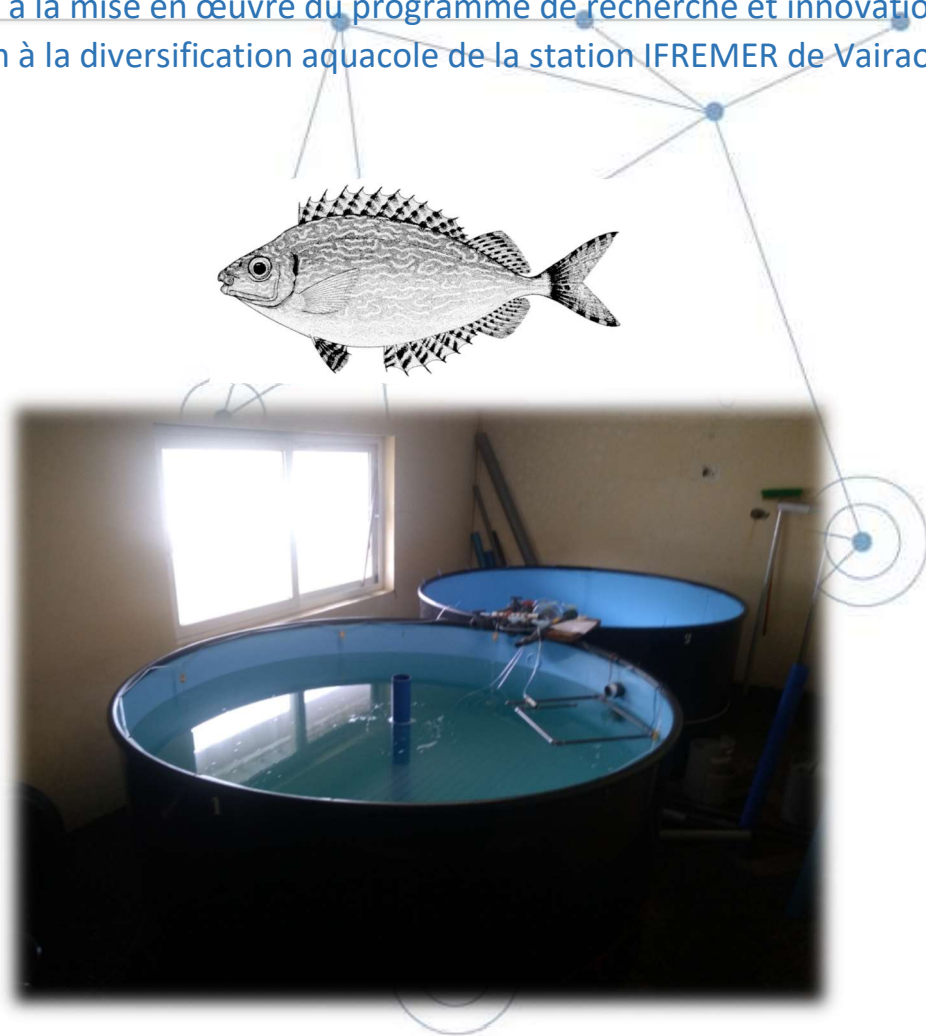


Rapport Initial

De La
Convention CDT 2021-2023/ CVT ESRI 2021-2023

DIVAQUAVAI

- Relative à la mise en œuvre du programme de recherche et innovation «Soutien à la diversification aquacole de la station IFREMER de Vairao».



Fiche documentaire

Titre du rapport : Rapport initial DIVAQUAVAI Relative à la mise en œuvre du programme de recherche et innovation «Soutien à la diversification aquacole de la station IFREMER de Vairao».	
Référence interne : RBE/RMPF 2020	Date de publication : 01/11/2022 Version : 1.0.0
Diffusion : <input checked="" type="checkbox"/> libre (internet) <input type="checkbox"/> restreinte (intranet) – date de levée d’embargo : AAA/MM/JJ <input type="checkbox"/> interdite (confidentielle) – date de levée de confidentialité : AAA/MM/JJ	Référence illustrations de couverture Thomas Camus Langue(s) : Français
<p>Résumé/ Abstract : Le projet DIVAQUAVAI a pour objectif au-delà d’acquérir un certain nombre d’équipements qui viendront renforcer les moyens expérimentaux de la station Ifremer de Vairao au bénéfice de l’ensemble des partenaires publics et privés du site, de proposer des développements zootechniques d’un poisson herbivore <i>Siganus argenteus</i> (communément appelé poisson lapin ou « <i>marava</i> ») à des fins d’aquaculture de restauration.</p> <p>Le projet permettra des développements aquacoles inédits sur <i>S. argenteus</i> pour lequel les méthodes de nutrition standards ne sont pas applicables, et aussi de proposer à terme des ensemencements en milieu lagonaire pour essayer de contrecarrer le shift algal sévissant lors des épisodes de blanchissement corallien.</p> <p>En effet, le souhait est d’apporter dans le cadre de DIVAQUAVAI, la preuve que les réensemencements d’espèces produites en aquaculture pourraient, en sus de restaurer des stocks d’espèces en déclin dans les lagons, aider l’écosystème récifal à résilier face au changement climatique qu’il subit.</p>	
Mots-clés/ Key words : Diversification aquacole, herbivorie, shift algal, aquaculture de restauration, Siganiés	
Comment citer ce document : Camus Thomas, Mitta Guillaume, Wallon Heifara, Fleurot Baptiste, Trouillet Lucas (2022). Rapport initial DIVAQUAVAI Relative à la mise en œuvre du programme de recherche et innovation «Soutien à la diversification aquacole de la station IFREMER de Vairao». [CDT 2021-2023/ CVT ESRI 2021-2023]. RBE/RMPF 2020.	
Disponibilité des données de la recherche :	
DOI :	

Commanditaire du rapport : La Polynésie française, pour le compte de la délégation à la recherche, représentée par Le Ministre de l'agriculture et du foncier en charge du domaine et de la recherche, Tearii Te Moana ALPHA, ci-après désignée «la Polynésie française »,	
Nom / référence du contrat : <input checked="" type="checkbox"/> Rapport initial (réf. bibliographique : XXX) <input type="checkbox"/> Rapport définitif (réf. interne du rapport intermédiaire : R.DEP/UNIT/LABO AN-NUM/ID ARCHIMER)	
Projets dans lesquels ce rapport s'inscrit (programme européen, campagne, etc.) : Programme Recherche et Innovation	
Auteur(s) / adresse mail	Affiliation / Direction / Service, laboratoire
thomas.camus@ifremer.fr	RBE/RMPF/CIP
guillaume.mitta@ifremer.fr	RBE/RMPF/CIP
heifara.wallon@ifremer.fr	RBE/RMPF/CIP
Lucas.trouillet@ifremer.fr	RBE/RMPF/CIP
Baptiste.fleurot@ifremer.fr	RBE/RMPF/CIP
Destinataire : Délégation à la recherche	
Validé par : Thomas Camus	

Sommaire

Table des matières

1 Le Projet DIV-AQUA-VAI	6
1.1 Management du projet	6
1.2 Contexte scientifique et technologique du projet	6
1.3 Objectifs et structuration du projet	8
2 Méthodologie et description des travaux du projet	10
3 Calendrier des travaux du projet.....	15

1 Le Projet DIV-AQUA-VAI

1.1 Management du projet

Ce projet est coordonné par l’Ifremer et se déroulera au Centre Ifremer du Pacifique (Vairao, Tahiti Pf). Il a pour but d’initier des essais de reproduction et élevages d’une espèce de poisson herbivore autochtone et à la Polynésie française visant au développement d’aquaculture à but de restauration.

Les personnes impliquées dans ce projet sont :

- Thomas Camus (Ingénieur Aquacole au CIP)
- Heifara Wallon (Ingénieur Aquacole au CIP)
- Lucas Trouillet (VSC au CIP)

La présente Convention prend effet à compter du 20 Octobre 2022 et s’achèvera le 20 Octobre 2024.

1.2 Contexte scientifique et technologique du projet

La croissance rapide de la population humaine impacte notre planète à plus d’un titre. Elle entraîne, tout d’abord, une plus grande demande alimentaire, entraînant une surexploitation des ressources, notamment pour la consommation de protéines animales ; les cycles naturels ne peuvent faire face à une telle augmentation et, en raison de la pêche industrielle, les populations de nombreuses espèces marines pêchées sont en déclin^{1,2}. L’augmentation des activités humaines est aussi l’une des principales causes des changements globaux auxquels nous sommes confrontés³. Ces forçages engendrent des modifications profondes de l’environnement, avec des impacts variables sur les écosystèmes océaniques^{4,5}. Face à ces impacts, l’aquaculture peut jouer un double rôle. Elle peut permettre de répondre aux besoins alimentaires et faire baisser la pression des pêcheries sur les stocks (World fisheries and aquaculture, FAO 2020). Mais, elle peut aussi être utilisée comme un outil pour aider à la restauration marine⁶. On parle alors d’aquaculture de restauration. Cette dernière consiste à développer une aquaculture commerciale ou de subsistance qui fournirait des avantages écologiques directs à l’environnement^{7,8}.

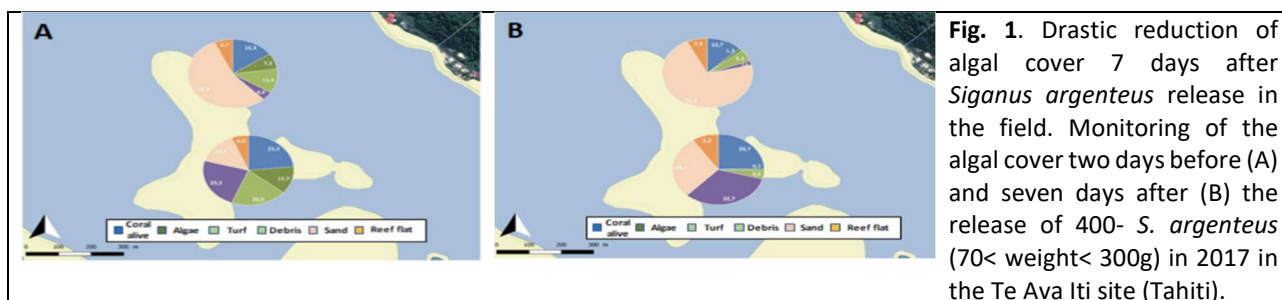
La Polynésie pourrait jouer un rôle de leader dans ces stratégies basées sur l’aquaculture, particulièrement pour les territoires insulaires du Pacifique Sud. Il existe actuellement une volonté affichée du gouvernement polynésien de soutenir non seulement des programmes de diversification aquacole mais aussi de réensemencement d’espèces développées en aquaculture dans le milieu sauvage afin d’aider les stocks naturels à se reconstituer face aux assauts répétés auxquels ils sont confrontés (surpêche, pollution, changement climatique). Cette volonté du territoire s’est notamment illustrée par l’ajout en 2018 d’un volet « réensemencement lagonaire » au sein de la cellule « Ressources lagonaires » de la Direction des Ressources Marines (DRM).

Située à la presqu’île de Tahiti, le laboratoire Ifremer « Ressources Marines en Polynésie Française » (membre de l’UMR 241 EIO) est le catalyseur de cette politique scientifique au service de la Polynésie. Ce laboratoire développe des recherches fondamentales sur l’adaptation des espèces marines aux changements globaux et des recherches plus appliquées sur des développements en diversification aquacole et aquaculture de restauration. C’est sur ce deuxième volet plus appliqué que va porter le projet DIVAQUAVAI. Nous proposons au travers de ce projet de mettre à niveau un certain nombre d’équipements de notre plateforme pour i) permettre à l’ensemble des utilisateurs publics et privés du site de travailler dans les meilleures conditions mais aussi ii) lancer une série d’essais zootechniques sur une espèce de poisson herbivore

autochtone, le picot tacheté *Siganus argenteus* (« Marava »). Ces élevages auront un double objectif : (1) avancer sur la question des élevages en mésocosme et (2) produire des siganidés sevrés et de bonne qualité afin de pouvoir, à terme, faire aboutir des projets innovants et intégrés de relâché à but écologique et/ou de restauration en lagon.

Les récifs coralliens se caractérisent par leur biodiversité exceptionnelle et font partie des écosystèmes les plus productifs de la planète. Ils représentent une protection côtière et fournissent également des biens et services économiques, culturels et sociaux, qui sont cruciaux pour ~850 millions de personnes de plus de 100 pays dans le monde, la plupart étant de petits états insulaires^{9,10}. C'est le cas de la Polynésie Française qui s'est développée en harmonie avec le milieu récifal. Avec ses cinq archipels et ses 118 îles réparties sur 2,5 millions de km² d'océan, la Polynésie représente un système récifal océanique insulaire et fragmenté unique. Presque tous les habitants vivent sur les zones côtières et la dépendance sociale et économique vis-à-vis des récifs coralliens est extrêmement élevée. En effet, les principales activités économiques y sont la pêche, le tourisme (première activité économique du Pays) et la perliculture (premier produit d'exportation de la Polynésie française).

Les récifs coralliens sont principalement soutenus par de petits organismes coloniaux et calcifiants, les coraux scléactiniens hermatypiques, qui créent un habitat pour des milliers d'organismes. Les écosystèmes récifaux sont très vulnérables aux facteurs de stress et peuvent changer rapidement dans leur structure et leur fonctionnement¹¹⁻¹³. La recherche en écologie des communautés a reconnu la contribution importante des perturbations à grande échelle, telles que les événements de blanchissement des coraux associés au stress thermique, les cyclones et les épidémies du prédateur corallien *Acanthaster* spp., sur la structure et la dynamique des communautés récifales¹⁴⁻¹⁶. Les activités humaines ont largement contribué à cette tendance, en plus de fournir de multiples sources de pollution directe qui affectent les organismes récifaux¹⁷. Les principaux facteurs anthropiques sont la surexploitation des organismes récifaux, les méthodes de pêche destructrices, les impacts incontrôlés du tourisme et des loisirs, l'augmentation de la sédimentation et de la pollution associées aux activités de dragage ou minières, au développement côtier, à la déforestation et à l'agriculture intensive. En conséquence, les récifs coralliens ont été gravement touchés par des mortalités généralisées des coraux, clés de voute de cet écosystème, et dans un certain nombre de cas, ils ont subi un changement de phase frappant qui implique le remplacement des coraux par des macroalgues ou d'autres organismes benthiques non bâtisseurs de récifs, un état dégradé qui fournit moins de services écosystémiques¹⁷. De façon synergique, le déficit d'herbivores due à des maladies et à la surpêche est associé à la prolifération de macroalgues, qui constitue une menace majeure pour la résilience des récifs coralliens¹⁸. Pour prévenir ou retarder ce changement de phase, il est nécessaire de maintenir une pression de broutage élevée, laissant le substrat récifal disponible pour le recrutement corallien suite à des événements de mortalité¹³. Une solution prometteuse consisterait à améliorer la biomasse des herbivores grâce à des programmes spécifiques de développement aquacole. De premiers essais prometteurs ont été réalisés sur la plateforme expérimentale de Vairao. Ils ont permis de produire quelques centaines de poissons lapins (*S. argenteus*) et après ensemencement sur un site de la presqu'île (Te Ava Iti), la couverture algale a été diminuée de 60 % (Figure 1).



Le second volet du projet DIVAQUAVAI va donc consister à développer et améliorer l'aquaculture de *S. Argenteus* avec en perspective finale la réalisation de relâchés afin de caractériser le potentiel de cette espèce en aquaculture de restauration.

1.3 Objectifs et structuration du projet

Objectifs principaux :

- Sécuriser la station de pompage et l'alimentation en eau de l'ensemble du site de Vairao pour les infrastructures expérimentales de l'Ifremer, de la DRM et des entreprises en accueil (TMP, Ostrea Tahiti).
- Mettre en place une zone aquacole polyvalente pour réaliser des élevages d'espèces de poisson autochtones au sein du centre Ifremer de Vairao. Cette zone d'élevage sera constituée d'un laboratoire climatisé, d'une salle géniteur, une salle larvaire et une salle de proie vivantes/ microalgues.
- Mettre au point et fiabiliser une méthode d'élevage pour *S. argenteus* en aquaculture marine de type « mésocosme ».
 - Ce type de culture utilise au maximum la productivité naturelle tout en limitant autant que possible l'utilisation d'intrants, le but étant de maintenir des coûts de production relativement faible tout en permettant la production d'alevins de bonne qualité. Il est important de noter que si ce protocole sera développé dans un premier temps pour l'espèce candidate *S. argenteus* il pourra ensuite être relativement facilement être testé et adapté à d'autres espèces de poissons lagunaires autochtone à la Polynésie française.
- Une fois qu'ils auront atteint un poids suffisant (entre 100 et 150g) les marava produits durant les cycles d'élevage seront destinés à être relâchés. Des contacts préliminaires avec les communes pourront être établis durant le projet pour préparer le terrain et identifier les communes demandeuses.
 - Les réensemencements de ces *S. argenteus* d'aquaculture seront basés sur l'approche responsable définie par Lorenzen et al¹⁹, aujourd'hui largement acceptée comme référence pour la mise en place, l'exécution et le suivi de programmes de relâchés marins, en prenant en compte les atouts et contraintes liés au contexte local. Le suivi inclura, entre autres, un suivi écologique pré- et post-relâché afin de déterminer précisément l'impact des animaux relâchés sur la couverture algale, les récifs coralliens et les populations de poissons associés.

- **L'objectif global de ce projet est d'accompagner les développements du centre Ifremer de Vairao pour devenir moteur sur les problématiques d'aquaculture à but écologique et /ou de restauration. Le travail accompli en termes de fiabilisation des protocoles d'élevage responsables permettra aussi sur le long terme d'ouvrir des pistes en terme de diversification piscicole sur le territoire (priorité affichée du gouvernement). En plus de faire progresser nos connaissances en matière de méthodes d'élevages, les poissons produits seront maintenus en grossissement avec comme objectif final de les utiliser dans le cadre d'un programme de réensemencement intégré qui prendra en compte la dimension socioculturelle aussi bien qu'écologique. Lors de ces relâchés, le potentiel offert par le poisson lapin dans la résilience des récifs coralliens face au changement climatique et ses conséquences (shift algal) sera étudié.**

2 Méthodologie et description des travaux du projet

Présentation par actions

Action 1 : Préparation des infrastructures et préparation du lot de géniteurs.

Contenu : Installation et mise en fonction d'une pompe eau de mer avec un dimensionnement adapté pour les besoins en eau de mer du centre (200 m³/heure). Mise en place d'une zone de filtration dédiée à la zone polyvalente aquacole. Installation d'un bac de stabulation géniteurs, de bacs d'élevages larvaires et d'une zone de culture de proies vivantes. Constitution d'un lot de géniteurs constitué de 20 individus.

Note : des géniteurs de *S. argenteus* sont déjà en stabulation au Centre Ifremer de Vairao, ils seront mis à disposition par la DRM (Cf. lettre de soutien). Cette disponibilité permettra l'obtention de pontes dans des délais courts, permettant de lancer les élevages dès le résultat de l'appel à proposition R&I et ainsi d'économiser des mois de campagne de capture en mer, de quarantaine et de conditionnement de géniteurs.

Indicateurs de suivi et de résultats : Obtention d'une eau de mer filtrée de qualité compatible avec la conduite d'élevage larvaire et le maintien d'un lot de géniteurs (suivi de la qualité d'eau via observation des filtres lors du nettoyage et étalement sur milieu solide). Fourniture régulière et fiable en œufs fertilisés de bonne qualité par les géniteurs (suivi du calendrier des pontes, contrôle régulier des taux de fertilisation, du diamètre des œufs produits et de la taille moyenne du globule lipidique). Mise en place d'un suivi alimentation et morphométrie des géniteurs (contrôle prise alimentaire, parasite/pathogènes, croissance).

Equipes techniques mobilisés : 1 TECH50%. Un technicien Ifremer sera recruté par l'Ifremer (CDD de 18 mois) pour ce projet et sur toute sa durée. Le candidat est identifié (Heifara Wallon) et il sera recruté le 01 Juin 2022.

Action 2 : Conduite d'élevages larvaires à partir d'œufs fertilisés et jusqu'à l'obtention d'alevins sevrés.

Contenu :

Elevage larvaire : Au cours des 24 mois du projet, nous proposons de réaliser 4 cycles d'élevages larvaires de *S. argenteus*. Ces élevages seront conduits suivant une méthode mésocosme, en bacs de cultures extérieurs à fond plat équipés d'une évacuation centrale. La méthode de culture en système mésocosme sous-entend de limiter autant que possible l'utilisation d'intrants (proies, aliment commercial) pour au contraire développer au maximum la productivité naturelle au sein du système de culture. Une culture mésocosme bien maîtrisée peut ainsi « s'auto-entretenir » sur le temps et produire *in situ* des proies vivantes dont les larves vont se nourrir. Ceci limite les apports exogènes et permet ainsi de diminuer les coûts de production. Une fourniture en proies vivantes isolées à partir de l'environnement immédiat de la station sera privilégiée, de manière à réduire au maximum l'utilisation d'aliments importés et de se rapprocher au plus près au régime naturel des larves de marava dans le milieu sauvage. En l'absence d'alternatives viables sur le territoire, le sevrage et le pré-grossissement des alevins sera réalisé avec de l'aliment commercial. Les travaux permettant l'installation des bacs d'élevage seront pris en charge par l'Ifremer (Dallage béton, évacuation et toiture). La toiture

sera mise en place afin d'abriter les bacs de la pluie et limiter les fluctuations de salinité dans les élevages, ainsi qu'une ombrière modulable qui pourra être déployée au-dessus des bacs pour limiter l'intensité lumineuse et contrôler les efflorescences algales.



Figure 3 : Exemple de bac de culture extérieur adapté à la culture en mésocosme.

La mise en place d'un élevage larvaire en mésocosme nécessite la préparation à l'avance de plusieurs compartiments d'élevage qu'il faut synchroniser avec la date estimée de mise en élevage, incluant (1) les microalgues ; (2) les proies vivantes ; (3) la préparation du bac d'élevage. L'itinéraire technique de la préparation de ces différents compartiments est donné à titre d'exemple dans la Figure 4.

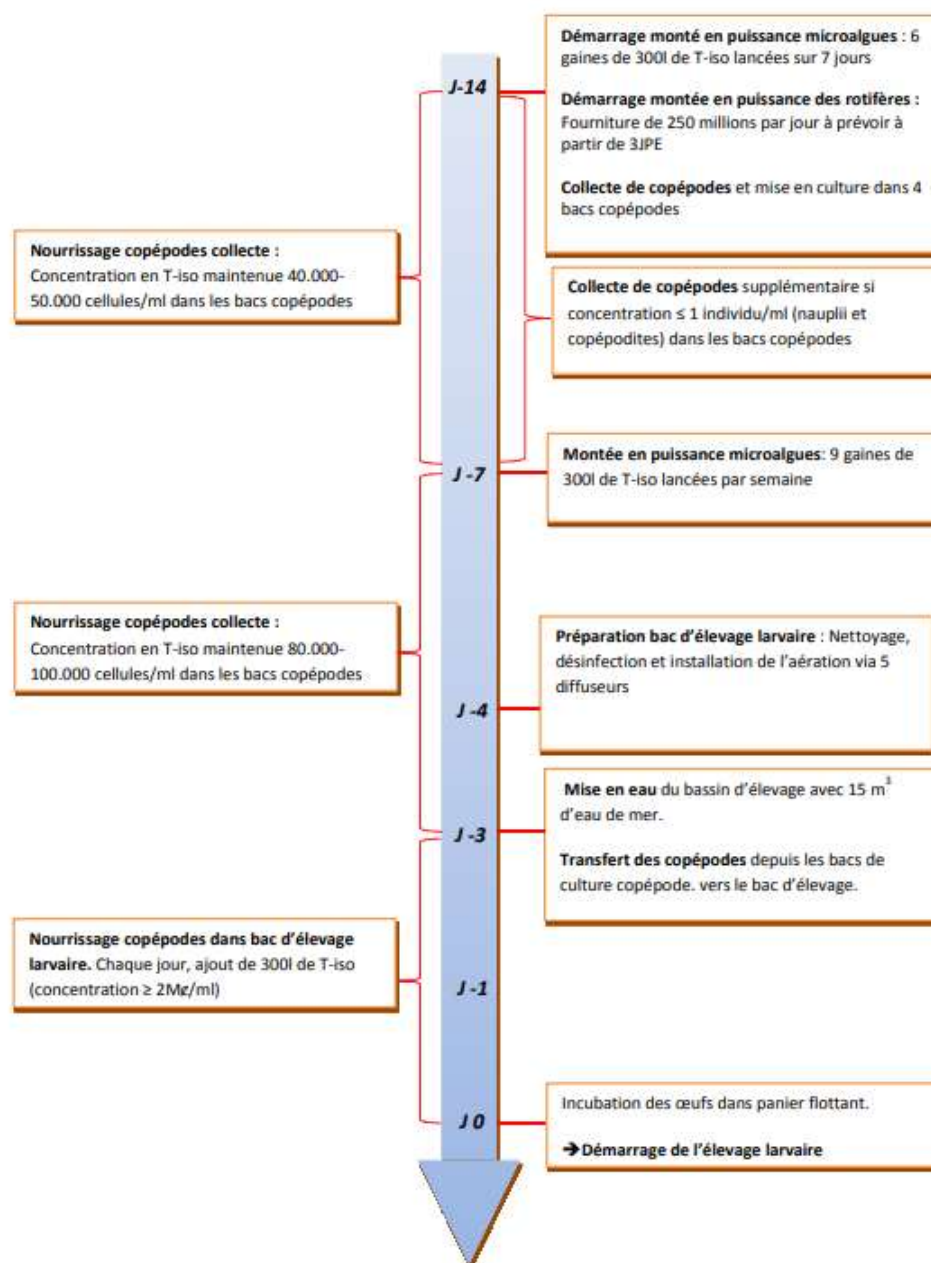


Figure 4:Chronogramme de la préparation d'un élevage en système mésocosme

Alevinage : Une fois l'élevage larvaire terminé, les alevins sevrés seront transférés vers des bacs à fond plat d'un volume utile de 1,8m³ et maintenus à l'extérieur sous un toit en tôles transparentes. Ces bacs seront équipés d'une alimentation en eau de mer et d'une crépine centrale pour l'évacuation. Deux distributeurs à bande seront installés sur chaque nurserie afin d'assurer un nourrissage continu en journée. Un bullage est apporté par diffuseur dans le volume d'élevage. Un second diffuseur peut être ajouté en cas de biomasse importante afin de maintenir une concentration en oxygène adaptée.

Pré-grossissement en cage lagonaire : Les alevins sont transférés en cage pour terminer leur grossissement lorsqu'ils atteignent un poids moyen de 10g en alevinage. Un transfert plus précoce (3g) pourra être envisagé en fonction des capacités d'alevinage disponible à terre.

L'importance du zooplancton, et particulièrement des copépodes dans l'élevage larvaire : Les rotifères sont les proies vivantes les plus couramment utilisées en écloséries, principalement en raison de leur disponibilité commerciale et leur capacité d'être cultivés à forte densité. Une souche du rotifère *Brachionus plicatilis* a été importée par le passé et est disponible sur Tahiti, mais la taille de cette espèce est (longueur $146 \pm 11 \mu\text{m}$) est trop importante pour être ingérée efficacement par les larves de Marava lors de leur premier nourrissage, la largeur de leur bouche mesurant à ce moment précis (2 jours post-éclosion) approximativement $140 \mu\text{m}$. L'impossibilité d'utiliser des rotifères lors des étapes précoces de nourrissage du Marava a rendu nécessaire d'identifier une alternative aux rotifères : les copépodes, et plus précisément leurs stades nauplii. Les copépodes sont de minuscules crustacés aquatiques qui ont colonisé avec succès différents environnements, de l'eau douce aux eaux marines et hypersalines, des eaux polaires aux sources chaudes²⁰. Plus de 11 500 espèces ont été identifiées à ce jour²¹, parmi lesquelles environ un tiers sont parasitiques ou symbiotiques. Leur cycle de vie comprend 13 stades : l'œuf, suivi de 6 stades nauplii, puis 6 stades copépodites ; le dernier stade copépodite étant le stade adulte. De nombreuses études de terrain ont démontré que les nauplii de copépodes sont des proies très importantes pour les larves de poissons marins, constituant généralement 50% ou plus de leur contenu stomacal²².

L'omniprésence des copépodes dans les environnements aquatiques et leur importance en tant que proies naturelles des larves de poissons suscite un grand intérêt pour les utiliser comme proies vivantes dans le cadre d'écloserie marine²³. Les avantages fournis par les copépodes dans un contexte aquacole sont multiples :

- Les nauplii de copépodes sont généralement plus petits que la plus petite souche de rotifères, ce qui en fait des proies vivantes idéales pour de nombreuses larves marines possédant une petite bouche au premier nourrissage²⁴.
- Le contenu biochimique des nauplii est supérieur à celui des rotifères, même enrichis, et correspond aux besoins des larves de la plupart des espèces de poissons marins^{25,26,27}
- Le cycle de vie des copépodes offre un large éventail d'options de tailles pour les larves cultivées²⁸.
- Les mouvements natatoires semi-continus des copépodes et de leur nauplii stimulent également le comportement de prédation des larves, et a été associé à une augmentation de la prise alimentaire.

L'utilisation de nauplii de copépodes en écloserie est généralement associée à une augmentation de la survie, une croissance améliorée, une accélération du développement du système digestif, de faibles incidences de déformations squelettiques ainsi qu'une plus grande capacité à tolérer le stress, par rapport à des larves nourries uniquement avec des rotifères²⁹.

Indicateurs de suivi et de résultats : Survie larvaire, timing de la métamorphose, survie alevinage, sevrage, conformité des alevins produits (vessie natatoire, absence de malformation, etc...).

Densité de nauplii de copépodes dans les élevages au moment du premier nourrissage.
Reproductibilité de la méthode au cours des élevages successifs.

Equipes techniques mobilisés : 1 VSC50% +1 TECH 50% + 1 CADRE25%

Action 3 : Rédaction d'une méthodologie responsable et durable en vue de mettre en place une campagne de relâchés à but écologique de *S. argenteus* issu d'aquaculture dans le milieu lagunaire de Tahiti et de sa presqu'île.

Contenu :

La méthodologie mise en place pour l'exécution et le suivi de ce relâché sera basée sur l'approche responsable définie par Lorenzen et collaborateurs¹⁹. Cette approche est largement acceptée comme référence en matière de méthodologie pour la réalisation de relâchés marins responsables. Ces références mettent en évidence l'importance d'une concertation entre les partenaires durant la phase préparatoire afin de réaliser l'évaluation initiale la plus complète possible et ainsi d'établir des objectifs réalistes pour l'opération, et qui correspondront le mieux aux attentes et aux objectifs des communautés bénéficiaires. Dans le cadre des 24 mois de ce projet l'objectif final n'est pas la réalisation d'un réensemencement intégré à l'échelle opérationnelle, mais bien de développer une méthodologie adaptée au contexte locale et d'établir des contacts préliminaires avec des communes intéressées.

Indicateurs de suivi et de résultats :

Développer un guide méthodologique adapté au contexte local pour la réalisation de relâchés responsables et durables, en fonction du contexte local, basé sur la littérature scientifique.

Identifier les communes les plus à même de répondre au mieux aux différentes étapes organisationnelles à mettre en place.

Prise de contact préliminaire avec sociologue pour contact avec les pêcheurs des communes concernées

Prise de contact préliminaire/identification d'une équipe qui pourra effectuer les suivis écologiques nécessaires.

3 Calendrier des travaux du projet

Mois	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12
Préparation zone élevage et conditionnement géniteurs	x	x	x	x	x		x	x				x
Élevage/alevinage					x	x			x	x	x	
Prise de contact commune pour mise en place action réensemencement												
Rédaction protocole de réensemencement												

Mois	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Préparation zone élevage	x				x	x						
Élevage/alevinage		x	x	x			x	x	x			
Prise de contact commune pour mise en place action réensemencement			x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Rédaction protocole de réensemencement						x	x	x	x	x	x	x



- 1 Baum, J. K. *et al.* Collapse and conservation of shark populations in the Northwest Atlantic. *Science***299**, 389-392, doi:10.1126/science.1079777 (2003).
- 2 Myers, R. A. & Worm, B. Rapid worldwide depletion of predatory fish communities. *Nature***423**, 280-283, doi:10.1038/nature01610 (2003).
- 3 Ripple, W. J. *et al.* World Scientists' Warning of a Climate Emergency 2021. *BioScience***71**, 894-898, doi:10.1093/biosci/biab079 (2021).
- 4 Halpern, B. S. *et al.* A global map of human impact on marine ecosystems. *Science***319**, 948-952, doi:10.1126/science.1149345 (2008).
- 5 Halpern, B. S. *et al.* Recent pace of change in human impact on the world's ocean. *Sci Rep***9**, 11609, doi:10.1038/s41598-019-47201-9 (2019).
- 6 Gallardi, D. Effects of Bivalve Aquaculture on the Environment and Their Possible Mitigation: A Review. *Fisheries and Aquaculture Journal***05**, doi:10.4172/2150-3508.1000105 (2014).
- 7 Carranza, A. & zu Ermgassen, P. S. E. A Global Overview of Restorative Shellfish Mariculture. *Frontiers in Marine Science***7**, doi:10.3389/fmars.2020.00722 (2020).
- 8 Giangrande, A., Gravina, M. F., Rossi, S., Longo, C. & Pierri, C. Aquaculture and Restoration: Perspectives from Mediterranean Sea Experiences. *Water***13**, doi:10.3390/w13070991 (2021).
- 9 Moberg, F. & Folke, C. Ecological goods and services of coral reef ecosystems. *Ecological Economics***29**, 215-233, doi:[https://doi.org/10.1016/S0921-8009\(99\)00009-9](https://doi.org/10.1016/S0921-8009(99)00009-9) (1999).
- 10 Kittinger, J. N., Finkbeiner, E. M., Glazier, E. W. & Crowder, L. B. Human Dimensions of Coral Reef Social-Ecological Systems. *Ecology and Society***17**, doi:10.5751/es-05115-170417 (2012).
- 11 Bellwood, D. R., Hughes, T. P., Folke, C. & Nystrom, M. Confronting the coral reef crisis. *Nature***429**, 827-833, doi:10.1038/nature02691 (2004).
- 12 Hughes, T. P. *et al.* Climate change, human impacts, and the resilience of coral reefs. *Science***301**, 929-933, doi:10.1126/science.1085046 (2003).
- 13 Hughes, T. P. *et al.* Phase shifts, herbivory, and the resilience of coral reefs to climate change. *Curr Biol***17**, 360-365, doi:10.1016/j.cub.2006.12.049 (2007).
- 14 Adjeroud, M. *et al.* Recurrent disturbances, recovery trajectories, and resilience of coral assemblages on a South Central Pacific reef. *Coral Reefs***28**, 775-780 (2009).

- 15 De'ath, G., Fabricius, K. E., Sweatman, H. & Puotinen, M. The 27-year decline of coral cover on the Great Barrier Reef and its causes. *Proc Natl Acad Sci U S A***109**, 17995-17999, doi:10.1073/pnas.1208909109 (2012).
- 16 Hughes, T. P. *et al.* Global warming and recurrent mass bleaching of corals. *Nature***543**, 373-377, doi:10.1038/nature21707 (2017).
- 17 Hughes, T. P. *et al.* Coral reefs in the Anthropocene. *Nature***546**, 82-90, doi:10.1038/nature22901 (2017).
- 18 Graham, N. A., Jennings, S., MacNeil, M. A., Mouillot, D. & Wilson, S. K. Predicting climate-driven regime shifts versus rebound potential in coral reefs. *Nature***518**, 94-97, doi:10.1038/nature14140 (2015).
- 19 Lorenzen, K., Leber, K. M. & Blankenship, H. L. Responsible Approach to Marine Stock Enhancement: An Update. *Reviews in Fisheries Science***18**, 189-210, doi:10.1080/10641262.2010.491564 (2010).
- 20 Huys, R. & Boxshall, G. *Copepod evolution*. (The Natural History Museum, 1991).
- 21 Humes, A. How many copepods? *Hydrobiologia***292/293**, 1-7 (1994).
- 22 Chesney, E. in *Copepods in aquaculture* (ed Blackwell Scientific Publication Ltd) 133-150 (2005).
- 23 O'Bryen, P. & Lee, C. in *Copepods in aquaculture* (ed Blackwell Scientific Publication Ltd) (2005).
- 24 Gopakumar, G. & Santhosi, I. Use of copepods as live feed for larviculture of Damselfishes. *Asian Fish Sci.***22**, 1-6 (2009).
- 25 Toledo, J., Golez, M., Doi, M. & Ohno, A. Use of copepod nauplii during early feeding stage of grouper *Epinephelus coioides*. *Fish. Sci.***65**, 390-397 (1999).
- 26 Koedijk, R. M. *et al.* The influence of first-feeding diet on the Atlantic cod *Gadus morhua* phenotype: survival, development and long-term consequences for growth. *J Fish Biol***77**, 1-19, doi:10.1111/j.1095-8649.2010.02652.x (2010).
- 27 Lindley, L. C., Phelps, R. P., Davis, D. A. & Cummins, K. A. Salinity acclimation and free amino acid enrichment of copepod nauplii for first-feeding of larval marine fish. *Aquaculture***318**, 402-406, doi:10.1016/j.aquaculture.2011.05.050 (2011).
- 28 Gemmell, B. J. & Buskey, E. J. The transition from nauplii to copepodites: susceptibility of developing copepods to fish predators. *Journal of Plankton Research***33**, 1773-1777, doi:10.1093/plankt/fbr066 (2011).
- 29 van der Meeren, T., Olsen, R. E., Hamre, K. & Fyhn, H. J. Biochemical composition of copepods for evaluation of feed quality in production of juvenile marine fish. *Aquaculture***274**, 375-397, doi:10.1016/j.aquaculture.2007.11.041 (2008).