenir les algues vertes. Par conséquent, en septembre 2022, trois cagettes flottantes sont modifiées pour être coulées. Les *Gracilaria* dans ces cagettes coulées sont cultivées à une profondeur de 3m, c'est-à-dire sous la couche d'opportunité des algues vertes. La croissance diminue légèrement (doublement toutes les trois semaines au lieu de deux semaines), mais cette perte est largement compensée par la suppression totale de l'épiphytisme par les algues vertes. Fin septembre 2022, toutes les cagettes ont été transformées pour être suspendues à une filière de surface et permettre la culture des algues en profondeur.

Cette première phase d'expérimentation, qui devait conduire à l'optimisation directe des paramètres de culture, aura donc été une période de développement de cagettes véritablement compatibles avec la culture lagunaire. Les mailles fines permettent de conserver les fragments dans les forts courants et réduisent la prédation des extrémités des thalles par les herbivores. L'utilisation de cagettes coulantes permet de cultiver les algues en évitant la contamination par les algues vertes et offre la possibilité d'une exploitation économiquement viable. A partir d'octobre 2023, il a été possible de revenir à des essais de détermination des paramètres de culture.

Par ailleurs, au premier semestre 2022, la technique de culture en mailles tubulaires a été testée dans le lagon. Ces mailles tubulaires sont employées avec *Kappaphycus* en Asie du Sud-Est et au Brésil. Si ces essais ont permis des croissances correctes, la technique a été complètement rejetée pour diverses raisons :

- Les mailles tubulaires requièrent le déploiement d'un filet de protection anti-herbivores, maintenu entre des bambous. Or ce dispositif flottant se transforme rapidement en collecteur d'algues dérivantes, radeaux de sargasses et *Turbinaria*, en plus de constituer un risque pour la faune marine.
- Les mailles tendent à se faire coloniser par des filamenteuses vertes, avec la même impossibilité de nettoyage constatée sur les autres supports de culture.
- La balnéation d'enrichissement est difficile à réaliser.

### 3.3.2.2 Octobre 2022-Avril 2023

- *Fréquence de balnéation, auto-ombrage, fréquence de récolte*

A partir d'octobre 2022, les essais ont pu reprendre pour déterminer des paramètres de cultures optimaux.

Un premier essai avec une vingtaine de cagettes d'1m<sup>2</sup> a permis de comparer les performances des cagettes flottantes et coulantes, de comparer des cagettes enrichies toutes les semaines et des cagettes enrichies une fois et laissées croître sans bain (effet « enrichissement »), de comparer des cagettes ramenées à densité initiale régulièrement ou récoltées une seule fois en fin d'expérimentation (effet densité/auto-ombrage).

Au cours de cet essai, les temps de manipulation, de tri et de balnéation ont été enregistrés pour quantifier la main-d'œuvre requise pour chaque protocole.

Cet essai a permis de confirmer que les cagettes flottantes n'offrent pas de perspective de rentabilité, au contraire des cagettes coulantes qui ne demandent aucun tri.

Pour les cagettes non enrichies et non ramenées à densité initiale de façon hebdomadaire, la perte de productivité entre la première semaine et la deuxième semaine, due aux effets conjugués de l'auto-ombrage et de l'absence d'enrichissement, est d'environ 40%.

Un deuxième essai similaire a permis de visualiser les effets séparés et conjoints de l'auto-ombrage et de l'absence d'enrichissement. Contrairement à l'essai d'octobre, la productivité s'est maintenue entre la première et la deuxième semaine, avant de chuter de 50% en troisième semaine. La durée maximale sans enrichissement, pour laquelle la croissance reste positive, est d'environ un mois et varie en fonction de l'irradiance cumulée.

Ces deux essais visaient à déterminer l'intervalle idéal de balnéation et de récolte des algues. Les données obtenues ne permettent pas de trancher entre deux et trois semaines d'intervalle. Des essais plus longs sont nécessaires pour confirmer la productivité à deux et trois semaines sans enrichissement.

Les simulations sur le modèle économique avec les données obtenues au cours de ces deux essais ne permettent pas de déterminer une fréquence d'enrichissement et semblent même indiquer qu'il y aura des fréquences variables en fonction des types d'entreprises.

Enfin, il est probable que les performances changent en fonction des sites, notamment dans les zones moins oligotrophes, qui pourraient peut-être permettre des enrichissements moins fréquents.

### ***Densité optimale***

De fin janvier à fin avril 2023, un essai de trois mois a eu pour objectif de déterminer la densité de culture optimale. Au cours de cet essai, la densité qui a maximisé le rendement des cagettes était de 5kg/m<sup>2</sup>, soit presque le double des densités pratiquées jusqu'alors.

Cette densité permet de maximiser le rendement par cagette si les algues sont récoltées et enrichies toutes les semaines. Pour des enrichissements toutes les deux semaines, c'est une densité sans doute excessive. Il faudrait reprendre avec cette densité les essais sur la fréquence de balnéation, afin de vérifier si une telle concentration, qui limite la croissance relative par auto-ombrage, ne permettrait pas des intervalles de balnéation supérieurs à ceux constatés aux basses densités.

Mais, si la densité de 5kg/m<sup>2</sup> permet d'augmenter la productivité des cagettes tout en limitant les manipulations, c'est une densité qui paraît « limite », et qu'il faudra évaluer sur de plus longues durées pour s'assurer qu'elle ne favorise pas davantage la survenue d'épisodes pathologiques.

#### ***3.3.2.3 Mai 2023-Décembre 2023***

À partir de mai 2023, suite au démantèlement de la « zone alevinage » (8 bacs cylindro-coniques de 1m<sup>3</sup>) et des 6 bacs en PEHD « macroalgues » en vue de travaux de réaménagement, les capacités expérimentales en

lagon se sont trouvées réduites à quatre conditions simultanées. Par conséquent, les essais lagunaires ont été considérablement réduits. Malgré cela, Les expérimentations réalisées sur la période sont :

- Deux tests destinés à comparer différents prototypes de cagettes. Ces essais ont permis d’orienter la façon de construire les cagettes, que ce soit pour améliorer l’ergonomie, la facilité d’usage, ou maximiser la croissance. Les résultats ont conduit à :
  - L’abandon des cagettes hémicylindriques,
  - Privilégier des mailles larges dans la partie supérieure des cagettes,
  - Valider des cagettes avicoles, initialement prévues pour le transport des dindes et des oies vers l’abattoir, qui sont tout-à-fait performantes et robustes tout en étant beaucoup plus faciles à monter que les cagettes cousues.
- Deux tests pour évaluer l’intérêt de l’agitation manuelle quotidienne des cagettes dont le but est de débarrasser les algues des dépôts (silt, sédiments terrigènes, diatomées) qui s’accumulent sur les thalles. Ces essais ont démontré que l’agitation quotidienne des cagettes permettait de réduire l’intensité des épisodes « ice-ice » (dépigmentation et fragmentation d’une partie du thalle dus à un stress ou à une pathologie). Ces tests font suite à plusieurs épisodes de blanchiment et de fragmentation qui ont limité les croissances au deuxième semestre 2023, sans qu’une cause évidente ait pu être identifiée (les bacs en bullage libre ne présentent ce problème que lorsque le bullage est coupé pendant plusieurs heures à haute densité). Les hypothèses qui pourraient expliquer ces phénomènes, depuis que les problèmes d’hydrodynamisme lors des bains ont été éliminés en 2022, sont :
  - Des dépôts excessifs sur des thalles insuffisamment brassés ayant pour conséquence une réduction des échanges tégumentaires, ou favorisant la fixation de pathogènes.
  - Un brassage insuffisant, conduisant à des fragmentations identiques à celles constatées en bacs à haute densité lorsque l’hydrodynamisme fait défaut.
- Enfin, de novembre à décembre, un essai « multisite » a été mené, afin de voir si les épisodes « ice-ice » précédents pouvaient être liés en partie à l’emplacement des cultures. Trois sites ont été mis en culture :
  - Le site historique, proche du littoral, très influencé par les pluies (mais pas par la dessalure qui ne concerne que les premiers mètres), peu agité, où les algues ont tendance à se couvrir rapidement de dépôts.
  - Un site plus éloigné du bord, plus profond, soumis à des courants mais toujours très influencé par les pluies et les sédiments terrigènes.
  - Un site proche du récif extérieur, soumis à un clapot perpétuel, dont l’eau reste limpide y compris après des précipitations importantes.

Cet essai a été marqué par un épisode pathologique qui s’est déclenché simultanément sur les trois sites, et pourrait avoir été favorisé par de fortes précipitations. Les algues des sites littoraux ont été nettement plus impactées (55% de survie) que celles du site éloigné (80% de survie). S’il ne permet pas de déterminer les causes de ces phénomènes « ice-ice » récurrents, cet essai semble indiquer qu’un meilleur brassage des algues et une diminution des dépôts réduirait l’intensité de l’épisode.

Les essais lagunaires ont permis de développer un modèle de cagette original, capable de protéger les algues de l’herbivorie tout en les maintenant à une profondeur qui inhibe complètement l’épiphytisme par les algues vertes. Le cadrage des paramètres de culture optimums a été entamé, et les protocoles employés dès le deuxième semestre 2022 permettraient d’envisager des fermes rentables. Cependant, ces paramètres doivent être consolidés par des essais « multisites » sur de plus longues durées, afin d’obtenir des données moyennes fiables prenant en compte l’influence annuelle cumulée des facteurs météorologiques, des

pathologies ponctuelles et des grandes variations saisonnières. Certains paramètres, comme la densité initiale, qui est aujourd'hui conservée à 3kg/m<sup>2</sup> par précaution alors qu'une densité de 5kg/m<sup>2</sup> est nettement plus productive, pourraient être modifiés à l'issue d'essais de longue durée et entraîner des répercussions importantes sur le modèle économique des fermes.

### 3.3.3 Epiphytisme

De 2021 à octobre 2022, la contamination des *Gracilaria* par des algues vertes a constitué le principal obstacle au développement d'un itinéraire de culture viable. Ce développement rapide d'épiphytes a conduit d'emblée au choix de pratiques particulières :

- Culture de thalles libres, sans amarrages, afin d'éviter le nettoyage de supports contaminés difficiles à nettoyer,
- Tris hebdomadaires manuels, pour éliminer l'essentiel des algues vertes,
- Culture biphasique : une phase d'enrichissement nocturne par bain sur-concentré après le tri, suivie d'une phase de croissance en milieu oligotrophe au cours de laquelle les gracilaires utilisent l'azote stockés dans leurs tissus pour croître dans un milieu peu propice aux épiphytes.
- Utilisation de voiles d'ombrage pour réduire la croissance des algues opportunistes.

Ces méthodes se sont révélées insuffisantes et les durées de tri incompatibles avec une exploitation lucrative.

L'épiphytisme a donc fait l'objet de recherches dédiées, pour lutter ou prévenir la contamination des cultures par les algues vertes à croissance rapide.

Au début du programme, la quantification de l'épiphytisme se limitait à l'attribution d'une note de 1 à 5. Pour les essais du premier semestre 2022, les algues étaient photographiées sur une table blanche puis la surface d'algues vertes était mesurée sur un logiciel (*ImageJ*), de façon à donner un indice de contamination quantitatif exprimé en cm<sup>2</sup>/kg. Cette méthode a été abandonnée avec le développement de l'outil de simulation économique qui requiert un temps de tri exprimé en minute/kg d'algues, rapidement convertible en charge salariale.

#### 3.3.3.1 Méthodes curatives

Dans un premier temps, l'objectif était de déterminer un protocole de traitement (dose/durée) capable d'affecter les épiphytes sans trop nuire aux *Gracilaria*. Dans un second temps, si un traitement efficace avait été élaboré, il était prévu d'évaluer sa pertinence dans l'itinéraire de culture d'un point de vue économique et environnemental.

Les méthodes curatives testées en 2022 sont :

- Des traitements osmotiques, par mise en culture temporaire des algues contaminées dans des milieux sursalés ou dessalés. Malheureusement, des essais menés dans douze de bacs de 50l ont montré que les algues vertes considérées (*Cladophora* et *Ulva prolifera*) étaient beaucoup plus tolérantes aux chocs osmotiques que les *Gracilaria*.
- Des bains chocs à différentes doses et durées dans des solutions d'acide chlorhydrique, d'hypochlorite de sodium ou du peroxyde d'hydrogène. Plusieurs centaines de combinaisons dose/durée de ces produits ont été testées sur des thalles isolés, sans qu'il soit possible de dégager un traitement qui affecte davantage les épiphytes que les gracilaires.

Par ailleurs, différentes façons de trier les algues ont été testées, notamment par aspersion sur treille avec un jet, ou par fragmentation et élimination de l'ensemble de la partie du thalle contaminé, sans que cela règle le problème de façon satisfaisante.

Finalement, la seule méthode curative déterminée est longue : il s'agit de mettre les algues contaminées à l'obscurité totale avec un bullage fort pendant un mois. Les algues épiphytes se compactent sur elles-mêmes, se détachent des *Gracilaria* et sont éliminées progressivement par le renouvellement d'eau et les tris réguliers. Cette méthode requiert de gros volumes bien aérés, ce qui la rend prohibitive en exploitation commerciale. Une alternative à cette méthode consiste à couler des cagettes lagunaires à plus de dix mètres de profondeur. Testée avec des cagettes posées sur le fond dans la baie de Vairao, cette technique fonctionne pour les algues vertes mais demande des relevages réguliers pour nettoyer les cagettes qui tendent à se faire coloniser par des bivalves et des crustacés (balanes). De plus, il est préférable de maintenir les cagettes suspendues, afin de garantir des échanges par le fond, qui semblent réduire les épisodes de fragmentation.

### 3.3.3.2 Prévention

En 2021, la meilleure façon connue pour réduire l'épiphytisme est l'ombrage. Plusieurs essais de culture en bacs avec différents ombrages ont été menés dès novembre 2021. Les ombrages testés sont : 50%, 60%, 75%, 85%, 90%. Sur certains bacs, l'ombrage était adapté en fonction de l'ensoleillement.

Le recours à l'ombrage permet de réduire efficacement les algues vertes mais réduit aussi la croissance des gracilaires. Un ombrage à 60%, qui permet des croissances commerciales (+20%/semaine), requiert un tri hebdomadaire. Un ombrage qui élimine complètement l'épiphytisme (85%) réduit la croissance à +5%/semaine. L'ombrage variable permet de maximiser la croissance mais demande en général de longues périodes d'ombrage restrictif pour éviter les tris.

Finalement, plutôt que de continuer à réduire l'ensemble du spectre lumineux, l'idée émerge fin 2021 de filtrer la lumière de façon à conserver uniquement la partie du spectre qui bénéficie aux algues rouges et que les algues vertes ne sont pas capables d'exploiter : la lumière verte, qui est absorbée par les phycobilines des algues rouges. Prévues pour l'essai « ombrage/densité » en cagettes de février 2022, les tôles vertes ne seront finalement testées qu'à partir de mai sur un bassin en bullage libre. Les croissances obtenues sont similaires à un ombrage à 60% (+20%/semaine) mais l'épiphytisme par les algues vertes est complètement éliminé. Ce sont ces essais sous tôles vertes, associés à l'occurrence régulière d'une couche d'eau douce néfaste, qui conduiront en septembre 2022 à couler les cagettes à différentes profondeurs. Le coulage des cagettes n'agit pas comme un ombrage universel mais bien comme une filtration par les premiers mètres d'eau des radiations d'intérêt pour les algues vertes. Ainsi coulées à 3m, les croissances sont économiquement intéressantes (+20-25%/semaine), alors que l'épiphytisme est complètement éliminé.

En 2023, un essai empirique semble indiquer qu'il serait avantageux de remonter les cagettes d'un mètre les semaines « sombres » et de les redescendre à 3m lorsqu'il fait beau. Ce faisant, il serait possible d'obtenir 30% de croissance hebdomadaire sans épiphytisme.

### 3.3.4 Eclosion sexuelle et végétative, saisonnalité

A partir de mars 2022, les problèmes d'épiphytisme et de fragmentation gagnent l'ensemble des cultures, en lagon comme en bac. Ces problèmes sont dus à différents stress lors de manipulations inappropriées : mauvais hydrodynamisme lors des bains, ombrage insuffisant pour réduire l'épiphytisme, tris par fragmentation traumatiques, cagettes qui permettent aux herbivores de consommer les apex des thalles qui dépassent, etc. Mais, début 2022, ces causes ne sont pas encore clairement identifiées. Plusieurs autres hypothèses sont émises pour expliquer ces contre-performances après les croissances extraordinaires des trois premiers mois :

- Les algues, qui croissent alors par reproduction végétative depuis octobre, sont peut-être en train de voir leur capacité de reproduction clonale s'essouffler, conduisant à des thalles faibles face aux pathogènes et aux épiphytes.
- L'épiphytisme, d'abord superficiel, est peut-être devenu incurable, comme l'atteste l'apparition de thalles aberrants, galleux, difformes.
- La saison chaude pourrait être une période néfaste pour les gracilaires, que ce soit parce que les températures sont trop élevées, ou parce que les pluies favorisent dessalure et accumulation de dépôts terrigènes sur les thalles.

Pour évaluer les deux premières hypothèses, la meilleure méthode est de prélever à nouveau des algues sauvages, et de les comparer lors d'un essai de culture aux algues cultivées à la DRM depuis octobre 2021. En mars 2021, le stock sauvage est réduit à quelques thalles, ce qui ne permet pas de d'effectuer le test, et accrédi la thèse d'un effet de saison.

La décision est alors prise de reproduire les algues par des méthodes d'écloserie sexuée afin :

- D'anticiper une perte des capacités de reproduction clonale tout en rendant la filière indépendante des fluctuations, peut-être saisonnières, du stock sauvage,
- D'évaluer si ces méthodes d'écloserie sont compatibles avec le développement économique de l'algoculture par des entrepreneurs individuels autonomes ou si au contraire elles nécessiteront une assistance publique et/ou une structuration coopérative des algoculteurs autour de l'écloserie.

En plus de tester l'écloserie sexuée, des essais d'écloserie végétative, sensée être plus simple, sont également menés au premier semestre 2022 pour éliminer l'épiphytisme de fond tout en permettant d'envisager une sélection clonale<sup>3</sup> des thalles performants.

A partir de mars 2022, le captage de spores est testé en bassins sur différents substrats : cordages, pierres poreuses, coquilles d'huîtres et plaques en verre témoins. Si les spores de *Gracilaria* parviennent effectivement à se fixer, il en est de même pour d'autres espèces, et surtout pour les diatomées, qui couvrent rapidement les substrats dans les bassins de nurserie. La méthode ne paraît donc pas envisageable sans une eau parfaitement biosécurisée et l'ajout de dioxyde de germanium pour éviter les diatomées.

La croissance, observée sur quelques rares thalles survivants, est très lente. Aussi, l'écloserie sexuée demanderait des structures lourdes comprenant des volumes importants biosécurisés et gérés par des techniciens spécialisés. La méthode d'écloserie sexuée hawaïenne, en eau brute et avec nurserie en enclos lagonaire, paraît impossible en Polynésie vu le « fouling » qui se développe sur les supports.

Les essais en écloserie végétative ont été conduits avec de l'eau et des contenants autoclavés pour la montée en puissance des souches dans une salle de culture de microalgues. Malgré toutes les précautions prises, les trois-quarts des cultures ont été contaminées par des diatomées ou des cyanobactéries. Là encore, le processus est chronophage et semble incompatible avec l'émergence d'une algoculture simple et autonome.

À partir de juin 2022, la recrudescence du stock d'algues sauvages a permis de réaliser de nouveaux prélèvements. En juillet 2022, un essai comparatif est mené en bassin-terre et ne montre pas de différence de performance entre les algues « neuves » et les algues cultivées à la DRM depuis octobre 2021 : toutes

---

<sup>3</sup> En réalité, la sélection clonale ne permettrait pas d'obtenir améliorations stables des performances car le mécanisme de reproduction végétative des gracilaires n'est pas strictement clonal, mais induit une importante variabilité génétique.

pousseront correctement dans les cagettes suspendues. S'il ne semble donc pas y avoir eu de perte des capacités clonales entre octobre et juillet, l'hypothèse d'un effet saison reste plausible.

Au début du deuxième semestre 2022, l'utilisation de filtres verts et de cagettes submergées permet de retrouver les performances des débuts. La saison chaude 2023 sera exempte de problème, discréditant quelque peu la thèse d'une saisonnalité marquée.

Ces essais d'écloserie auront eu le mérite de montrer la faisabilité des techniques, à condition de respecter une biosécurisation stricte et d'utiliser du dioxyde de germanium. Pour la suite du développement de l'algoculture en Polynésie, tant qu'il s'agira d'une filière artisanale, il conviendra de se limiter à des espèces d'algues capables de reproduction végétative continue ou bien d'algues suffisamment disponibles à l'état sauvage pour renouveler les souches régulièrement à moindre coût.

En 2023, des *Gracilaria* fixées à proximité immédiate des cagettes lagunaires, obligatoirement issues de reproduction sexuée, ont été récoltées régulièrement et mises en culture dans un bac dédié. Ces algues, auxquelles ont été ajoutés quelques kilogrammes en provenance du stock sauvage de Faa'a, serviront en 2024 pour un nouvel essai comparatif visant à évaluer la conservation des capacités de reproduction végétative.

Enfin, si l'effet saison ne semble pas avoir été marqué en saison chaude 2022-2023, le deuxième semestre 2023 aura été marqué par des précipitations exceptionnelles (vent de Sud persistant tard dans la saison apportant des pluies abondantes, puis saison des pluies normale à partir de novembre). Ces précipitations sont corrélées à des épisodes « ice-ice » récurrents en 2023, particulièrement à proximité du littoral où l'effet pluvial est marqué. Des essais au long court, associés à un suivi rigoureux des variations météorologiques, sont indispensables afin de mieux comprendre l'influence des facteurs environnementaux saisonniers sur les cultures.

### 3.3.5 Nutrition azotée

En décembre 2022, la concentration en azote ammoniacal a été mesurée 15 heures puis 48 heures après le début de bains d'enrichissement effectués sur des algues modérément dénutries (2 semaines). Ce test a permis de s'apercevoir que les bains nocturnes d'une quinzaine d'heures à 16mg N/l pratiqués habituellement, ne sont pas saturants, et que les algues continuent à absorber de l'azote pendant plusieurs jours. Par ailleurs, un apport supplémentaire de 8mg/l N après 15h d'enrichissement dans un des bains a montré une absorption plus rapide et quantitative de l'azote comparé aux autres bains, qui avaient alors atteint une phase d'absorption lente. L'augmentation théorique totale de l'azote tissulaire (théorique car calculée et non mesurée) dans ce bain boosté est supérieure aux bains normaux qui n'ont eu qu'un seul apport initial de chlorure d'ammonium. Cet effet « boost » semble indiquer que des bains maintenus à haute concentration faciliteraient le stockage de plus grandes quantités d'azote par les algues.

Ce premier essai a conduit en 2023 à tester en culture lagunaire des algues baignées pendant 12, 24 et 48 heures, afin de voir si des bains plus longs, saturants, permettraient d'augmenter la durée de la phase de croissance oligotrophe. Pour ces algues, qui n'étaient pas préalablement dénutries, aucune différence n'a pu être observée en durée de croissance oligotrophe. Il semble donc que des algues enrichies une quinzaine d'heures toutes les semaines ne profitent pas de durées de balnéation supérieures.

Un deuxième essai de suivi de l'azote ammoniacal dans des bains, mené en janvier 2023, a permis d'observer que les algues enrichies toutes les semaines atteignent un plateau de saturation en 24h. Entre 15h et 24h, l'augmentation théorique de l'azote tissulaire est de 40%, ce qui ne semble pas avoir de conséquence sur la durée de croissance oligotrophe. Comme pour l'essai de décembre 2022, l'ajout de 8mg/l N à 48h a induit une reprise d'absorption intense de quelques heures avant un retour à une phase d'absorption lente. Comparé aux bains sans boost, l'assimilation théorique cumulée est supérieure.

L'effet de « surge uptake » induit par le boost ammoniacal, plaide en faveur d'un maintien de la concentration initiale au cours du bain plutôt que d'un apport azoté unique.

Dans les bains d'algues enrichies toutes les semaines sans boost, quatre phases se distinguent : une absorption rapide pendant les quinze premières heures, suivie d'une phase d'absorption plus lente jusqu'à 24h, puis un plateau de saturation de 24h à 60 heures. On notera qu'à partir de 60 heures après le début du bain, la concentration en azote ammoniacal tend à diminuer à nouveau, sans doute par l'action des bactéries qui se développent dans ces environnements non renouvelés.

Les algues dénutries pendant six semaines n'atteignent pas de plateau de saturation avant 60 heures. La quantité d'azote ammoniacal totale prélevées par ces algues dénutries en 24 heures est 50% plus élevée que pour les algues enrichies toutes les semaines. Au bout de 48 heures, les dénutries ont absorbé 75% d'azote en plus.

Ce dernier point signifie que pour des algues cultivées longuement dans le lagon sans enrichissement, les bains devront sans doute être conduits plus longtemps à des concentrations maintenues plus élevées, afin de permettre aux algues de reconstituer suffisamment leur stock pour tenir un nouvel intervalle long de croissance oligotrophe.

Les essais devaient être repris en mars 2023 pour tester :

- L'intérêt du maintien de la concentration initiale élevée,
- L'ajout d'un boost à 12h sur un bain de 24h,
- Ajuster les durées et dosages nécessaires pour rétablir des stocks d'azote adéquats pour des algues dénutries pendant différentes durées (d'une à quatre semaines), afin d'assurer la pérennité des performances sur des cycles longs répétés,
- Valider ces protocoles par des essais de culture de longue durée.

Ces expérimentations, qui devaient être menées dans des bacs de 50l n'ont pu avoir lieu par suite du démantèlement de la zone.

L'ensemble de ces travaux devait permettre d'ajuster les bains en fonction des besoins réels des conditions particulières de culture. Jusqu'aux premiers essais de 2022, le bain d'enrichissement était le même pour toutes les conditions de culture. Or, une algue cultivée trois à quatre semaines dans le lagon ne présente pas la même capacité d'absorption qu'une algue enrichie toutes les semaines dans un bac ombragé. En observant l'absorption de l'ammonium par ces algues issues de protocoles différents, il est permis d'ajuster la façon de les enrichir pour :

- Rationaliser la consommation en engrais,
- Éviter les rejets,
- S'assurer de rétablir à chaque cycle les stocks azotés de l'algue pour lui permettre de croître convenablement pendant toute la durée de la phase oligotrophe,
- Éventuellement , augmenter la durée de croissance oligotrophe productive pour réduire la fréquence de balnéation.

Ces essais de nutrition azotée étaient basés sur la mesure de la concentration en azote ammoniacal dans l'eau du bain. Les essais ultérieurs, initialement prévus pour 2023, devront également suivre le pourcentage d'azote tissulaire réel, par analyse élémentaire ou par la méthode de Kjeldahl. Cela permettra de vérifier si la diminution de l'azote ammoniacal constatée se traduit bien par une augmentation de l'azote tissulaire. Des échantillons devront être pris sur des cultures en mer toutes les semaines, afin de déterminer le pourcentage d'azote tissulaire limitant en croissance. A terme, pour s'affranchir d'analyse élémentaire, il faudrait pouvoir

inférer le pourcentage d'azote tissulaire par la diminution de la concentration en ammonium constatée avant saturation.

Enfin, si les tests réalisés ne s'intéressaient qu'à l'azote ammoniacal, dont l'absorption passive est rapide que l'absorption des autres formes azotées, il faudra aussi se pencher sur la cinétique d'absorption de ces autres formes et étudier le restockage azoté dans des bains différents : effluents d'élevage aquacole par exemple, engrais riches en nitrates, et c.

Au-delà de l'azote, se pose également la question du phosphore, très peu étudié chez les gracilaires.

### 3.3.6 Ergonomie, amélioration des procédés

#### 3.3.6.1 Amélioration des cagettes

Les premières cagettes construites en 2021 puis début 2022 se sont révélées inadaptées. A partir de septembre 2022 les caractéristiques indispensables des cagettes étaient comprises : les cagettes devaient être coulantes pour éliminer l'épiphytisme, dotées d'une maille fine sur le fond et sur les côtés pour éviter la prédation, fermées par une maille plus large dans les hauts afin de maximiser les échanges et la lumière.

Les premières cagettes coulantes testées étaient des cagettes prévues pour être flottantes puis modifiées à l'improviste. Le matériau employé était un grillage de jardinerie de piètre facture qui ne tenait pas aux UV. Si ces cagettes ont permis d'amorcer les essais lagunaires, elles étaient inadaptées pour une exploitation commerciale. A partir du deuxième semestre 2022, des cagettes prototypes ont été fabriquées et testées en mer en parallèle des essais principaux.

Le cahier des charges pour la conception de ces cagettes était exigeant :

- Les cagettes devaient être robustes, pour supporter le plus longtemps possible une exploitation commerciale intensive. Les matériaux envisagés comprenaient donc des mailles aquacoles renforcées en PEHD (noir, traité anti-UV), du tuyau en PEHD pour l'armature, du polyéthylène haut module gainé polyester pour les coutures. Les suspentes et les filières devaient être fabriquées en polyamide (et non en polypropylène).
- La forme de la cagette devait permettre une bonne répartition des algues (pas de poche), faciliter la récolte et la préhension,
- La taille des cagettes devait permettre une manipulation aisée par une personne seule, tout en minimisant le nombre de cagettes à manipuler à l'échelle de la ferme,
- Le système de porte devait être fiable mais facile à ouvrir/refermer, pour réduire le temps de manipulation, et ne pas comporter de pièces métalliques ou d'élastiques qui requièrent une maintenance permanente,
- La construction devait être aussi simple et rapide que possible,
- Enfin, le prix de l'ensemble matériaux et de la main d'œuvre devait rester modéré.

Une demi-douzaine de cagettes d'1m<sup>2</sup> ont ainsi été construites de diverses façons, avec différentes formes et mécanismes d'ouverture. Le modèle retenu est une cagette carrée, qui s'ouvre largement par le haut pour faciliter la vidange et le remplissage. L'inconvénient principal de ces cagettes légères est le temps de fabrication qui impacte fortement le coût final (environ 10 000 f cfp, dont 5000 f cfp de matériaux).

Afin de réduire le temps de fabrication, d'autres solutions ont été testées au deuxième semestre 2023, comme la transformation de cagettes à légume gerbables. Ces unités de petite dimension sont faciles à manipuler et à construire, mais sont plus chères relativement à la surface de culture. L'utilisation de petites cagettes concourt à augmenter le temps de manipulation. Finalement, un test a été réalisé avec une cagette avicole, destinée initialement au transport de dindes vers l'abattoir, et transformée en cagette de culture d'algues par

l'ajout de mailles fines dans les fonds. Cette cagette est très rapide et facile à construire. Un système de porte sur charnière, d'origine, facilite les étapes de vidange et de remplissage. L'ensemble est beaucoup plus rigide et robuste que les cagettes d'1m<sup>2</sup> cousues. Le prix à l'achat, maille fines comprises, est légèrement plus élevé, mais est compensé par le temps de fabrication, qui n'excède pas trente minutes par unité. La surface utile reste intéressante : 0,5m<sup>2</sup>.

Par conséquent, une commande de 500 cagettes avicoles a été réalisée afin de permettre le déploiement rapide de nombreuses unités expérimentales en 2024.

### 3.3.6.2 *Systèmes autonomes immergés*

Si l'étape de vidange/remplissage est un point crucial de l'ergonomie de l'itinéraire de culture qui a dû être optimisé, l'étape la plus critique réside dans le transfert des algues depuis les filières immergées vers les bacs d'enrichissement ou de conditionnement. Pour une ferme à proximité immédiate du littoral, dotée d'un ponton ou d'un accès direct aux bacs de baignades via un quai ou une plage, ce transfert paraît simple, mais requiert tout de même le transport des algues dans des bannes. Pour une ferme récifale éloignée, le transfert pourrait devenir l'étape limitante du processus et requérir une embarcation disproportionnée au coût de fonctionnement prohibitif.

En 2023, un système de baignade immergé, déployable à proximité immédiate des filières de cultures a été prétesté. Il consiste à modifier puis immerger une citerne de collecte d'eau de pluie pour y enrichir les algues à proximité immédiate des cultures. Les modifications incluent le perçage latéral pour l'insertion d'un airlift qui permet le renouvellement de l'eau entre les bacs, l'ajout d'une purge obturable en position basse, la pose d'un système d'aération pour le bullage libre. À terme, les citernes ainsi modifiées seront suspendues à une structure flottante qui comprendra un kit solaire et une soufflante. Un petit automate permettra d'administrer une aération intermittente pour réduire la consommation électrique.

La baignade *in situ* en citerne immergée requiert un investissement initial d'environ un million de francs cfp pour une barge flottante comprenant une citerne de 8m<sup>3</sup> et son kit solaire. Une telle structure peut supporter une ferme comprenant jusqu'à 190 cagettes cousues ensemencées à 3kg d'algues/m<sup>2</sup>, enrichies une fois par semaine, pour une production hebdomadaire totale de 130kg d'algues.

Ce type de structure permettra la création de fermes éloignées du littoral, indépendantes de foncier côtier. Le déploiement des filières en étoile autour de la barge de baignade simplifiera l'itinéraire technique en éliminant le transport des algues.

En 2023, dix citernes en PEHD de 1m<sup>3</sup>, destinées à enrichir séparément les différentes conditions expérimentales lagunaires, ont été modifiées et déployées dans une structure flottante. Un automate capable de gérer des électrovannes pour l'aération séquentielle de ces bacs a été fabriqué. En 2024, le montage d'un kit solaire sur une barge en aluminium de la DRM assurera l'alimentation intermittente en air de ces bacs d'enrichissement immergés. Enfin, quatre citernes de 8m<sup>3</sup> seront déployées pour des essais à l'échelle pilote, afin de reproduire le plus exactement possible les conditions de travail réelles d'une ferme privée.

Au-delà de la validation de fermes autonomes, la barge DRM doit permettre d'assurer la pérennité des programmes de développement de l'algoculture, malgré le démantèlement de l'ensemble des bacs d'enrichissement terrestre en 2023. Ce démantèlement progressif a contraint au frein du développement de l'itinéraire de culture lagunaire en avril, puis à l'abandon des expérimentations sur la cinétique d'absorption de l'azote.

### 3.3.7 Culture en bacs

La culture en bacs en bullage libre a été prépondérante pendant tout le programme. Fin 2021, 6 bacs cylindriques d'1,5m<sup>3</sup> sont déployés sur un terre-plein pour augmenter la capacité des 8 bacs d'1m<sup>3</sup> « alevinage » déjà réquisitionnés. Début 2022, deux bacs de 1800l sont installés à proximité du mésocosme de 7m<sup>3</sup>. Enfin, la zone « microalgues » extérieure est investie pour les essais nutritionnels et des cultures d'appoint. En 2023, une structure expérimentale de douze bacs de 50l est installée aux *Ecloserie du Pays Vaia* (EPV). Du deuxième semestre 2022 à début 2023, les zones « alevinage » et « terre-plein » sont démantelées pour travaux. La structure expérimentale des EPV est démantelée moins de trois mois après sa construction. A partir de fin 2022, les algues nécessaires aux expérimentations sont stockées dans deux bacs cylindriques désaffectés des EPV. Ces deux bacs de 15m<sup>3</sup> permettent de stocker entre 200 et 300kg d'algues sous un ombrage à 85% qui maintient la croissance au minimum.

Malgré une grande instabilité de moyens, le programme aura su valider la croissance sous tôle verte et la comparer aux bacs sous ombrage conventionnel. Le manque de bacs identiques n'a pas permis d'optimiser les paramètres de production : densité maximale, densité optimale, taux de renouvellement minimum à densité optimale, fréquence d'aération intermittente. Cependant, les essais conduits permettent tout de même d'envisager des systèmes de production en bac rentables, même sans optimisation des paramètres de culture.

En effet, un bac cylindrique de 15m<sup>3</sup> couvert d'une double épaisseur de tôles vertes, mené à une densité de 6-8 kg/m<sup>3</sup> est capable de produire 20-25kg d'algues commercialisables par semaine avec 1500W de puissance électrique (aérateur de 200W, pompage de 1300W pour 400% de renouvellement/jour). La main d'œuvre requise pour cultiver des algues en bacs est dérisoire. Pour un porteur de projet disposant déjà de foncier, la culture en bac pourrait être plus économique que la culture lagonaire.

### 3.3.8 Coculture et bassin-terre

En 2022, des algues ont été cultivées avec des huîtres de roche, des holothuries, des crevettes et des Paraha Peue. Ces essais empiriques ont été menés avec des cagettes suspendues ou en laissant les algues libres sur le fond des bassins-terre.

Ces tests ont permis de constater que les algues survivent sans problème partiellement enfoncées dans la vase et ne sont consommées ni par les Paraha Peue, ni par les crevettes.

En cagettes, les algues sont contaminées par des algues vertes filamenteuses et par des balanes. En général, il n'a pas été possible de produire des algues de qualité commerciale en coculture en bassin-terre. Les algues récoltées, souvent dures, tordues et bicolores (changement pigmentaire des algues exposées à la lumière sans brassage), nécessiteraient un « affinage » en bullage libre ombragé pour récupérer une couleur et une texture attrayantes.

Enfin, bien que ces cocultures n'aient pas présenté d'intérêt pour la culture des algues alimentaires, il serait intéressant de procéder à des essais rigoureux afin de quantifier l'effet bénéfique potentiel de la coculture sur les autres espèces.

## 3.4 Modélisation économique

### 3.4.1 Un outil de R&D

Initié en 2022, le modèle économique des fermes avait d'abord pour objectif d'aider à concevoir un itinéraire technique performant. Ce modèle est construit comme un modèle d'analyse financière. Il est composé de différentes parties :

- Une partie « variables et hypothèses », qui constitue la partie ajustable du modèle :

- Des variables et coefficients techniques culturels, issus de l'expérimentation, telles que la productivité hebdomadaire par cagette, la fréquence de baignade, le temps de manipulation hebdomadaire par cagette, le temps requis pour réaliser un enrichissement par cagette, et c.
- Des variables commerciales : nombre et durée des tournées de livraison, temps de conditionnement, vente directe ou sous traitée ?
- Des variables financières : taux d'apport personnel dans l'investissement, intérêt de l'emprunt, et c.
- Des variables liées au fermier : la ferme est-elle littorale ou offshore ? le fermier dispose-t-il déjà d'une embarcation, d'un véhicule de livraison ? Les baignades seront-elles effectuées à terre ou en mer sur une structure autonome ? Quelle est la durée du trajet entre l'unité de baignade et la ferme ? L'entrepreneur individuel est-il prêt à travailler 50 heures par semaines, ou préfère-t-il travailler à mi-temps et embaucher au-delà de 20 heures de travail personnel ?
- Des variables conjoncturelles : prix de l'essence, de l'électricité, des matériaux et des intrants.
- Une liste exhaustive des investissements qui se modifie automatiquement en fonction des variables précédentes et de la taille de la ferme, ce qui permet de calculer les dotations aux amortissements, les charges d'entretien, les charges financières...
- Les charges d'exploitation sont calculées automatiquement et permettent au modèle de renvoyer en sortie un bilan financier complet. Il est ensuite possible de créer une matrice du résultat d'exploitation (ou de tout autre indicateur de gestion), fonction de la taille de la ferme (nombre de cagettes dans l'exploitation ou production hebdomadaire d'algues commercialisables) et du prix de vente « sortie ferme ».

Cette matrice permet de prévisualiser quels types d'exploitations pourraient être viables dans un marché aujourd'hui inconnu (bien que les algues importées soient vendues entre 2500 et 3500 f cfp/kg, prix distributeur).

En R&D, cet outil modulable permet d'optimiser le protocole de culture en comparant de façon rationnelle différentes options culturelles dont les conséquences économiques sont complexes. Ce modèle, qui évolue à mesure que l'expérimentation lagunaire obtient des résultats fiables, contribue à répondre à des questions du type :

« Pour un fermier individuel exploitant une ferme offshore qui commercialise une centaine de kilogrammes d'algues par semaine, est-il préférable :

1. D'enrichir ses algues une fois par semaine en les maintenant à 3kg/m<sup>2</sup> ?
2. D'enrichir ses algues une fois par semaine en les maintenant à 5kg/m<sup>2</sup> ?
3. Que se passe-t-il s'il/elle décide d'enrichir toutes les deux semaines aux densités précédentes ?

Quelles conséquences sur son investissement initial, son temps de travail, son résultat ? Quel protocole proposer dans un guide de culture généraliste ? »

### 3.4.2 Un outil évolutif destiné à l'accompagnement des futurs algoculteurs

Une fois les données de production consolidées par un pilote (et plus tard par l'apport des fermiers accompagnés par la DRM), ce modèle évolutif aura tendance à se stabiliser sur l'aspect culturel : les modifications des coefficients techniques devraient être mineures. Dans un deuxième temps, les retours du marché et l'expérience des premiers porteurs de projet contribuera à affiner les variables commerciales (temps consacré au conditionnement, durée des livraisons, temps consacré à la communication, etc).

Le modèle économique affiné servira alors pour aider les futurs algoculteurs à concevoir leur entreprise, à adopter les pratiques culturales les plus adaptées à leur cas particulier, à concevoir un plan d'investissement approprié.

### 3.5 Aval

Les travaux sur l'aval de la production de *Gracilaria* sont indispensables pour que les fermiers puissent commercialiser leurs algues dans de bonnes conditions.

#### 3.5.1 Réglementation

La vente d'algues fraîches n'est pas encadrée spécifiquement en Polynésie. Les algues fraîches sont considérées comme des végétaux, ce qui signifie qu'il n'y a pas pour ces végétaux frais non transformés à établir une *Date Limite de Consommation* (DLC).

Le *Centre d'Hygiène et de Salubrité Publique* de la Polynésie française (CHSP) précise que la préparation et la commercialisation des denrées alimentaires d'origine végétale n'est pas soumise à la déclaration d'activité prévue à l'article 10 de la délibération 77-116 du 14 octobre 1977 portant réglementation de l'inspection des denrées alimentaires.

Le CHSP n'émet que des préconisations pour les denrées alimentaires d'origine végétale. Parmi ces préconisations, qui portent principalement sur les locaux et les pratiques, on notera : « Les denrées préemballées doivent être correctement étiquetées. [...] Sur les produits transformés, une date limite de consommation (DLC) ou une date limite d'utilisation optimale (DLUO) doit être indiquée. La fixation d'une DLC doit s'appuyer sur des résultats d'analyses microbiologiques. La mention sur l'étiquette du numéro TAHITI permet de satisfaire les exigences de traçabilité. »

Au cours du projet PROTEGE plusieurs préparations à base de *Gracilaria*, ont été élaborées : préparations aigres-douces surgelables, préparations vinaigrées à vendre fraîches (Ogo Namasu), algues séchées... Pour ces produits transformés, c'est à l'atelier de transformation de faire valider une DLC et une DLUO pour ses préparations auprès d'un laboratoire certifié. La DLC n'est valable que pour une préparation particulière émanant d'un processus propre à un atelier.

Dans le cas des algues fraîches emballées sans transformation, vu l'absence de réglementation, il a été décidé de se référer aux standards émis par la *Fédération du Commerce et de la Distribution* dans son document « Critères microbiologiques applicables à partir de 2020 aux marques de distributeurs, marques premiers prix

Les algues mises sur le marché doivent satisfaire aux critères relatifs aux métaux lourds et à l'iode figurant dans le tableau ci-dessous (CSHPF 01/1990; AFSSA 04/2009; Commission Européenne 07/2008):

**Tableau 2 : Teneurs maximales en métaux lourds et en iode autorisées en France**

		Algues légumes ou condiments en mg par kg sec			
Arsenic minéral		3			
Cadmium		0,5			
Mercure		0,1			
Plomb		5			
Etain		5			
Iode		2 000			

Salades non assaisonnées avec végétaux feuillus en quantité significative et ingrédients en contact	Clostridium perfringens*		30	30	1 ou 2	Critère à privilégier pour les produits à base de produits carnés.
	Bacillus cereus*		500	500	1	* Critère à retenir si produit à base de fécules et légumes cuits
	Salmonella		Non détecté /25g	Non détecté /25g	5	
	Listeria monocytogenes	Non détecté /25g*	Non détecté /25g*	100**	3***	* Ou dérogations prévues par le règlement (CE) n°2073/2005 ** Critère valable pour les produits de moins de 5j de conservation résiduelle sinon non détecté dans 25g ou dérogations prévues par le règlement (CE) n°2073/2005 *** Critère de sécurité Européen pour les produits destinés à être consommés en l'état, par défaut considéré en catégorie 1.2

51

Version du 15/11/2019 applicable à partir de Janvier 2020



et matières premières dans leur conditionnement initial industriel ». Ce document ne traite pas directement des algues, mais indique, pour les « salades non assaisonnées avec végétaux feuillus » :

Le *Centre d'Etude et de Valorisation des Algues* (CEVA), dans sa synthèse réglementaire de 2019, indique les teneurs maximales en métaux lourds :

Quant aux limites microbiologiques, elles n'encadrent que les produits secs :

A ces critères microbiologiques, il convient d'ajouter depuis 2006 *Listera monocytogenes* (absence dans 25g), qui concerne toutes les denrées alimentaires.

Historiquement, des recommandations avaient aussi été émises pour la qualité microbiologique des algues en sachet qui devaient respecter les critères suivants (CSHPF 01/1990; BID 1987):

**Tableau 3 : Critères microbiologiques pour les produits secs**

Germes aérobies mésophiles	≤ 10 <sup>5</sup> / gramme
Coliformes fécaux	≤ 10 / gramme
Anaérobies sulfitoréducteurs	≤ 10 <sup>2</sup> / gramme
<i>Staphylococcus aureus</i>	≤ 10 <sup>2</sup> / gramme
<i>Clostridium perfringens</i>	≤ 1 / gramme
<i>Salmonella</i>	absence dans 25 grammes

### 3.5.2 Conditionnement en frais, durée de vie organoleptique et microbiologique

Pour définir ce que serait l'aval d'une filière de production de *Gracilaria* (ou Rimu'Ura en tahitien), différentes méthodes de conditionnement en frais ont été testées.

Dans un premier temps, les différents protocoles de conditionnement ont été évalués sur des critères organoleptiques seuls (texture, couleur, goût, odeur). Différents conditionnements ont été testés : algues submergées ou égouttées en pot hermétique, en pot ventilé, en sachet sous vide, en sachet gonflé d'air, et c. Différentes plages de températures ont été essayées (réfrigéré, climatisé 20°, 25°, à température ambiante), ainsi que des luminosités différentes (obscurité totale, partielle, lumière naturelle) et diverses salinités (eau douce, eau de mer sursalée, saumure). Enfin, des essais de rinçages à l'eau chlorée (à l'instar de ce qui est autorisé pour les légumes) préalables au conditionnement ont été effectués.

Afin de mieux comprendre l'impact des microorganismes, des essais de conditionnement en présence de chlore (2ppm, 4ppm) ont été menés à des fins comparatives. Ces essais divers, conduits de janvier à octobre 2023, ont permis de retenir un protocole capable de conserver une qualité organoleptique impeccable pendant 7 à 10 jours.

Cette méthode consiste à égoutter 100g d'algues et à les enfermer dans un sachet hermétique. L'air contenu dans les sachets permet de surcroît de les empiler sans dommage. Ainsi conditionnées, les algues tiennent environ dix jours à température ambiante (25-30°C). Une température comprise entre 22 (à préciser) et 25°C abaisse la durée de vie organoleptique à environ 4 jours. En dessous de 20°C les algues se dégradent en moins de 48h.

La limite basse pour une durée organoleptiques de 4 jours n'est pas encore clairement identifiée mais se situe sans doute aux alentours de 22°C (l'identification de cette température limite devrait faire l'objet d'une expérimentation future dans une enceinte à température contrôlée).

Ces divers tests de conditionnement ont montré plusieurs choses intéressantes pour le Rimu'Ura :

- L'algue ne supporte pas la réfrigération. A moins d'avoir été intégrées dans une préparation vinaigrée, les algues fraîches ramollissent et deviennent roses/oranges en quelques heures au réfrigérateur.
- Des températures inférieures à 22°C provoquent le rosissement des apex en 24h, les algues fraîches devraient être conservées entre 25 et 30°C.
- Le rinçage des algues à l'eau douce provoque en quelques heures un rosissement des thalles et une perte de texture. A moins d'être consommées sur le champ, il est préférable de rincer les *Gracilaria* à l'eau de mer.
- La congélation permet de conserver le croquant et la couleur des algues, des essais de conservation longue durée après surgélation sont à projeter,
- Le saumurage et la conservation dans de l'eau de mer sursalée ne fonctionnent pas (cette dernière solution est employée avec succès pour la caulerpe).
- La conservation au sel, employée avec les ulves et le dulce (salaison humide), provoque une coloration orange, une perte totale de texture.
- La conservation des algues submergées dans de l'eau de mer à 500g/l permet de conserver les algues vivantes pendant plusieurs semaines (voire plusieurs mois), mais induit une forte odeur de sulfite-réduction rédhibitoire qui ne s'élimine pas par simple rinçage.

La méthode simple de conditionnement des algues fraîches par ensachage hermétique et stockage à 25-30°C a donné les meilleurs résultats organoleptiques. Les algues conservent une qualité totale pendant 4 jours même si la température passe régulièrement en dessous de 20°C. Si la température est parfaitement maintenue entre 25 et 30°C, cette durée de vie peut atteindre deux semaines. Cependant, si la qualité

organoleptique est maîtrisée sur cette durée, qu'en est-il de la qualité microbiologique ? Un simple rinçage par le consommateur permet-il d'éliminer correctement les microorganismes potentiellement pathogènes qui auraient pu se développer dans le sachet ?

C'est pour répondre à ces questions, a priori facultatives vu la réglementation en vigueur, que des analyses microbiologiques ont été menées sur les algues égouttées ensachées, avant et après rinçage.

Le bilan de ces analyses pour la flore totale aérobie, informe que pour des algues non rincées, la limite pour ne pas dépasser  $10^5$  UFC est de quatre jours. Au-delà de quatre jours, la flore aérobie excède cette limite (définie pour des produits secs). Si on se réfère aux limites de la FCD pour les légumes ( $10^7$ UFC), alors les algues ensachées non rincées sont consommables jusqu'à 7 jours. Néanmoins, vu que des dégradations organoleptiques peuvent être observées à partir du cinquième jour si la température n'est pas maîtrisée, et vu que les algues conditionnées dépassent  $10^5$  UFC à partir du cinquième jour, il semble pertinent ne pas commercialiser le Rimu'Ura au-delà de quatre jours après son ensachage. Ainsi, un producteur pourrait réaliser deux livraisons par semaine, par exemple les lundis et vendredis, afin d'assurer la fourniture d'algues fraîches n'excédant pas quatre jours en rayon. Les invendues, des algues vivantes parfaitement cultivables, peuvent être récupérées par le producteur et réintroduites dans les cultures afin d'éviter les pertes.

Les tests sur l'ensemble des pathogènes, menés à 0 et 4 jours sur des algues non rincées, ont permis de valider le processus de conditionnement en eau brute réalisé à Vairao.

Microbiologie générale					
Micro-organismes	(c)	NF EN ISO 4833-1	61 000	UFC/g	
Bactéries lactiques mésophiles	(c)	NF ISO 15214	< 1 000	UFC/g	
Coliformes thermotolérants	(c)	NF V 08-060	< 10	UFC/g	
Staphylocoques à coagulase positive	(c)	Rapid'Staph Nordval 049	< 100	UFC/g	(1) 100
Bactéries sulfitoréductrices	(c)	NF V 08-061 (méthode en tube)	< 10	UFC/g	
Clostridium perfringens	(c)	NF EN ISO 7937	< 10	UFC/g	
Bacillus cereus présomptifs	(c)	BKR 23/06-02/10	< 100	UFC/g	
Salmonella spp.	(c)	BRD 07/11-12/05	Absence	/25g	(1) Absence
Listeria monocytogenes (recherche)	(c)	BKR 23/02-11/02	Absence	/25g	

Pour d'autres fermes, et notamment pour les sites très anthropisés, il est recommandable de procéder à ces analyses complètes avant d'envisager la mise sur le marché. Ces analyses devraient être conduites régulièrement, peut-être tous les ans et après des épisodes de fortes précipitations. Dans le cas où des pathogènes seraient détectés au-delà des seuils réglementaires, un rinçage à l'eau biosécurisée (filtration mécanique suivie d'un traitement aux UV) pourrait être requis.

### 3.5.3 Analyses nutritionnelles et métaux lourds

Les analyses nutritionnelles ont été réalisées en France par le laboratoire Labocéa (résultats complets en annexe). Les résultats indiquent :

- 3% d'azote total, l'extrapolation à 19.8% de protéines par calcul (multiplication de N% par 6,5) est sans doute erronée. Pour les prochaines analyses, les protéines devraient être quantifiées par la méthode de Lowry. Vu la teneur totale en acides aminés mesurés (11,52g/100g), il est plus vraisemblable que le pourcentage de protéines soit compris entre 12 et 13%.
- Un profil en acides aminés essentiels complet (35% d'acides aminés essentiels, 28.7% requis dans l'alimentation humaine), tous les acides aminés essentiels sont présents à des pourcentages supérieurs à ceux de la protéine complète de référence,
- Une teneur importante en minéraux,
- Des teneurs en métaux lourds et en iode conformes aux normes françaises.

Les algues analysées sont issues de cultures lagunaires, récoltées une semaine après enrichissement. Il aurait été intéressant de pouvoir analyser des algues issues du stock sauvage, ainsi que des algues cultivées selon d'autres protocoles (bacs, intervalles d'enrichissement plus long). Enfin, les vitamines n'ont pu être analysées vu les difficultés pour exporter l'algue fraîche.

#### 3.5.4 Communication

Les gracilaires ne sont pas connues en Polynésie française, contrairement à Hawaï'i, où le « Limu Manauea » (aussi qualifiée par son nom japonais « Ogo » ou « Ogonori »), consommé traditionnellement, fait toujours partie de l'alimentation quotidienne.

La *Gracilaria* n'étant pas connue à Tahiti, un nom vernaculaire lui a été attribué : Rimu'Ura (Algue - Rouge).

En février 2023, une mission d'une semaine à Oahu et à Hawaï'i, financée par PROTEGE, a permis à deux agents de la DRM de découvrir sur place les habitudes alimentaires à base d'algues, les produits transformés à base de *Gracilaria*, ainsi que les façons de la produire.

A Hawaï'i, l'algue est surtout consommée fraîche avec le poisson cru (Poké). Les supermarchés et les poissonneries comprennent toujours un présentoir proposant une douzaine de Pokés différents, dont 30 à 50% comprennent du Rimu'Ura haché. En supermarché, il n'est pas rare de trouver ces algues dans des préparations vinaigrées : « Ogo Namasu » et « Ogo Kim Chee », qui se vendent entre 30 et 50\$/kg. L'algue fraîche est vendue en vrac en poissonnerie à 20\$/kg.

La façon de manger l'Ogo à Hawaï'i est donc parfaitement compatible avec la cuisine polynésienne contemporaine, dans laquelle le poisson cru occupe une place prépondérante. La vogue planétaire du Poké, perceptible à Tahiti, devrait favoriser l'introduction du Rimu'Ura en Polynésie française.

Par ailleurs, la proximité culturelle forte avec les voisins hawaïens, qui se traduit par des échanges abondants, orientés vers la réappropriation commune de pratiques ancestrales (navigation, arts, danses traditionnelles, spiritualité) ne peut que favoriser l'appropriation du Rimu'Ura à Tahiti, où existe un fort désir de reconnexion identitaire via la réintroduction vivante et évolutive de pratiques ancestrales dans la vie quotidienne contemporaine.

Enfin, les analyses nutritionnelles effectuées permettent aujourd'hui d'attribuer objectivement une image de « super-aliment » au Rimu'Ura.

Néanmoins, la consommation du Rimu'Ura devrait se heurter à plusieurs difficultés :

- L'aliment est inconnu, et personnes ne sait le préparer,
- Il s'agit d'un végétal, qui souffre au même titre que les légumes d'une culture de « malbouffe » bien ancrée,
- Chez certains, les algues provoquent un certain dégoût,
- Les algues souffrent parfois d'une image « snob » qui se confond avec un imaginaire « Végan » ou « BOBO », qui réduit les algues à un exotisme élitiste.

Pour accompagner l'introduction du Rimu'Ura sur le marché, un livre de recette sera édité et diffusé largement en 2024. Ce livre de recettes sera fondé sur une douzaine de recettes, élaborées entre 2022 et 2023 par la DRM à partir de préparations existantes ou originales. En 2023, un « concours de cuisine » organisé dans l'équipe « aquaculture » de la DRM, ainsi que le partage d'algues avec un chef de Vairao, ont permis l'émergence de préparations originales.

L'objectif avec ce livre de recettes est d'introduire les algues rouges au consommateur polynésien, de lui donner des idées tout en faisant en sorte que le Rimu'Ura échappe à l'image de produit exclusif « snob ». Le

but est qu'il soit identifié comme un produit de consommation courante qui s'insère naturellement dans la cuisine polynésienne contemporaine. Il ne s'agit pas de proposer un aliment exotique compliqué à cuisiner, les ingrédients choisis dans le livre seront donc tous faciles à trouver dans n'importe quel magasin. Ce livret, qui devrait être épinglé sur les sachets d'algues fraîches, doit inspirer quelques recettes nouvelles pour le consommateur, mais surtout lui montrer que le Rimu'Ura n'est qu'un accompagnement à associer au poisson cru sous toutes ses formes.

En plus de recettes, des transformations simples ont été testées : congélation, séchage, préparations vinaigrées, préparation surgelable destinée à copier les Wakamé aigre-doux importés, et c. Ces idées de transformations pourraient servir de base au développement de produits divers à base de Rimu'Ura.

### 3.6 Taxonomie et invasivité

Au début de PROTEGE, une seule espèce de *Gracilaria* était connue en Polynésie française : *Gracilaria parvispora*. Lors des recherches à Moorea et Tahiti en 2021, deux gracilaires différentes ont été trouvées sans que l'on sache avec certitude s'il s'agissait d'une manifestation aigue de polymorphisme ou de deux espèces différentes (les gracilaires peuvent présenter des morphologies très contrastées en fonction de leur environnement ou des conditions de culture).

En 2023, une liste révisée des espèces d'algues présentes en Polynésie française, paraît dans *Biology*.<sup>4</sup>

En Polynésie, six espèces de *Gracilaria* sont identifiées, dont quatre par séquençage et deux par identification traditionnelle. Sur ces six espèces, une serait endémique. Il s'agirait des quelques dizaines de grammes d'algues prélevées à Moorea en octobre 2021. La *Gracilaria* prélevée à Tahiti en 2021 et cultivée à la DRM depuis est *Gracilaria caudata*, une espèce qui n'est pas indigène du Pacifique, mais de l'Atlantique Sud occidental.

Cette découverte interroge :

- Cette algue, qui n'est pas indigène, a-t-elle été introduite récemment en Polynésie ?
- Quel est son potentiel d'invasivité ?
- Peut-on la remplacer dans les cultures par une espèce indigène ou endémique ?

Depuis que les stocks d'algues cultivées à Vairao ont atteint plusieurs centaines de kilogramme courant 2022, le site de la concession marine a été surveillé mensuellement pour vérifier qu'il n'y avait pas de prolifération excessive dans le milieu naturel. Cette surveillance s'est effectuée particulièrement sur les zones reconnues comme étant potentiellement propices aux gracilaires :

- Talus sablo-vaseux proche d'une embouchure située à une centaine de mètre du site lagonaire,
- Enrochement à la sortie des effluents des bacs de stockage (contenant entre 200 et 300 kg d'algues),
- Cordages et bouées à l'intérieur et à proximité de la concession marine,
- Embouchure de la rivière Vavi, où l'algue de Moorea a été identifiée en 2022.

En deux ans, il n'a jamais été observé plus d'une demi-douzaine de thalles, fixés à proximité immédiate des cagettes, en général sur les cordages ou les structures flottantes. Ces thalles ne persistaient pas plus de quelques semaines et étaient remplacés par d'autres algues (ulves, caulerpes, *Grateloupia*), elles-mêmes présentes quelques semaines avant d'être remplacées.

---

<sup>4</sup> Vieira, C.; Kim, M.S.; N'Yeurt, A.D.R.; Payri, C.; D'Hondt, S.; De Clerck, O.; Zubia, M. Marine Flora of French Polynesia: An Updated List Using DNA Barcoding and Traditional Approaches. *Biology* 2023, 12, 1124. <https://doi.org/10.3390/biology12081124>

Quant au stock sauvage connu, d'une trentaine de kilogrammes en 2021, il ne restait plus que quelques thalles début 2022. Depuis mai 2022, moins d'une dizaine de kilogrammes semble se maintenir.

Le potentiel d'invasité de *Gracilaria caudata* dans les eaux polynésiennes paraît faible, pour diverses raisons :

- L'algue en milieu oligotrophe est incapable de croître sans apport azoté exogène au bout de trois semaines. Son développement n'est possible que dans des zones régulièrement eutrophes. Or, ces zones sont le plus souvent soumises à des dessalures importantes auxquelles *Gracilaria caudata* n'est pas adaptée, comme l'a montré l'essai de culture à différentes salinité conduit en bac de 50l avec *Cladophora*. Tous les essais de culture sans apport azoté majeur, que ce soit en lagon ou en bassin-terre, se sont soldés par une stagnation puis une diminution des biomasses.
- *Gracilaria caudata* est une algue privilégiée par les poissons herbivores, à tel point qu'un banc de Marava (*Siganus argenteus*) s'est établi durablement sous les cagettes lagunaires expérimentales. Ces poissons s'approchent des cagettes dès qu'un agent les manipule, afin de consommer les apex qui dépassent à travers les mailles.

Le potentiel invasif de *Gracilaria caudata* paraît donc faible. Néanmoins, il est primordial de conserver une attitude prudente, par la surveillance régulière du lagon à proximité des cultures et plus généralement par le suivi des populations naturelles à Tahiti et dans les îles. Enfin, le transfert de *Gracilaria caudata* dans d'autres îles que Tahiti devrait être limité tant que son écologie n'est pas mieux comprise.

En 2022, la découverte à l'embouchure de la rivière Vavi (à 1km de la concession marine de la DRM à Vairao) d'une *Gracilaria* similaire au morphe de Moorea a permis de mettre en culture en bullage libre quelques dizaines de grammes de cette nouvelle espèce, qui serait endémique. La culture en bullage libre de cette espèce a permis d'obtenir une dizaine de kilogrammes en 2023. Si la culture en bullage libre en bac est correcte, malgré des croissances initiales très faibles, la culture lagonaire en cagette s'est systématiquement soldée par la perte totale des algues en une semaine. Il n'existe donc pas encore aujourd'hui une espèce de gracilaire indigène connue capable de remplacer *caudata* en culture.

### 3.7 Autres espèces cultivées

Les autres espèces d'algues testées en culture pendant PROTEGE sont :

- *Grateloupia filicina*, suite à l'observation de bassins en bullage libre de cette espèce à Hawai'i. Les tests préliminaires en bassins de 50l n'ont pas permis d'augmentation franche de la biomasse. Il serait intéressant de reprendre les essais de façon plus approfondie (bullage moins fort, enrichissement dosé différemment) car la culture de cette algue pourrait être réalisée suivant un protocole très proche de *Gracilaria*. La polyculture contribuerait à augmenter la résilience des fermes.
- *Codium geppiorum* (identification à confirmer), d'abord cultivé en bullage libre, le *Codium* est aujourd'hui cultivé dans des poches en grillage PEHD. Les thalles sont taillés à ras de la maille toutes les trois semaines pour la récolte et l'ensemencement de nouvelles poches. Le *Codium* est cultivé principalement en Corée du Sud, sur cordages ensemencés par éclosion végétative. Cette espèce est intéressante pour sa capacité de reproduction végétative illimitée ainsi que ses besoins faibles en azote, qui permettent d'envisager un itinéraire technique sans phase d'enrichissement. Des essais sont en cours pour valider la culture sur poches et en bullage libre en bacs. En 2024, l'objectif est de tester la culture des poches dans les mêmes cagettes que *Gracilaria*. Le *Codium*, s'il n'a pas un aspect aussi attrayant que le Rimu'Ura, est une algue savoureuse, appréciée aux Marquises et à Hawai'i, où il est cueilli sur les côtes rocheuses.

## 4 Perspectives *Gracilaria*

### 4.1 Culture lagonaire

#### 4.1.1 Structure de R&D flottante autonome

Le développement de l'itinéraire de culture lagonaire a été confronté entre 2022 et 2023 au démantèlement des bacs d'enrichissement à terre, ce qui a empêché de pérenniser des essais de longue durée indispensables pour améliorer l'itinéraire technique et consolider le modèle économique avec des données fiables.

En 2024, la destruction du principal bâtiment de R&D dont dispose la DRM devrait empirer la situation. Le stock de *Gracilaria* qui alimente les différentes expérimentations est hébergé depuis 2022 par les EPV, dans deux bassins de 15m<sup>3</sup>. Des travaux de fiabilisation des EPV, prévus pour 2024-2025, menacent également ce stock d'algues indispensable pour une reprise rapide des expérimentations.

Par conséquent, en 2023, pour assurer la continuité du développement de l'algoculture, des achats importants ont été réalisés pour déployer dans la concession lagonaire de la DRM à Vairao une structure flottante autonome de R&D complètement indépendante des EPV et des bâtiments terrestres de la DRM.

Cette structure flottante, qui sera amarrée à 4 corps-morts de 3 tonnes et 6 corps-morts de 800kg, comprendra :

- Une barge en aluminium, équipée de 2500W de panneaux solaires et 30kWh de batteries gel. Ce kit électrique autonome permettra d'alimenter les soufflantes, les éclairages et un nettoyeur haute-pression électrique. Afin de minimiser la consommation énergétique, un automate open-source (composants et programmes) permettra de réguler l'aération intermittente des cultures via une dizaine d'électrovannes.
- Dix bacs d'enrichissement immergés d'1m<sup>3</sup>, disposés dans une structure flottante en « jetfloats », serviront pour maintenir jusqu'à dix conditions expérimentales séparées pour les expérimentations lagonaires.
- Quatre bacs de 8m<sup>3</sup> immergés, disposés dans une structure flottante en « cubisystems » serviront pour :
  - L'enrichissement des algues des filières pilotes et des cultures des porteurs de projets hébergés sur site le temps de leur formation,
  - Le stockage des algues, en remplacement ou complément des bacs de 15m<sup>3</sup> des EPV.
- Des filières déployées en étoile depuis la barge, pour accueillir les cagettes de culture.

#### 4.1.2 R&D

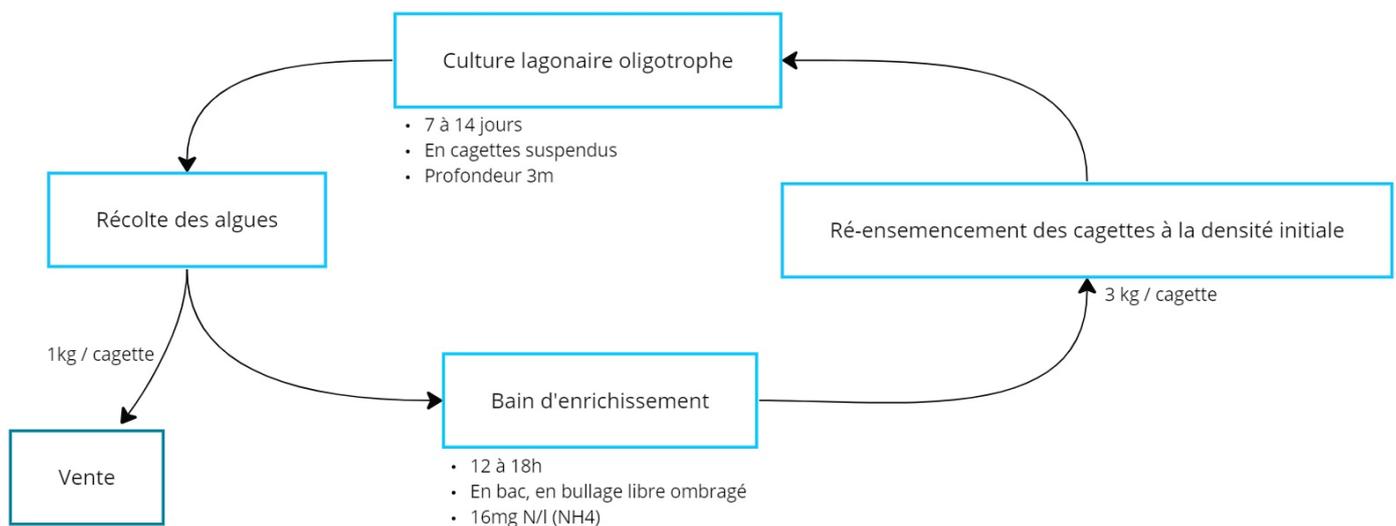
Les travaux de R&D qui seront menés grâce à cette structure flottante sont :

- Des expérimentations de culture en cagettes lagonaires de plusieurs mois, pour affiner les paramètres de culture : densité optimale, fréquence de balnéation, fréquence d'agitation manuelle, profondeur des cagettes (dont tests de profondeurs variables).
- Des essais de culture multisites, afin de définir les zones propices à l'établissement de fermes. Ces essais seront menés dans des environnements divers : oligotrophes/eutrophes, agité/peu agité, en baie fermée, en zone récifale, en zone lagonaire profonde, sous le courant d'élevages aquacoles, et c. Des sondes courantomètres commandées en 2023 ainsi que les sondes PAR commandées en 2022 devraient contribuer, avec le suivi quotidien des nutriments, à une caractérisation objective des sites étudiés.
- Des essais pilotes continus, menés avec l'itinéraire technique retenu en conditions réelles de production afin d'obtenir des données technico-économiques consolidées (mesure du temps nécessaire à

l'enrichissement, à la maintenance des filières, au conditionnement des algues, et c.) et valider ainsi le protocole de production sur plusieurs années.

- L'optimisation et la fiabilisation du système d'enrichissement autonome en bac immergé, qui doit à terme autoriser le déploiement de fermes lagunaires indépendantes du foncier littoral. Cet aspect de la R&D lagunaire comprend : l'optimisation de la fréquence d'aération séquentielle pour réduire la consommation énergétique, la validation des bacs d'enrichissement (renouvellement par airlift, système de récolte des algues par le fond ou par épuisette, pose d'un filtre vert).
- L'amélioration de l'ergonomie générale : mise en place d'une méthode volumétrique simple pour quantifier les algues manipulées par les fermiers, essai de filières à profondeur variable, essai de filières submergées (les filières actuelles sont flottantes, avec cagettes suspendues, et constituent donc une entrave à la navigation).

Schéma des grandes étapes de l'itinéraire technique :



#### 4.1.3 Transfert

La structure en mer est prévue pour avoir la capacité d'accueillir les filières de porteurs de projet, en plus des filières de R&D et de la ferme pilote. Les porteurs de projet seront initialement formés à la culture du Rimu'Ura sur les filières pilotes, avant de pouvoir initier leur activité sur une filière DRM. L'idée est de leur permettre de débiter une activité et tester la mise sur le marché des algues sans avoir à supporter un investissement risqué, dans la mesure où le produit est nouveau et le protocole de culture récent, et sans avoir à attendre l'obtention d'une concession marine propre. Cette étape tremplin sur la barge DRM permettra au futur algoculteur de continuer à se former, de vendre ses premières productions et ainsi de s'assurer que son projet est viable (techniquement, personnellement, financièrement) avant d'investir et en attendant d'obtenir une concession.

Pour la DRM, ce dispositif permet également d'obtenir des données de mise sur le marché des algues, d'avoir aisément le retour des entrepreneurs, et ainsi de continuer à concevoir un projet de développement de l'algoculture qui soit réaliste.

Pour chaque porteur de projet, le transfert serait réalisé en différentes étapes successives :

- Formation sur les filières pilote et R&D de 15 jours (participation à toutes les opérations sur la plateforme), formation théorique sur les algues (biologie, histoire, contexte, culture),



- Le taux de renouvellement seuil non limitant en croissance à cette densité optimale (avec suivi du pH pour déterminer à quel moment le carbone devient limitant en croissance),
- L'aération séquentielle, pour réduire les coûts électriques.

Une fois le protocole de culture en bac optimisé, il sera possible de travailler sur la bioremédiation.

#### 4.2.2 Bioremédiation

Les essais en bioremédiation par le Rimu'Ura débuteront vraisemblablement en 2025, après la définition d'un protocole de culture optimisé en bacs.

Les six bacs de 1,5m<sup>3</sup> seront équipés de façon à recevoir les effluents (filtrés mécaniquement et peut-être biologiquement) d'un élevage de crevettes produites conformément au protocole intensif qui sera le plus usité sur la *Zone Biomarine de Faratea*.

L'objectif de ces essais sera de déterminer le temps de rétention hydraulique nécessaire pour éliminer l'essentiel des formes azotées minérales grâce à des cultures de Rimu'Ura à densité optimale en aération intermittente.

La mesure des concentrations des différentes formes azotées à tous les niveaux du système de culture (azote tissulaire dans les algues, mesures de concentration des formes minérales dissoutes, azote organique, et c.) devrait permettre d'établir des coefficients d'absorption et de conversion utiles pour modéliser et dimensionner des unités de bioremédiation adaptées aux besoins des exploitants de Aruhotu.

#### 4.3 Aval

Les analyses nutritionnelles doivent être poursuivies sur les algues cultivées selon différents protocoles et comparées aux algues sauvages, afin de mieux comprendre les conséquences de l'itinéraire de culture sur la qualité nutritionnelle des algues.

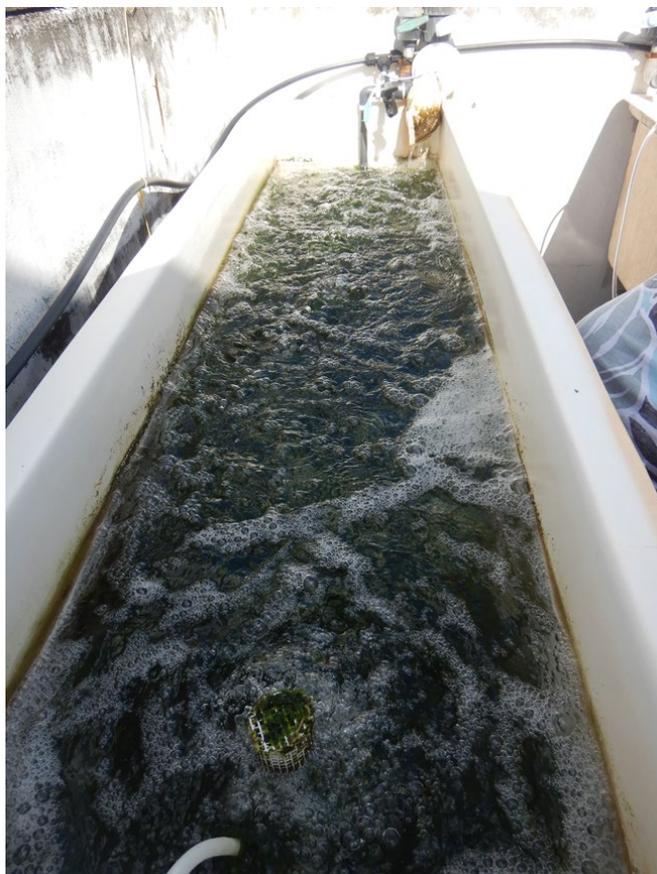
Les analyses sur les métaux lourds devront être conduites sur chaque nouveau site fermier pour garantir au consommateur l'innocuité des produits. De la même manière, les analyses microbiologiques effectuées sur les algues de Vairao devront être effectuées régulièrement sur les nouveaux sites fermiers.

Le recrutement ponctuel (6-12 mois) d'un chargé de communication est envisagé pour accompagner le démarrage de la filière au moment où les premiers porteurs de projet commenceront à commercialiser leurs algues. Ce chargé de projet aurait la charge de promouvoir le Rimu'Ura sur les réseaux sociaux, lors de salons, au cours de dégustations ou d'évènements en partenariat avec des chefs cuisiniers et pourrait participer à la création de supports de communications (QR code à coller sur les sachets pour découvrir des recettes, clips vidéo, et c.).

#### 4.4 Diversification

Le développement de méthodes de culture pour diverses espèces algues capables de reproduction végétative devraient être poursuivis, en particulier avec le *Codium* qui est prometteur, afin d'augmenter la résilience des fermes face aux maladies en les orientant progressivement vers la polyculture. Cette diversification devrait aussi permettre de diversifier les marchés.

## 6 Annexes Photos



*Ulva en bullage libre*



*Ulva en bullage libre*

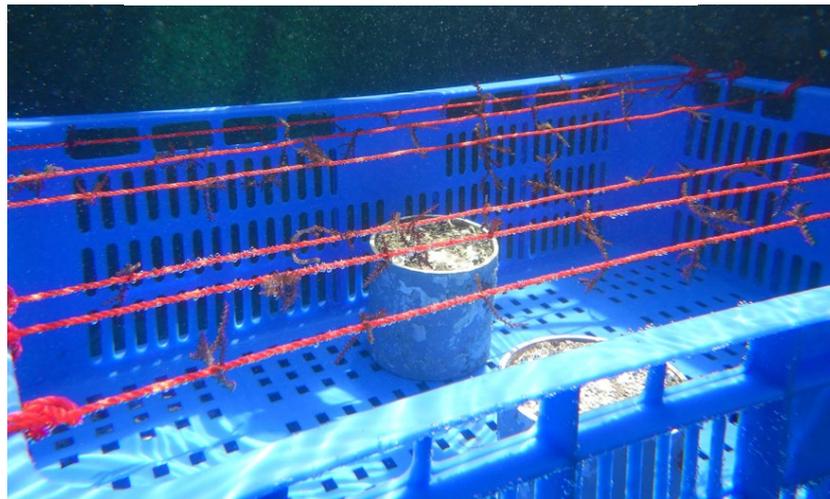


*Pesée et travaux de routine dans la zone « macroalgues »*





*Acanthophora, maintien de souches*



*Acanthophora, essai de thalles amarrés sur cordages*



*Acanthophora en bullage libre*



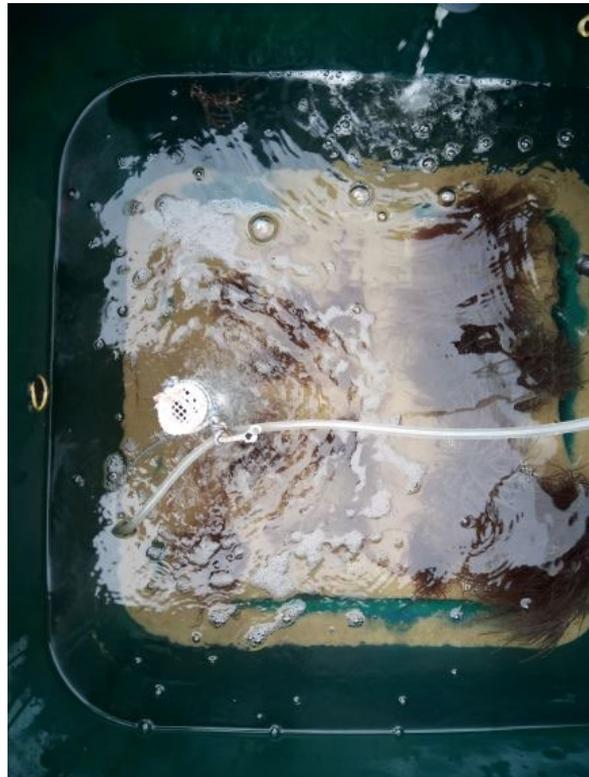
*Recherche de Gracilaria à Moorea*



*Stock sauvage de Faa'a*



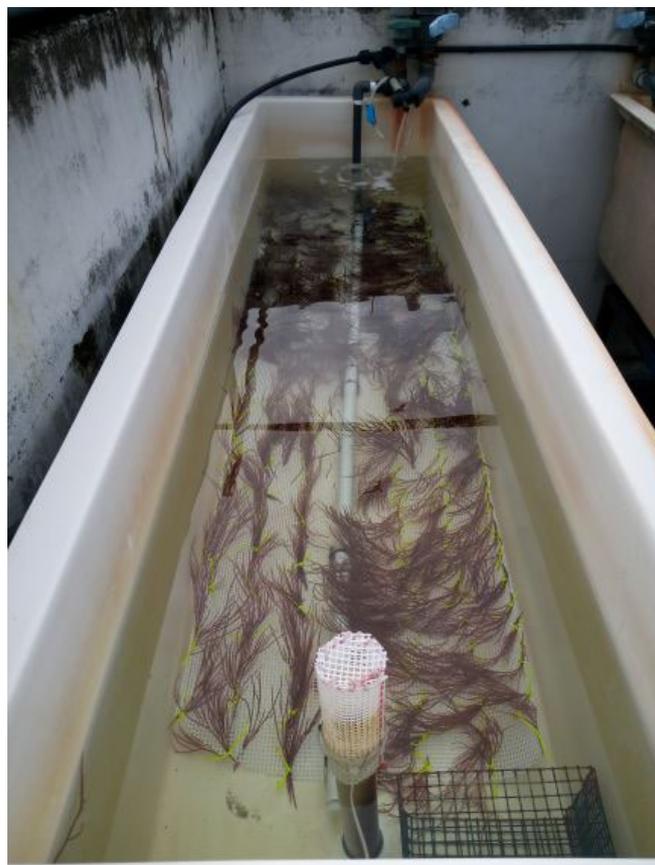
*Stock sauvage de Faa'a*



*Essai de culture sur sable*



*Gracilaria en bullage libre*

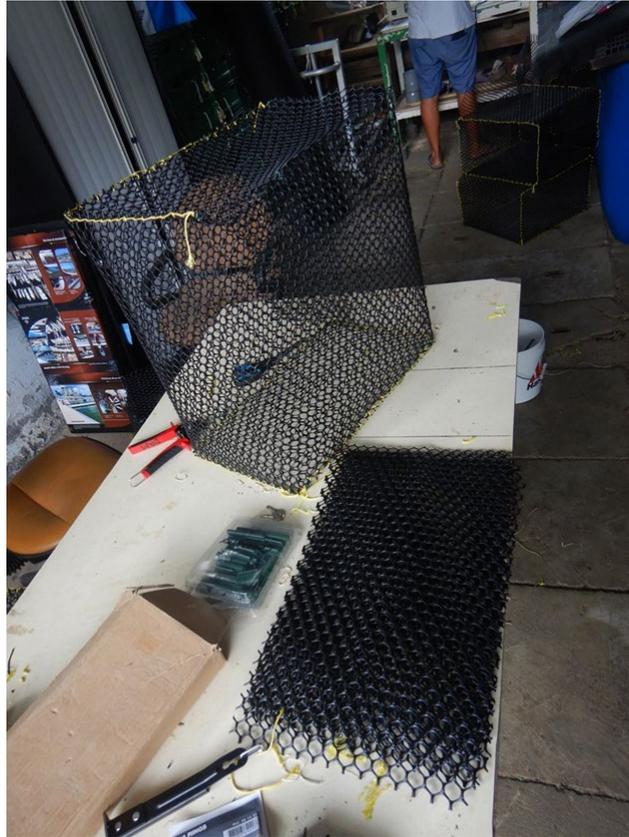


*Gracilaria sur treille*



*Bacs de bullage libre ombragés*





*Cagettes de première génération*



*Premier essai lagonaire*





*Essai de mailles tubulaires*





*Rimu'Ura prêt au conditionnement*



*Exemples de préparations à base d'Ogo à Hawai'i*



*Ogo à vendre en vrac, Oahu*



*Blanchiment pathologique « Ice-ice »*



*Algues surexposées*



*Contamination par des algues vertes*



Tris



*Expérimentation lagonaire de février 2022*



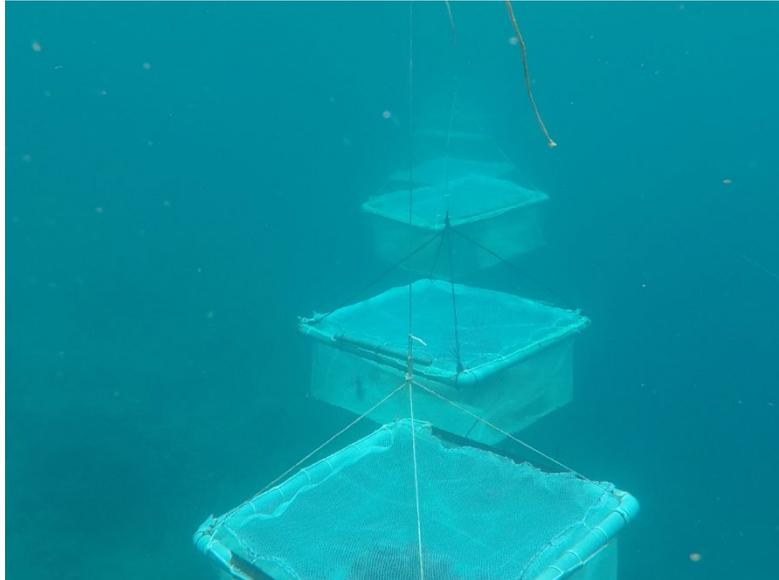
*Cagettes flottantes à maille de 5mm*



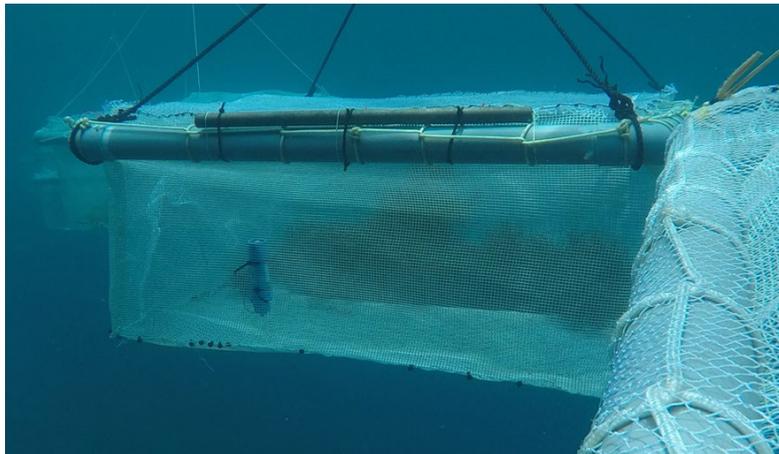
*Cadres flottants en PVC*



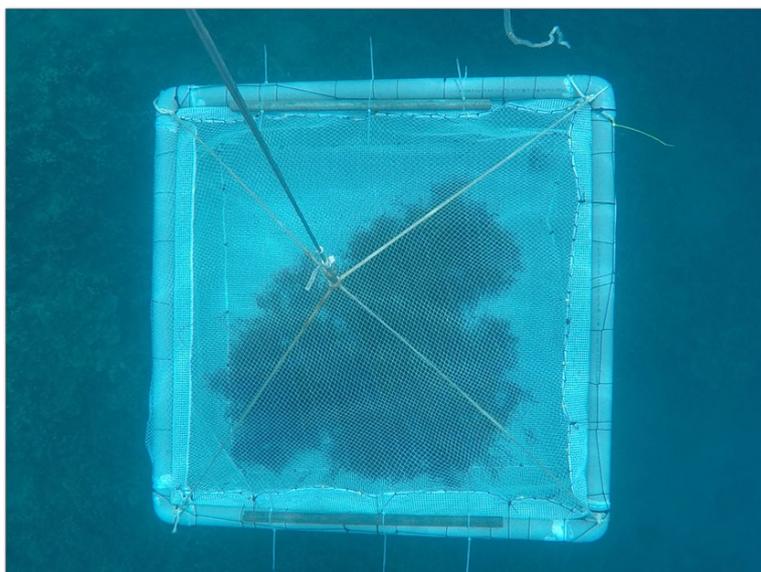
*Contamination critique*



*Cagettes coulées à 3m*



*Cagette équipée d'un capteur « PAR »*





*Filières expérimentales*



*Système d'aération dans un bassin de 15m<sup>3</sup> cylindrique*



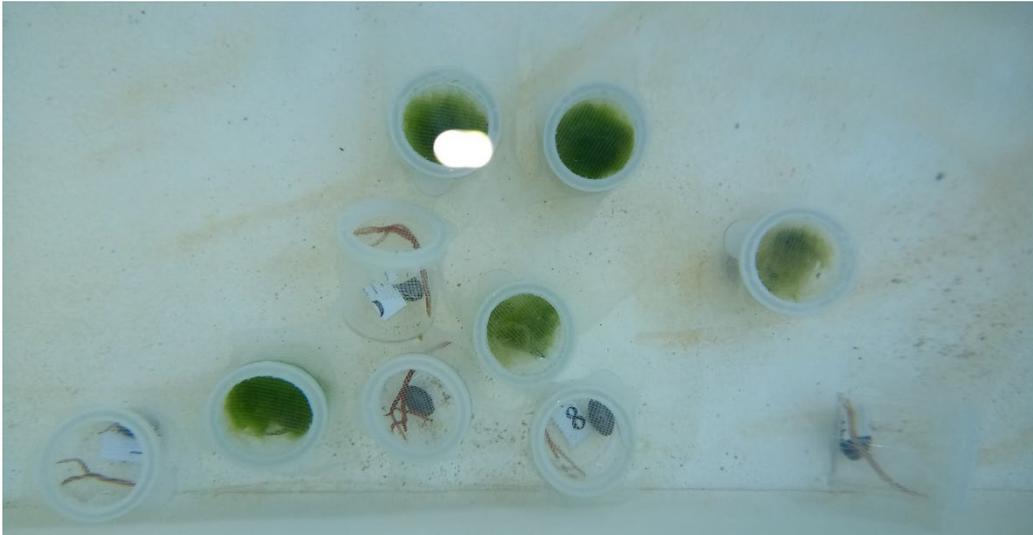
*Bassin de 15m<sup>3</sup> sous ombrage 85%*



*Bac de 2m<sup>3</sup> sous tôles vertes*



*Piscine de 12m<sup>3</sup> sous voile vert*



*Essais de différents traitements curatifs sur des thalles isolés de Gracilaria et de ses épiphytes*

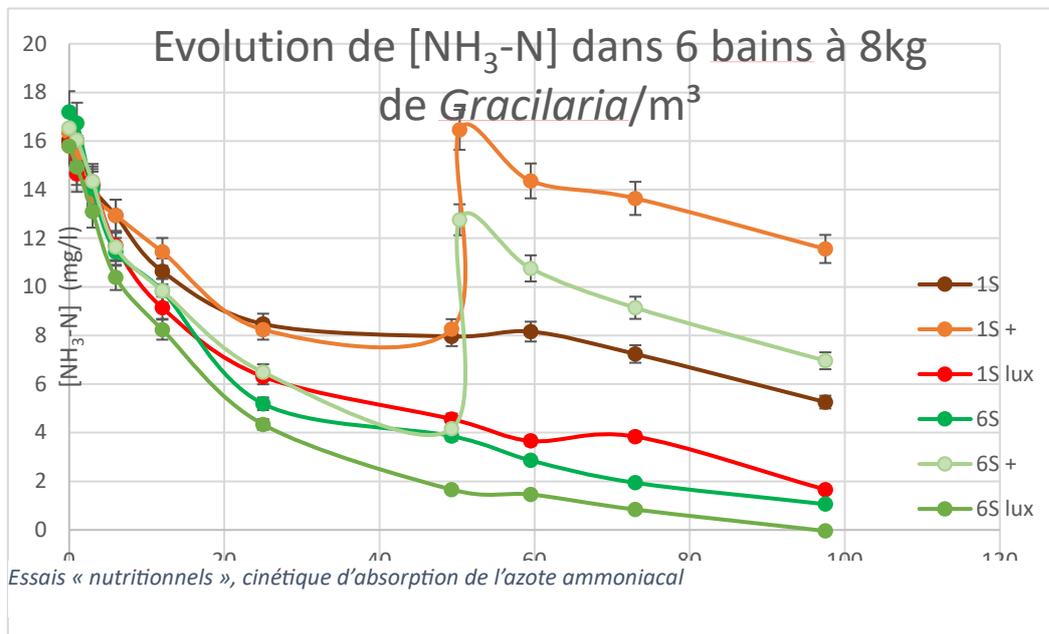




*Action nettoyante d'Aplysies sur Cladophora*



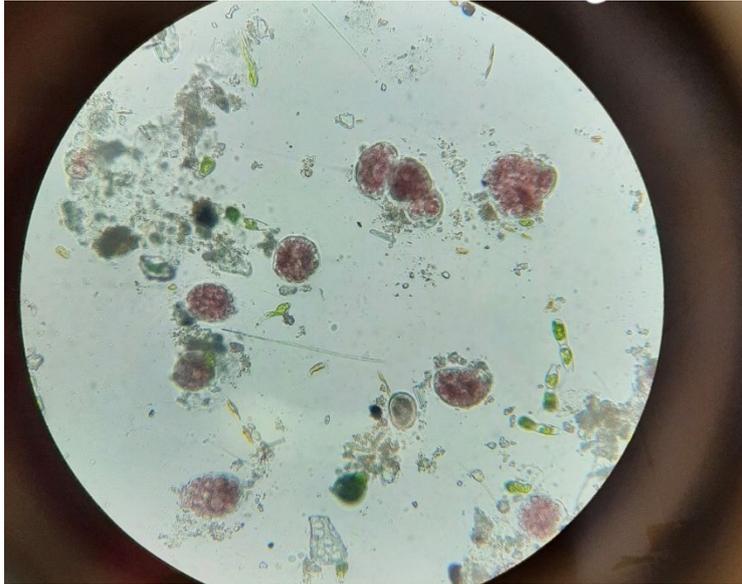
Essais de cultures à différentes salinités en bacs de 50l



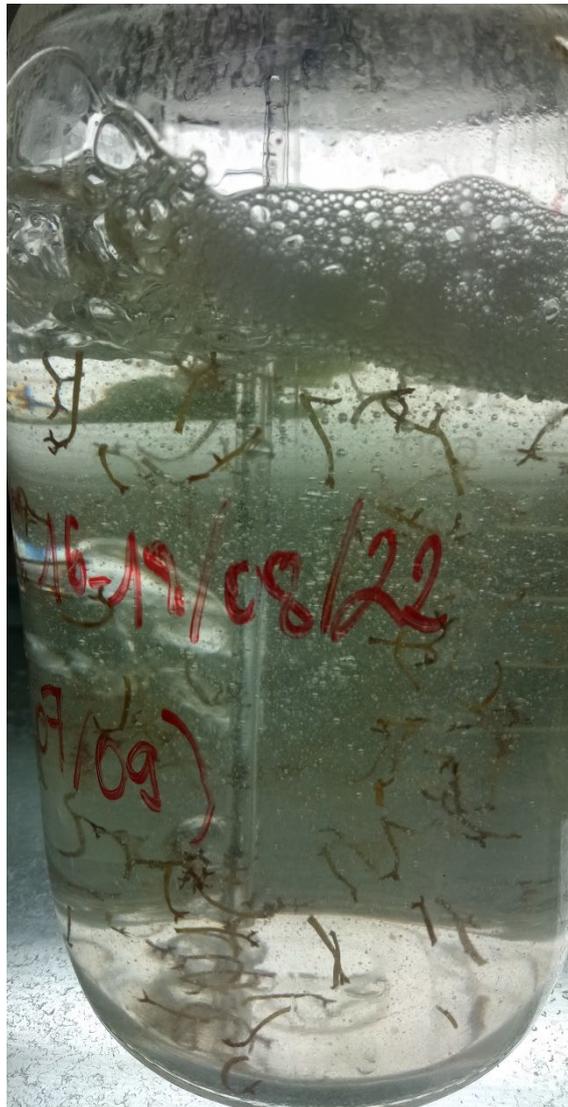


*Captage de spores sur différents substrats*





*Observation de spores fixés sur lame de verre*



*Essai d'éclosion végétative*



*Contamination par des cyanobactéries et des diatomées*



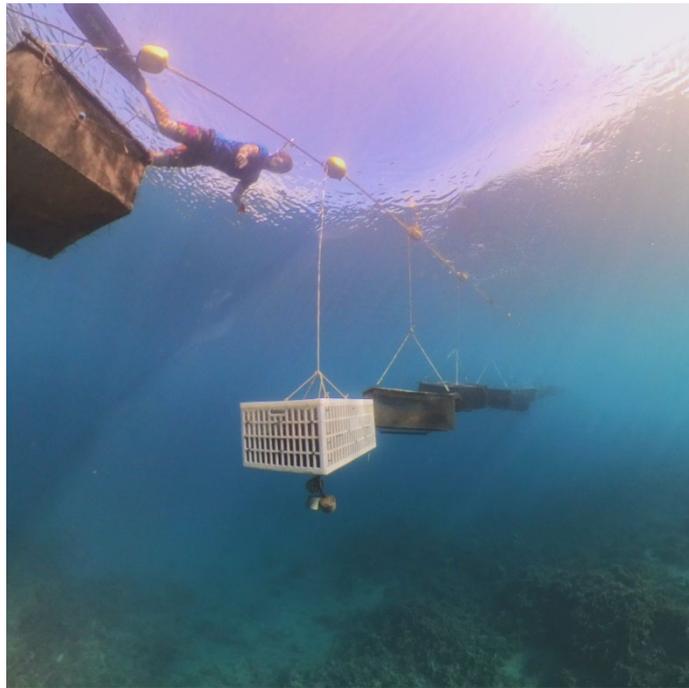
*Construction de prototypes de cagettes commerciales*



*Prototypes de cagettes commerciales*



*Cagettes carrées cousues*



*Cagette avicole en test*



*Cagettes carrées cousues, suspendues à 3m*



*Test de systèmes d'enrichissement immergés*



*Construction du prototype à partir d'une citerne de stockage des eaux pluviales d'1m<sup>3</sup>*

hypothèses de production	
Productivité hebdomadaire (kg/semaine)	0,7
Masse d'algue initiale dans les cagettes (kg)	3
Intervalle entre bains (semaines)	2
Nombre de cagettes dans la ferme	140
Production hebdomadaire (kg)	98
Stock d'algues en cagettes (kg)	420

Résultat	
CA	9 172 800,00
Charges d'exploitation	4 368 242,97
Dotation aux amortissements	927 657,78
Total charges exploitation	5 295 900,75
<b>Résultat d'exploitation</b>	<b>3 876 899,25</b>
Charges financières	499 542,54
<b>Résultat courant avant impôt</b>	<b>3 377 356,71</b>

Type de vente	internalisée
Embarcation	déjà propriétaire
Véhicule de livraison	déjà propriétaire
Type de ferme	offshore
électricité	soilaire

Exemple d'interface « hypothèses » du modèle financier

Salaires					
Durées unitaires		Temps de travail hebdomadaire(h)		Temps de travail total (h/sem)	49,83
Agitation quotidienne (/cagette/j)	0,50		5,83		
Bain hebdomadaire (/cagette/sem)	10,00		16,67	Nombre employés requis	1,00
préparation commerciale(/kg)	10,00		11,67	Salaires mensuel unitaire SMIC	224 980,47
Tournée commerciale (h)	6,00		12,00		
Maintenance ferme (/cagette/sem)	1,00		1,67	Charges salariales mensuelles	224 980,47
Maintenance ferme fixe (h)	2,00		2	Charges salariales annuelles	2 699 765,64
Nombre de tournées commerciales	2,00	temps ferme	26,17	Salaires et Traitements	1 887 948,00
		temps commercial	23,67	Charges sociales	811 817,64
					2 699 765,64

Calcul des charges salariales

masse commercialisée	3 377 356,71	Prix sortie ferme								
		500,00	750,00	1 000,00	1 250,00	1 500,00	1 750,00	2 000,00	2 250,00	2 500,00
14	20,00	-4 437 492,78	-4 273 692,78	-4 109 892,78	-3 946 092,78	-3 782 292,78	-3 618 492,78	-3 454 692,78	-3 290 892,78	-3 127 092,78
21	30,00	-4 347 988,31	-4 102 288,31	-3 856 588,31	-3 610 888,31	-3 365 188,31	-3 119 488,31	-2 873 788,31	-2 628 088,31	-2 382 388,31
28	40,00	-4 233 523,84	-3 905 923,84	-3 578 323,84	-3 250 723,84	-2 923 123,84	-2 595 523,84	-2 267 923,84	-1 940 323,84	-1 612 723,84
35	50,00	-4 119 059,38	-3 709 559,38	-3 300 059,38	-2 890 559,38	-2 481 059,38	-2 071 559,38	-1 662 059,38	-1 252 559,38	-843 059,38
42	60,00	-4 107 327,31	-3 615 927,31	-3 124 527,31	-2 633 127,31	-2 141 727,31	-1 650 327,31	-1 158 927,31	-667 527,31	-176 127,31
49	70,00	-3 992 862,84	-3 419 562,84	-2 846 262,84	-2 272 962,84	-1 699 662,84	-1 126 362,84	-553 062,84	20 237,16	593 537,16
56	80,00	-3 903 358,37	-3 248 158,37	-2 592 958,37	-1 937 758,37	-1 282 558,37	-627 358,37	27 841,63	683 041,63	1 338 241,63
63	90,00	-3 788 893,91	-3 051 793,91	-2 314 693,91	-1 577 593,91	-840 493,91	-103 393,91	633 706,09	1 370 806,09	2 107 906,09
70	100,00	-3 674 429,44	-2 855 429,44	-2 036 429,44	-1 217 429,44	-398 429,44	420 570,56	1 239 570,56	2 058 570,56	2 877 570,56
77	110,00	-3 820 676,69	-2 919 776,69	-2 018 876,69	-1 117 976,69	-217 076,69	683 823,31	1 584 723,31	2 485 623,31	3 386 523,31
84	120,00	-3 706 212,23	-2 723 412,23	-1 740 612,23	-757 812,23	224 987,77	1 207 787,77	2 190 587,77	3 173 387,77	4 156 187,77
91	130,00	-3 616 707,76	-2 552 007,76	-1 487 307,76	-422 607,76	642 092,24	1 706 792,24	2 771 492,24	3 836 192,24	4 900 892,24
98	140,00	-3 502 243,29	-2 355 643,29	-1 209 043,29	-62 443,29	1 084 156,71	2 230 756,71	3 377 356,71	4 523 956,71	5 670 556,71
		Apport	0,90						21,18	6 440 221,18

Résultat courant avant impôt	Prix sortie ferme								
	500,00	750,00	1 000,00	1 250,00	1 500,00	1 750,00	2 000,00	2 250,00	2 500,00
2 278 054,30	-3 446 786,59	-3 282 986,59	-3 119 186,59	-2 955 386,59	-2 791 586,59	-2 627 786,59	-2 463 986,59	-2 300 186,59	-2 136 386,59
20,00	-3 359 324,81	-3 108 672,08	-2 862 972,08	-2 617 272,08	-2 371 572,08	-2 125 872,08	-1 880 172,08	-1 634 472,08	-1 388 772,08
30,00	-3 235 499,97	-2 907 899,97	-2 580 299,97	-2 252 699,97	-1 925 099,97	-1 597 499,97	-1 269 899,97	-942 299,97	-614 699,97
40,00	-3 116 627,85	-2 707 127,85	-2 297 627,85	-1 888 127,85	-1 478 627,85	-1 069 127,85	-659 627,85	-250 127,85	159 372,15
50,00	-3 084 976,55	-2 593 576,55	-2 102 176,55	-1 610 776,55	-1 119 376,55	-627 976,55	-136 576,55	354 823,45	846 223,45
60,00	-2 966 104,44	-2 392 804,44	-1 819 504,44	-1 246 204,44	-672 904,44	-99 604,44	473 695,56	1 046 995,56	1 620 295,56
70,00	-2 873 689,93	-2 218 489,93	-1 563 289,93	-908 089,93	-252 889,93	402 310,07	1 057 510,07	1 712 710,07	2 367 910,07
80,00	-2 754 817,81	-2 017 717,81	-1 280 617,81	-543 517,81	193 582,19	930 682,19	1 667 782,19	2 404 882,19	3 141 982,19
90,00	-2 635 945,70	-1 816 945,70	-997 945,70	-178 945,70	640 054,30	1 459 054,30	2 278 054,30	3 097 054,30	3 916 054,30
100,00	-5 359 324,81	-4 458 424,81	-3 557 524,81	-2 656 624,81	-1 755 724,81	-854 824,81	46 075,19	946 975,19	1 847 875,19
110,00	-5 240 452,70	-4 257 652,70	-3 274 852,70	-2 292 052,70	-1 309 252,70	-326 452,70	656 347,30	1 639 147,30	2 621 947,30
120,00	-5 148 038,18	-4 083 338,18	-3 018 638,18	-1 953 938,18	-889 238,18	175 461,82	1 240 161,82	2 304 861,82	3 369 561,82
130,00	-5 029 166,07	-3 882 566,07	-2 735 966,07	-1 589 366,07	-442 766,07	703 833,93	1 850 433,93	2 997 033,93	4 143 633,93
140,00	-4 910 293,95	-3 681 793,95	-2 453 293,95	-1 224 793,95	3 706,05	1 232 206,05	2 460 706,05	3 689 206,05	4 917 706,05
150,00	-4 878 642,66	-3 568 242,66	-2 257 842,66	-947 442,66	362 957,34	1 673 357,34	2 983 757,34	4 294 157,34	5 604 557,34
160,00	-4 759 770,54	-3 367 470,54	-1 975 170,54	-582 870,54	809 429,46	2 201 729,46	3 594 029,46	4 986 329,46	6 378 629,46
170,00	-7 367 121,67	-5 892 921,67	-4 418 721,67	-2 944 521,67	-1 470 321,67	3 878,33	1 478 078,33	2 952 278,33	4 426 478,33
180,00	-7 248 249,55	-5 692 149,55	-4 136 049,55	-2 579 949,55	-1 023 849,55	532 250,45	2 088 350,45	3 644 450,45	5 200 550,45
190,00	-7 129 377,44	-5 491 377,44	-3 853 377,44	-2 215 377,44	-577 377,44	1 060 622,56	2 698 622,56	4 336 622,56	5 974 622,56
200,00									

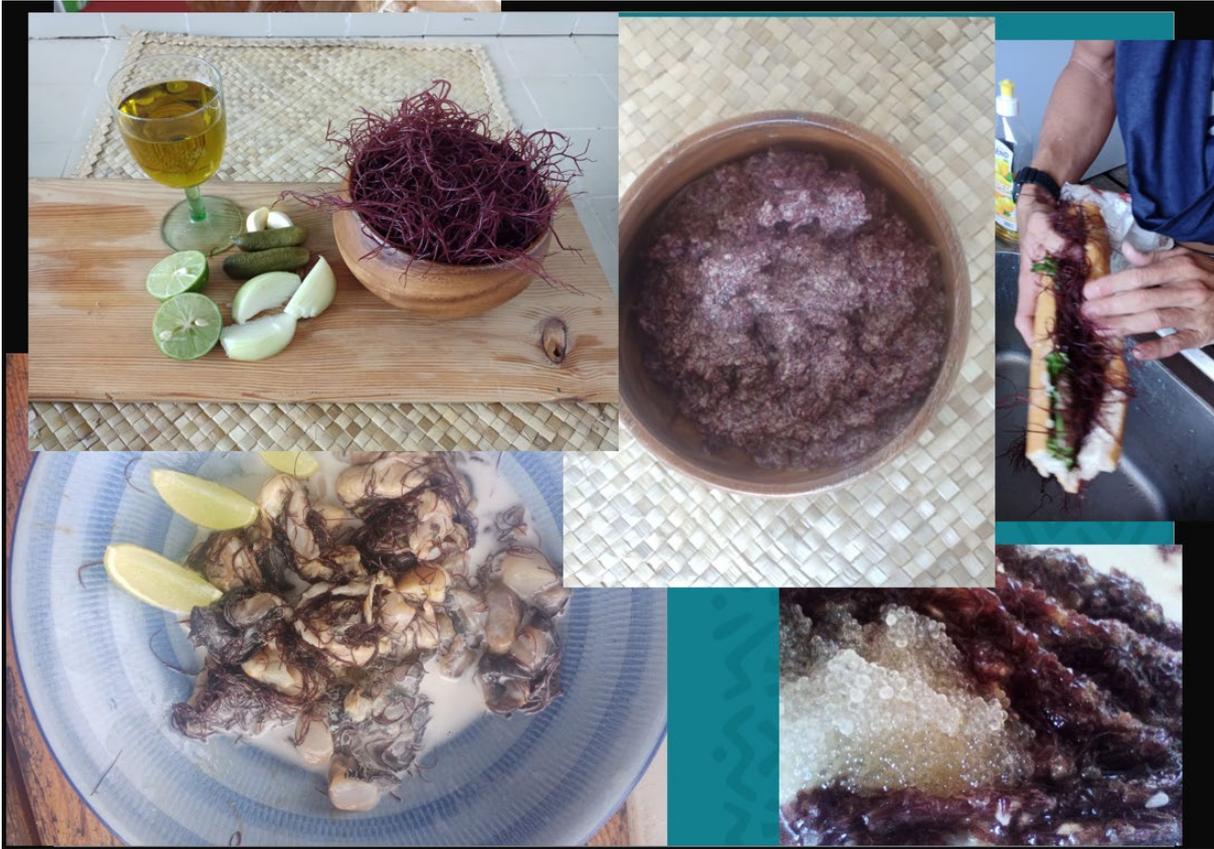
Exemples de résultats obtenus selon différents scénarios



*Essai d'algues séchées conditionnées par un atelier de transformation artisanal*



*Tartare de Rilmu'Ura proposé par un traiteur*



*Essais de recettes*



*Séchoir solaire, Rimu'Ura séché*



*Préparation vinaigrée prête à la surgélation*



*Rimu'Ura préparé façon «Wakamé» prêt à être surgelé*



*Essais de conditionnement*



*Essais de conditionnement*



*Codium cultivé dans des poches en maille PEHD*