
Mémoire

Auteur : Grosch, Julien

Promoteur(s) : Frederich, Bruno; Rougeot, Carole

Faculté : Faculté des Sciences

Diplôme : Master en biologie des organismes et écologie, à finalité spécialisée en gestion intégrée des ressources aquatiques et aquaculture

Année académique : 2023-2024

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/20905>

Avertissement à l'attention des usagers :

Tous les documents placés en accès ouvert sur le site le site MatheO sont protégés par le droit d'auteur. Conformément aux principes énoncés par la "Budapest Open Access Initiative"(BOAI, 2002), l'utilisateur du site peut lire, télécharger, copier, transmettre, imprimer, chercher ou faire un lien vers le texte intégral de ces documents, les disséquer pour les indexer, s'en servir de données pour un logiciel, ou s'en servir à toute autre fin légale (ou prévue par la réglementation relative au droit d'auteur). Toute utilisation du document à des fins commerciales est strictement interdite.

Par ailleurs, l'utilisateur s'engage à respecter les droits moraux de l'auteur, principalement le droit à l'intégrité de l'oeuvre et le droit de paternité et ce dans toute utilisation que l'utilisateur entreprend. Ainsi, à titre d'exemple, lorsqu'il reproduira un document par extrait ou dans son intégralité, l'utilisateur citera de manière complète les sources telles que mentionnées ci-dessus. Toute utilisation non explicitement autorisée ci-avant (telle que par exemple, la modification du document ou son résumé) nécessite l'autorisation préalable et expresse des auteurs ou de leurs ayants droit.

UNIVERSITÉ DE LIÈGE

FACULTÉ DES SCIENCES

DÉPARTEMENT DE BIOLOGIE, ÉCOLOGIE, ÉVOLUTION
Laboratoire d'Ecologie Evolutive (LEE), IH.SM

Performance de l'élevage en bassin du sigan cordonnier
***Siganus sutor* (Valenciennes, 1835) au Sud-Ouest de**
Madagascar



Julien Grosch

Mémoire réalisé dans le cadre de l'obtention du grade de master en biologie des organismes et écologie, à finalité spécialisée en gestion intégrée des ressources aquatiques et aquaculture

Août 2024

Promoteur : Dr. Bruno FRÉDÉRICH (Laboratoire d'Ecologie Evolutive)

Co-promotrice : Dr. Carole ROUGEOT (Unité de Gestion des Ressources Aquatiques et Aquaculture)

Encadrante : Helga B. RAVELOHASINA (IH.SM)

Remerciements

Je tiens tout d'abord à exprimer ma gratitude envers mon promoteur, le Dr Bruno Frédérick. Merci de m'avoir proposé ce sujet et de m'avoir permis de vivre cette expérience exceptionnelle à Madagascar. Je vous suis également reconnaissant pour les nombreuses relectures, les conseils et l'aide que vous m'avez apportés durant ces mois difficiles. Mes remerciements vont également au Dr Carole Rougeot pour ses nombreuses relectures, ses conseils avisés et les encouragements qu'elle m'a donnés, me permettant de finir ce mémoire à temps. Finalement, je tiens à vous remercier tous les deux pour cette année spéciale de la finalité GIRAA à l'organisation parfois compliquée. Votre temps et votre dévouement pour ma formation ont rendu cette année exceptionnelle malgré le faible nombre d'étudiants. Merci pour tout, je ne regrette mon choix pour rien au monde grâce à vous.

Je tiens également à remercier du plus profond de mon cœur Helga et Jao. L'accueil que j'ai reçu de leur part à Madagascar a rendu cette expérience scientifique et humaine inoubliable. Merci Helga pour tout ce que tu as fait pour moi et pour la confiance que tu m'as accordée dans le cadre de ta thèse.

Merci à Aubry, Ernest, Camille et Victor pour la compagnie, l'aide à la station et les rires que vous m'avez apportés. Cette expérience n'aurait pas été la même sans vous.

Merci à ma famille, et particulièrement à mon frère Alexandre, à mon beau-père Éric et à ma mamy, de m'avoir soutenu pendant toutes ces années malgré mes sauts d'humeur difficiles à vivre en période de blocus (et merci à ma mamy de m'avoir nourri à outrance).

Merci à mes supers chouettes potes pour tous les moments que nous avons vécus ensemble pendant ces années universitaires qui resteront gravés dans ma mémoire. Ces années d'études auraient été ternes sans vous.

Charlotte, merci pour tout ce que nous avons vécu ensemble et tout ce qui nous reste à vivre. Ton soutien durant la rédaction de ce mémoire a rendu cette période plus douce, merci pour tout.

Et enfin, je ne pouvais pas finir ces remerciements sans remercier la personne qui les mérite le plus, ma maman. Merci pour les très nombreuses relectures. Merci de m'avoir permis de réaliser les études qui me passionnaient. Merci de m'avoir soutenu et de m'avoir fait confiance durant ces années qui n'étaient pas toujours faciles. Et surtout, merci de m'avoir supporté, je sais que ce n'est pas toujours facile. Merci pour tout maman.

Résumé

Performance de l'élevage en bassin du sigan cordonnier *Siganus sutor* (Valenciennes, 1835) au Sud-Ouest de Madagascar

Mémoire réalisé par Julien Grosch, sous la tutelle du docteur Bruno Frédérick (promoteur) et du docteur Carole Rougeot (co-promotrice). Université de Liège, Laboratoire d'écologie évolutive, année académique 2023-2024

La surpêche sur le Grand récif de Tuléar a été rapportée depuis plusieurs années. Celle-ci est principalement causée par l'utilisation de techniques de pêche destructrices telles que l'utilisation de filets de senne constitués de toiles de moustiquaires. À cause de cette technique, de très nombreux poissons juvéniles sont pêchés. La capture de poissons juvéniles peut certainement causer le déclin des populations sauvages, vu que ceux-ci n'ont pas eu la possibilité de se reproduire. Beaucoup de ces juvéniles capturés sont des sigans cordonniers, *Siganus sutor*. Il s'agit d'une espèce herbivore très appréciée localement dont le déclin des populations sauvages a été observé. Afin de soutenir les stocks de géniteurs sauvages et de réduire la pression de pêche, l'aquaculture par capture de juvéniles semble être une piste d'activité prometteuse. L'objectif de ce mémoire est d'évaluer la faisabilité du développement de l'élevage en milieu contrôlé de *S. sutor* et d'optimiser sa croissance à faible coût. Durant trois mois, nous avons élevé des juvéniles de *S. sutor* (Taille moyenne = $8,7 \pm 1,38$ cm) capturés dans le milieu naturel. Deux aliments ont été testés : un aliment industriel fabriqué à base de farines et d'huiles de poissons, et un aliment artisanal peu coûteux, élaboré avec des lasses de mer (macroalgues et phanérogames marines). L'efficacité de ces aliments a été testée sur la base de données de croissance (tailles, poids, coefficient de condition) et des données phénotypiques (forme du corps, longueur de tube digestif, dentition). Les résultats ont montré des taux de survie en bassin similaires, quel que soit l'aliment reçu. Les *S. sutor* nourris avec l'aliment industriel ont montré une croissance supérieure (15,5 cm après les 3 mois) à ceux alimentés avec la préparation artisanale (11,84 cm après les 3 mois). Cette différence pourrait être expliquée par une plus faible teneur en protéines et autres vitamines de l'aliment artisanal, causant des carences et donc des retards de croissance. Après 1,5 mois de croissance, les poissons élevés avec l'aliment industriel montraient des tubes digestifs plus courts que des individus sauvages et des individus élevés avec les aliments artisanaux. Cependant cette différence s'est estompée durant l'élevage. Quel que soit l'alimentation, les poissons d'élevages possèdent une forme de corps différentes des individus sauvages démontrant un impact de la vie en captivité sur la morphologie de cette espèce. Cette différence de forme, marquée au niveau des insertions des nageoires, serait liée à la turbulence de l'eau probablement trop faible en captivité. La dentition n'a pas montré de différence en fonction du régime alimentaire reçu. Cette étude préliminaire révèle que *S. sutor* est une espèce à fort potentiel pour l'aquaculture, vu sa tolérance, sa disponibilité, son régime alimentaire herbivore et les fortes densités auxquelles il peut être élevé. Cependant, les conditions d'élevage et l'alimentation doivent être améliorées pour atteindre des meilleures performances, que cela soit dans un but de production aquacole ou de réintroduction.

Abstract

Performance of Pond-Based Farming of the Shoemaker Spinefoot, *Siganus sutor* (Valenciennes, 1835), in Southwest Madagascar.

Master thesis by Julien Grosch, under the supervision of Dr. Bruno Frédérick (promoter) and Dr. Carole Rougeot (co-promoter). University of Liège, Laboratory of Evolutionary Ecology, Academic Year 2023-2024.

Overfishing on the Great Reef of Tulear has been reported for several years. This issue is primarily caused by the use of destructive fishing techniques, such as the use of senne nets made from mosquito nets. Due to this method, a significant number of juvenile fish are caught. The capture of juvenile fish can undoubtedly lead to the decline of wild populations, as these fish have not had the opportunity to reproduce. Many of these captured juveniles are Shoemaker Spinefoot, *Siganus sutor*. This is a highly valued local herbivorous species whose wild population decline has been observed. To support wild breeding stocks and reduce fishing pressure, aquaculture through juvenile capture seems to be a promising activity. The aim of this master thesis is to evaluate the feasibility of developing controlled-environment farming of *S. sutor* and to optimize its growth at low cost. For three months, we raised juveniles of *S. sutor* (average size = 8.7 ± 1.38 cm) captured in the wild. Two types of feed were tested: an industrial feed made from fishmeal and fish oils, and a low-cost artisanal feed made from beach cast (macroalgae and marine phanerogams). The effectiveness of these feeds was tested based on growth data (size, weight, condition factor) and phenotypic data (body shape, gut length, dentition). The results showed similar survival rates in ponds regardless of the feed provided. *S. sutor* fed with industrial feed showed superior growth (15.5 cm after 3 months) compared to those fed with the artisanal preparation (11.84 cm after 3 months). This difference could be explained by the lower protein content and other vitamins in the artisanal feed, leading to deficiencies and thus stunted growth. After 1.5 months of growth, fish raised on industrial feed had shorter digestive tracts than wild individuals and those raised on artisanal feed. However, this difference diminished over the course of the rearing period. Regardless of the diet, farmed fish displayed a different body shape compared to wild individuals, indicating an impact of captivity on the morphology of this species. This difference in shape, particularly at the fin insertions, is likely related to insufficient water turbulence in captivity. Dentition did not show differences based on the diet received. This preliminary study reveals that *S. sutor* is a species with high potential for aquaculture due to its tolerance, availability, herbivorous diet, and the high densities at which it can be raised. However, rearing conditions and feed need to be improved to achieve better performance, whether for aquaculture production or reintroduction purposes.

Table des matières

I. Contexte	1
II. Introduction	2
2.1. Problématique de la surpêche.....	2
2.2 L'aquaculture	5
2.3. Siganus Sutor (Valenciennes, 1835)	9
2.4. Objectifs	11
III. Matériels et méthodes	12
3.1 Capture de Siganus sutor juvéniles.....	12
3.2 Mise en bassin	13
3.3. Nourrissage et fabrication de l'aliment artisanal	15
3.4. Collecte des données zootechniques des poissons.....	17
3.5. Traitement des données.....	18
IV. Résultats	23
4.1 Mortalité	23
4.2 Croissance	24
4.3 Longueurs de tubes digestifs.....	25
4.4 Morphométrie géométrique	26
4.5. Dentition	30
V. Discussion	33
5.1. Survie de S. sutor en milieu fermé	33
5.2. Croissance	34
5.3. Variations phénotypiques	37
5.4. Le poisson-lapin Siganus sutor est-il un bon candidat pour l'aquaculture à Madagascar ?.....	39
VI. Conclusion	42
VII. Bibliographie	43

I. Contexte

A l'heure actuelle, la surpêche est un problème mondial. Avec une population grandissante, la quantité de nourriture nécessaire afin d'assurer une sécurité alimentaire devra augmenter (Hall et al., 2017). Cependant, les stocks sauvages sont limités, voir en déclin (Srinivasan et al., 2010). C'est le cas dans l'Océan indien, notamment dans le Sud-Ouest de Madagascar où se déroule cette étude (Gough et al., 2020; Pollom et al., 2021).

Sur le grand récif de Toliara, il a été observé que les stocks ichtyologiques diminuent (Orth et al., 2006 ; Belle et al., 2009). Cela s'explique par la surexploitation du récif ainsi que par les techniques de pêche utilisées (Gough et al., 2020). La pêche au filet à petites mailles (filets construits à l'aide de toiles de moustiquaire) y est fréquente (Ranaivoson et al., 2006). Cette technique capture tout, y compris des individus juvéniles n'ayant pas eu le temps de se reproduire. A terme, cela contribue à la diminution des stocks de poissons sur le récif et pourrait provoquer la disparition locale d'espèces (Chande et al., 2019). Plusieurs solutions à la surpêche existent telles que l'instauration de quotas de capture, de zones protégées, de tailles minimales de capture, etc... Cependant, ces contraintes sont dures à appliquer dans la région en raison d'une pêche vivrière et artisanale vitales. De plus, les moyens de surveillance de telles règles sont quasi inexistant dans un pays tel que Madagascar. Une solution potentielle serait la production d'individus juvéniles en aquaculture. Cette production permettrait d'une part de reempoisonner le récifs en juvéniles (restockage du milieu naturel) et d'autre part, de produire en milieu contrôlé des individus de taille marchande directement destinés au marché local, ouvrant ainsi la voie vers de nouveaux métiers de production (Hair et al., 2002).

Dans ce mémoire, j'ai pour objectif d'évaluer la faisabilité de développer l'élevage en milieu contrôlé du sigan cordonnier (*Siganus sutor*) et optimiser sa croissance à faible coût. Cette espèce de poisson lapin (Siganidae) herbivore à l'âge adulte (Duray, 1998) est un candidat intéressant pour l'aquaculture car il est fortement apprécié par les communautés locales et ses juvéniles sont abondants dans les filets des pêcheurs.

Des individus juvéniles de *S. sutor* ont été pêchés pour être mis en élevage. Durant plusieurs mois, nous avons évalué la faisabilité de développer l'aquaculture de cette espèce en testant deux types d'aliments: un aliment industriel coûteux fabriqué à base de farines et d'huiles de poissons et un aliment artisanal peu coûteux élaboré avec des laines de mer (végétaux échoués sur les plages). J'ai évalué l'élevage en bassin de cette espèce et je comparerai l'efficacité de ces aliments sur base de données de croissance (tailles, poids,

coefficient de condition) et d'autres données phénotypiques (forme du corps, longueur de tube digestif, dentition). Je testerai notamment l'hypothèse qu'une alimentation faite de débris végétaux induirait un taux de croissance et produirait des phénotypes différents de ceux obtenus avec une alimentation industrielle essentiellement composée de protéines animales. Il est attendu que les résultats obtenus permettront de prendre des décisions quant à l'avenir de la pisciculture du *Siganus sutor*.

II. Introduction

2.1. Problématique de la surpêche

La surpêche au niveau mondial

Pour l'année 2020, la production mondiale de la pêche de capture marine s'élevait à 78,8 millions de tonnes d'organismes. Ce chiffre est encore amené à croître au vu de la croissance de la population mondiale et de l'augmentation de la demande en produits alimentaires d'origine aquatique. En effet, la consommation de denrées venant du milieu aquatique est passée de 9,9 kg par an par habitant dans les années 60 à 20,2 kg en 2020, soit une augmentation moyenne de 3% par an depuis 1961. Selon les estimations de la FAO, la consommation des produits alimentaires d'origine aquatique pourrait atteindre 21,4 kg par personne par an (FAO, 2022). Cette augmentation de l'attrait pour les produits issus du milieu aquatique a fortement encouragé la surpêche. Link & Watson (2019) définissent la surpêche comme étant « une situation où la somme de toutes les captures est stable ou en déclin. Où le rendement par unité d'effort est en déclin et les débarquements totaux par rapport à la production de l'écosystème dépassent les limites appropriées ». Ainsi, depuis les années 70, le pourcentage des stocks étant exploités à un niveau biologiquement non durable, est passé de 10% en 1974, à 35,4% en 2019, ce qui montre bien que l'augmentation de la surpêche est corrélée avec celle de la consommation de produits d'origines aquatiques. La surpêche a des conséquences négatives importantes telle une mise en péril de la sécurité alimentaire (Pauly et al., 2005), la perte de biodiversité et les impacts sur le fonctionnement des écosystèmes aquatiques (Pauly et al., 2002). La surpêche a des effets dévastateurs sur l'environnement, notamment en perturbant les chaînes trophiques des milieux aquatiques par la pêche sélective d'espèces ayant des rôles essentiels dans la chaîne alimentaire (Daskalov, 2002). Il a été montré que beaucoup d'écosystèmes côtiers sont victimes de surpêche. Les produits de ces pêches étant principalement destinés à l'exportation vers l'hémisphère Nord, cette surpêche prive les petits

pêcheurs artisanaux pour lesquels la pêche est avant tout un moyen pour se nourrir avant d'être une source de profit (Atta-Mills et al., 2004).

La surpêche en milieu tropical

Les zones tropicales abritent l'un des écosystèmes marins les plus importants pour la diversité aquatique : les récifs coraliens. Ceux-ci ne recouvrent que 0,1% de la surface des océans mais ils abritent 25% de toutes les espèces marines connues, faisant de cet écosystème l'un des plus riches en termes de biodiversité. C'est cette diversité d'organismes qui rend les zones tropicales prisées pour les activités de pêche (Link & Watson, 2019). La surpêche en milieu tropical est également liée à l'augmentation de la population côtière. Cette augmentation démographique le long des côtes s'accompagne d'une augmentation de la pêche vivrière dans ces zones. Cette augmentation de la pression de pêche mène à une surexploitation des habitats côtiers (Crain et al., 2009). Dans l'ouest de l'océan Indien par exemple, 37,5% des stocks seraient exploités à un niveau biologiquement non durable. A l'heure actuelle, les captures dans les zones tropicales continuent d'augmenter, ce qui n'est plus le cas dans les zones tempérées et polaires (Link & Watson, 2019).

La surpêche à Madagascar et dans la baie Toliara

La pêche côtière à Madagascar est une pêche principalement vivrière et artisanale. Les pêcheurs se rendent sur leurs zones de pêche en pirogue. Ces embarcations mesurent généralement moins de 10 mètres de long et ne sont que très rarement, voire jamais motorisées. Les techniques de pêche sont variées. Pour cibler les plus gros poissons, l'utilisation de harpon (fusil ou à main), de lignes, de palangres ou encore de filets avec de larges mailles est courante. D'autres techniques ciblant de plus petits individus sont également utilisées. Ce sont des techniques qui utilisent des filets tirés depuis une pirogue ou même directement depuis la plage. Ces filets vont capturer les plus petits poissons, souvent des juvéniles, nageant dans la colonne d'eau (Gough et al., 2020). La pêche à la senne est une de ces techniques. Certains pêcheurs utilisent des filets dotés de mailles en moustiquaires. Ce type de pêche avec de très petites mailles est destructrice retirant souvent des individus n'ayant jamais eu la possibilité de se reproduire.

Le Grand Récif de Toliara (Fig. 1), long de 19 km et large de 1,5 à 4 km, est situé en face de la ville du même nom (Andréfouët et al., 2013). Entre le récif et la côte, s'étend un lagon dont la profondeur n'excède pas 10 mètres. Dans ce lagon, plusieurs habitats côtiers sont

présents tels des herbiers à phanérogames et des mangroves. Ces habitats sont d'une grande importance pour les premiers stades de vie de nombreux organismes marins, et notamment pour l'ichtyofaune (Harris et al., 2010).

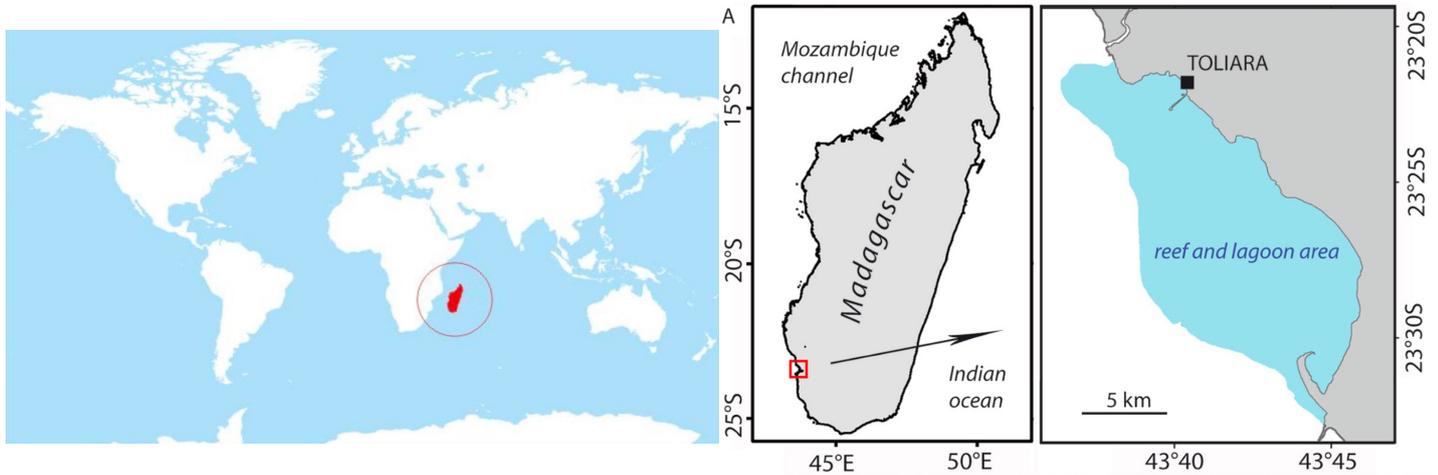


Fig. 1 :localisation de Madagascar et du Grand Récif de Toliara. Source : <https://fr.maps-madagascar.com>, (Behivoke et al., 2021)

Cette zone est traditionnellement exploitée pour la pêche par l'ethnie Vezo, même si depuis quelques années, certains peuples viennent depuis l'intérieur de terres, intéressés par les ressources que le récif a à offrir. Pour la ville de Toliara et pour les populations vivant sur la côte, la pêche est une ressource économique et alimentaire essentielle (Jaonalison, 2019). Cependant, l'augmentation de la population dans la région pose de sérieux problèmes au niveau des ressources maritimes. En effet, entre 1993 et 2008, la population de Toliara a augmenté de 53%, induisant une augmentation de la demande en nourriture, et donc une augmentation de la pêche (Bruggemann et al., 2012). Suite à cette augmentation de la population et de la pêche, la pêche artisanale des Vezos est devenue intensive dans la baie de Toliara avec environ 892 pirogues dénombrées dans la baie en 2017 (Behivoke et al., 2021). En plus du nombre important de pêcheurs, la principale problématique sont les techniques de pêche utilisées. Celles utilisant des filets de senne constitués de toiles de moustiquaires sont particulièrement dévastatrices pour l'écosystème. Avec ce type de filets, une grande partie des poissons capturés ne sont que des juvéniles dont la taille ne dépasse pas 2 cm et n'ayant pas encore atteint la taille de maturité sexuelle, privant ainsi le milieu de géniteurs, et provoquant une diminution des populations sauvages (Muluye et al., 2016). Lors de certaines pêches, la proportion de juvéniles capturés

peut monter jusqu'à 42% (Jaonalison, 2019). Tous les habitats côtiers du Grand Récif de Toliara sont touchés par ce phénomène de surpêche.

Solutions pour réduire la surpêche

Ils existent plusieurs solutions pour endiguer la surpêche (Du et al., 2021). Par exemple, la création d'aires marines protégées (AMP) de taille suffisante dans des zones d'intérêt est une solution pour réduire la pression de pêche dans certaines régions (Yunanto et al., 2018). Une autre solution est la gestion de la pêche avec des quotas, des tailles minimales de captures ou encore une réglementation appliquée à certaines techniques de pêche. C'est par exemple le cas en Europe où, chaque année, le Conseil des ministres de la pêche se réunit afin de définir les quotas de pêche annuels. Ceux-ci sont définis en fonction de l'avis scientifique de l'ICES (International Council for the Exploration of the Sea) (von Dorrien, 2008). Qu'en est-il de l'aquaculture ? Est-ce que l'aquaculture peut nous aider à nous affranchir des stocks sauvages et à limiter l'impact de la surpêche sur l'environnement ? Peut-elle aider à la réintroduction d'individus élevés en milieu fermé dans le milieu naturel ?

2.2 L'aquaculture

L'aquaculture mondiale

En 2020, la production de l'aquaculture mondiale était de 87,5 millions de tonnes d'animaux aquatiques principalement destinés à l'alimentation humaine. L'aquaculture est un secteur économiquement en croissance et très important car il a permis de générer 281,5 milliards de dollars en 2020, ce qui représente une augmentation de 18,5 milliards de dollars par rapport à 2018 (FAO, 2022). L'aquaculture est donc un secteur d'une importance capitale, et ce particulièrement dans les années à venir au vu de la demande croissante en protéines animales d'origine aquatique et d'un écosystème marin déjà surexploité (Hall et al., 2017). Cette demande croissante et ce besoin d'innovation dans le milieu se font particulièrement ressentir dans les pays en développement comme Madagascar.

L'état de l'aquaculture en Afrique et à Madagascar

Mondialement, toutes les régions ont connu une croissance continue du secteur de l'aquaculture en 2020. L'aquaculture sur le continent Africain est également en augmentation avec une croissance de 14,5% en 2020 par rapport à 2019 si l'on retire les chiffres du Nigéria et de l'Égypte qui sont les deux plus gros producteurs Africain, mais ayant connu une diminution

de leur activité. L'aquaculture en Afrique est également une source d'emploi en pleine croissance même si elle reste faible par rapport à l'emploi fourni par la pêche (FAO, 2022).

L'un des pays d'Afrique offrant le plus de possibilités pour l'aquaculture est Madagascar. Tout d'abord, au vu de la croissance démographique du pays, la demande en poisson va fortement augmenter durant les prochaines années (FAO, 2022). L'avantage de l'île de Madagascar est la grande quantité d'eau disponible. Les eaux intérieures recouvrent 0,94% de la superficie du pays, soit une étendue de 5 518 km². Cela offre beaucoup de possibilités pour l'aquaculture continentale. En plus des eaux intérieures, Madagascar étant une île, elle possède également une grande diversité d'habitats côtiers. Sur 4 828 km de côtes, on retrouve des plages, des mangroves, des herbiers, des récifs coraliens (Universalis, 2014). Cette diversité d'habitat est propice au développement de l'aquaculture de nombreuses espèces sur l'île.

Un type de culture aquacole est déjà bien implanté à Madagascar et surpasse toutes les autres, c'est l'algoculture. La culture d'*Eucheuma spp.* représente 71,1% en quantité de la production de l'aquaculture totale du pays (FAO, 2023). Cependant, la majorité de cette production est destinée à l'exportation et non pas à l'alimentation des populations locales. Il en va de même pour l'élevage de crevettes. Madagascar possède une importante production de crevettes géantes tigrées (*Penaeus monodon*) en système semi-intensif ou intensif. De par son importante valeur marchande, la production de *P. monodon* à Madagascar représentait 79,1 % de la valeur de la production aquacole de Madagascar en 2021, alors qu'elle ne représente que 20% de la production en quantité (FAO, 2023). Si on s'intéresse plus à l'élevage piscicole, avec une production annuelle de 11 658 tonnes Madagascar est le quatrième plus gros exportateur de poissons d'Afrique de l'Est. Le pays connaît une croissance de l'aquaculture de 3,5% depuis les années 2000, en passant de 7 980 tonnes en 2000 à 16 396 tonnes en 2021. La majorité de la pisciculture malgache est de l'élevage de poissons d'eau douce. Les poissons les plus élevés sont le tilapia du Nil (*Oreochromis niloticus*) et la carpe commune (*Cyprinus carpio*) en système semi-intensif et intensif. L'élevage de poissons d'eau douce représente 8,1 % de la quantité de produits aquacoles produits à Madagascar (FAO, 2023). L'aquaculture de poissons marins y est quasiment nulle, c'est pourquoi beaucoup d'opportunités de développement de ce type de culture y sont possibles (FAO, 2023). Cependant, les populations locales n'ont pas les infrastructures, ni le savoir-faire pour développer ce type d'aquaculture.

Aquaculture de poissons récifaux comme solution à la surpêche

Est-il possible d'utiliser l'aquaculture comme une alternative à la pêche afin de réduire la pression de capture sur le milieu marin? Globalement, les pratiques d'aquaculture actuelles n'aident pas à réduire la pression de pêche à des niveaux durables. Aujourd'hui, l'aquaculture contribue en partie à la surpêche à cause de la fabrication d'aliments à base de farines et huiles de poissons destinés à l'élevage animal. Par exemple en 2020, 20% de la pêche de capture mondiale étaient destinés à la fabrication d'huiles et farines de poissons. 86% de la farine de poissons ont été utilisés pour confectionner de l'aliment destiné à l'aquaculture (FAO, 2022). Afin d'avoir une aquaculture plus durable, il faut trouver des alternatives aux farines et huiles de poissons. En plus d'être peu durable, un aliment d'origine animale est également très coûteux comparé à un aliment d'origine végétal (O'Keefe, 2003). Un aliment végétal est donc une solution (Hussain et al., 2024), comme déjà testé chez de nombreuses espèces comme la truite arc-en-ciel *Oncorhynchus mykiss* (Gomes et al., 1995) ou encore le tilapia *Oreochromis niloticus* (Sallam et al., 2021). Dans le cadre de ce mémoire, nous allons également évaluer la faisabilité d'un remplacement total d'un aliment d'origine animale par un aliment végétal. Plus précisément, il sera composé de lasses de mer (rejet de végétaux par la mer lors des marées). Je développerai les compositions de l'aliment dans la partie « Matériels et méthodes ».

En plus d'un remplacement du régime alimentaire, il est nécessaire de développer la culture d'espèces herbivores. À l'heure actuelle, une grande majorité de l'aquaculture est basée sur l'élevage de poissons carnivores. Or, l'élevage de telles espèces peut s'avérer coûteux et peu durables (Li et al., 2018). Les espèces herbivores sont intéressantes pour l'aquaculture car elles nécessitent moins de besoins en protéines et lipides ainsi qu'une grande efficacité dans l'utilisation des protéines végétales. De plus les espèces herbivores (tels que les siganidés) semblent posséder de bonnes qualités nutritionnelles et des faibles coûts d'élevage (Li et al., 2018). Tous ces éléments font de l'élevage de poissons herbivores une solution vers une aquaculture plus durable et bon marché qui est nécessaire dans les pays du sud pour lesquels les moyens financiers sont limités. Une solution pourrait être une aquaculture villageoise comme l'a fait l'IOT à Toliara, offrant ainsi une formation et des revenus aux population locales (Robson & Rakotozafy, 2015).

Il faut également s'intéresser à l'origine des individus élevés en milieu contrôlé. d'après Froehlich et al. (2023), si certaines espèces capturées à l'état sauvage (87 espèces considérées dans l'étude) étaient plutôt produites par « capture-based aquaculture (CBA) », presque un million de tonnes de poissons supplémentaires pourraient théoriquement être laissés dans la

nature, sans réduire la production. Selon la même étude, si on s'affranchissait du milieu sauvage pour l'approvisionnement de géniteurs ou de juvéniles pour le grossissement et qu'on maîtrisait les cycles de reproduction pour avoir une aquaculture « domestique », on pourrait doubler la production aquacole d'espèces surexploitées. Cela permettrait de soutenir la pêche à des niveaux d'exploitation durable. Les principaux problèmes rencontrés au développement de ces techniques sont l'obtention de gamètes et de larves de qualité. L'alimentation larvaire constitue souvent un défi puisque les larves de poissons marins demandent un aliment vivant de très petites tailles (phytoplancton et zooplancton) (Hernandez de-Dios et al., 2022). La solution la plus fréquemment utilisée est celle qui consiste donc à capturer des larves ou juvéniles dans le milieu naturel et les faire grossir en milieu contrôlé. Cette technique est particulièrement utilisée pour la culture de bivalves (moules, huîtres, etc...) mais certaines espèces de poissons sont aussi élevées de la sorte tels que les chanos (*Chanos chanos*), les anguilles (*Anguilla spp.*) ou encore certaines espèces de thon (*Thunnus maccoyii*) (Hair et al., 2002). Dans le cadre de ce mémoire, je vais m'intéresser à la faisabilité d'une production aquacole basée sur la capture de juvéniles dans le milieu récifal.

Potentiel de l'aquaculture de Siganidae

Sur le grand récif de Toliara (GRT), une famille de poissons est largement majoritaire dans les captures de filets de senne, les Siganidae (Jaonalison, 2019). Ceux-ci, appelés également poissons lapins, intéressent depuis longtemps les scientifiques et les aquaculteurs car ils semblent posséder d'intéressantes caractéristiques pour la mariculture. Celles-ci sont décrites par Lam (1974) ci-après.

- Les siganidés sont très appréciés par les populations de l'océan Indien. Ils sont savoureux et possèdent de relativement bonnes concentrations en protéines. La demande sur le marché est donc haute (expliquant en partie sa surpêche).
- Ils sont herbivores à l'état sauvage mais ils s'adaptent à une large variété d'aliments en captivité.
- A certaines périodes de l'année, une grande quantité d'œufs et d'alevins peuvent être collectés facilement pour une mise en élevage.
- La majorité des siganidés sont sociaux et vivent en banc. On peut donc supposer qu'ils supportent de fortes densités d'élevage.

- Ils montrent une forte tolérance à des variations de paramètres d'élevage, notamment de salinité et de température. Cela a par exemple été montré chez *Siganus canaliculatus*.
- Il a été montré qu'ils s'adaptent bien à la captivité et qu'ils grandissent rapidement avec un régime naturel (algues et plantes) ou artificiel (granulés).
- Deux espèces (*S.canaliculatus* et *S.rivulatus*) ont déjà pondu en captivité par induction de la ponte par gonadotrophine (HCG). Une fertilisation artificielle a ensuite été réalisée avec succès par simple stripping des mâles et des femelles. Ces mêmes espèces ont également déjà pondu de manière naturelle en condition d'élevage.
- Une seule espèce (*S. fuscescens*) a pu être élevée du stade larvaire à la taille commercialisable. Pour les autres espèces, il a été difficile de trouver un aliment adapté pour les larves conduisant à de hauts taux de mortalités. Cela a été possible avec *S. fuscescens* qui possède des larves de plus grande taille que les deux autres espèces citées précédemment.
- Il semblerait également que certaines espèces arrivent à maturité sexuelle plus rapidement en captivité lorsqu'elles sont nourries avec un aliment de qualité (Duray, 1998).

2.3. *Siganus Sutor* (Valenciennes, 1835)

Siganus sutor (Fig. 2) appelé en français « sigan cordonnier » et « amburamasaka » en malgache est une espèce endémique de l'océan Indien. On le retrouve à des profondeurs pouvant atteindre 40 mètres (Simon, 2012). A l'âge adulte, il peut mesurer jusqu'à 45 cm et fréquente à la fois l'herbier et le récif corallien. Ce poisson herbivore est essentiel pour protéger le récif corallien étant donné qu'il va contrôler le développement de macroalgues qui envahissent les habitats récifaux dégradés (Chong-Seng et al., 2014). Ce poisson présente majoritairement un style de vie diurne avec une faible activité nocturne (Ebrahim et al., 2020). Pour les populations de pays côtiers africains, c'est l'une des espèces les plus importantes commercialement avec des espèces de lethrinidae (Ntiba et Jaccarini, 1988). Dans certains pays, comme à Madagascar, il est même considéré comme un met raffiné (Duray, 1998). Les siganidés sont divisés en 2 groupes en fonction de leur comportement. Le premier groupe reprend les individus vivant par paire, territoriaux et strictement associés aux récifs coralliens. Ces espèces sont fragiles et fortement sensibles aux changements physico-chimiques de l'eau. L'autre groupe comprend les individus sociaux et vivant en banc. Ils arborent des couleurs

ternes et sont résistants à de forts changements de température et de salinité, faisant d'eux des candidats intéressants pour l'aquaculture (Gundermann et al., 1983). Les larves de siganidés sont pélagiques, comme c'est le cas de bons nombres de poissons marins (Johannes, 1978).



Fig. 2 : *Siganus sutor* (Source : WORMS)

Comme la majorité des siganidés, les juvéniles et les adultes de *S. sutor* utilisent des habitats fort différents pour leur croissance. Les adultes vivent principalement sur le récif corallien alors que les juvéniles se rencontrent principalement dans les herbiers (Duray, 1998). C'est pourquoi les pêches dans les zones d'herbiers et notamment celle de la baie de Toliara qui est notre zone d'étude peuvent être dévastatrices pour l'espèce. Il a été montré que la zone d'herbier d'Ankilibe, un petit peu au Sud de Toliara, était une zone importante de nurserie pour l'espèce (Jaonalison, 2019). Cela est principalement visible au vu de la quantité de juvéniles capturés dans les filets. C'est notamment la grande proportion de *S.sutor* juvéniles capturés dans les filets qui en fait une espèce avec un grand potentiel pour des essais de grossissement par « capture-based aquaculture » (CBA). La proportion de juvéniles capturés par les filets de senne dans cette zone montre également que cette espèce est vulnérable puisque la capture de juvéniles par ces techniques de pêche prive le récif d'adultes et donc de géniteurs ce qui entraîne un déclin des populations (Jaonalison, 2019). Le déclin des juvéniles de siganidés a déjà été mis en avant. Grâce à l'utilisation de pièges lumineux, il a été observé que la quantité de *S.sutor* capturés par cette technique n'a cessé de diminuer entre 2009 et 2018, passant de 46,5% des captures en 2009, à 6,4% en 2018 avec un minimum atteint en 2017 où les post-larves de siganidés ne constituaient que 1% des captures (Jaonalison, 2019).

Les captures intensives de juvéniles et adultes de *S. sutor* questionnent sa vulnérabilité. Des mesures de protection pour cette espèce devraient être envisagées et celles-ci aideraient probablement des nombreuses autres espèces. La mise en place de zones de protection dans des écosystèmes d'intérêt tels que les herbiers pourrait être envisagée (Criscoli et al., 2017). Cependant, ce type de protection est difficile à appliquer dans les pays où les moyens de subsistance des populations côtières dépendent fortement de la petite pêche (Cinner, 2011). L'aquaculture villageoise de *S. sutor* pourrait être l'un des meilleurs compromis en offrant une source de revenus alternatifs aux pêcheurs (Syukur et al., 2018). C'est dans ce cadre que mon étude sur le *Siganus sutor* va se positionner.

On pourrait également envisager d'utiliser l'aquaculture de *S.sutor* dans une optique de repoissonnement. Cependant celle-ci a des inconvénients. Les poissons élevés dans un milieu contrôlé vont-ils réussir à se réadapter à l'environnement naturel? Il est bien connu qu'en raison de différences avec l'environnement sauvage, l'environnement en captivité entraîne des changements plastiques et génétiques dans les phénotypes associés à la fitness dans les environnements naturels. Cela conduit souvent à une diminution de la fitness chez les individus élevés en captivité lorsqu'ils sont relâchés dans la nature dans le cadre de programmes de réintroduction des espèces (Fraser, 2016).

2.4. Objectifs

Mon objectif général sera donc d'évaluer les possibilités de développer l'élevage en conditions contrôlées de juvéniles de *Siganus sutor* capturés avec des filets à moustiquaire dans la baie de Toliara. Un premier objectif spécifique sera de comparer l'effet de deux types d'aliment (un aliment végétal, artisanal fabriqué à base de laisses de marées et un aliment industriel contenant de la farine de poisson) sur la croissance de *S. sutor*. Le second objectif d'étudier l'effet de ces différents régimes alimentaires sur des caractères phénotypiques (longueur de tube digestif, variation de formes, dentition) de l'espèce. Cette dernière information sera importante pour envisager un éventuel repoissonnement. Il est attendu que les performances de croissances soient différentes entre les deux aliments. Je voudrais également vérifier l'hypothèse que l'aliment d'origine végétal permettra le développement de caractères similaires à ceux observés chez des individus sauvages.

III. Matériels et méthodes

3.1 Capture de *Siganus sutor* juvéniles

Du 28 février au 5 mars 2024, des pêches ont été effectuées sur le grand récif de Toliara (Fig. 3) afin de capturer des individus juvéniles de *Siganus sutor*. Entre trois et cinq pêches par jour ont été réalisées durant cette période. La période de vives eaux de pleines lunes a été ciblée car c'est la plus propice pour la pêche, où l'abondance de poissons dans les zones d'herbiers est la plus grande. C'est également durant cette période que les pêcheurs ont accès aux zones de pêches à pied et c'était une nécessité au vue de la technique de pêche utilisée.

Les pêches ont eu lieu principalement dans une zone située en face du village de Sarodrano (23°31'04'S, 43°44'07'E) (Fig. 3). C'est une zone d'herbiers connue pour être riche en juvéniles de *S. sutor* (Jaonalison, 2019). Les pêches ont été réalisées au moyen de sennes de fond construites avec du tissu moustiquaire (Fig. 4) depuis des pirogues ou de la zone de plage (Fig. 3). Les poissons ciblés par notre pêche étaient des poissons mesurant entre six et dix centimètres.

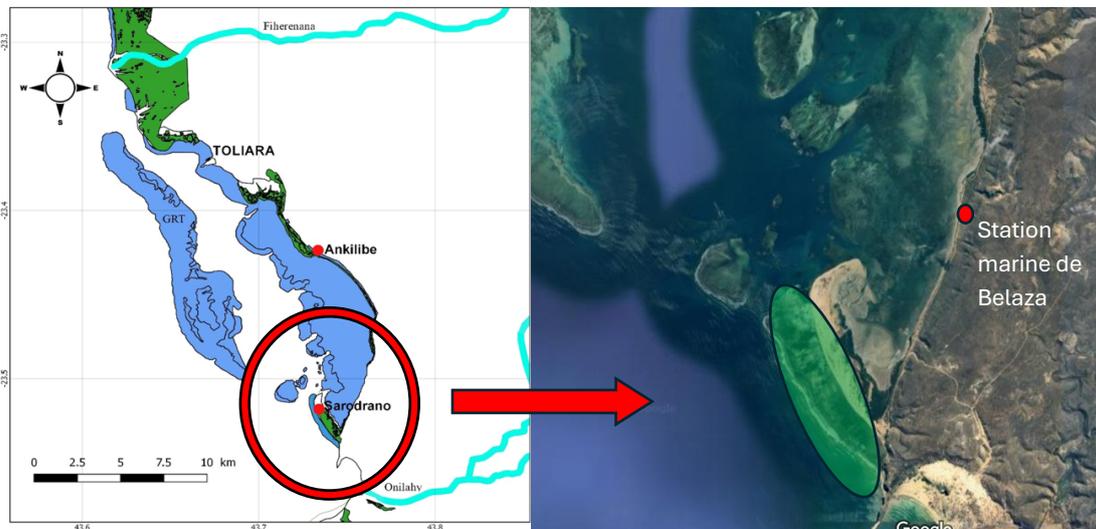


Fig. 3 : Localisation de la station marine de Belaza ainsi que de la zone de pêche (cercle vert) sur l'herbier en face du village de Sarodrano. Source : Ravelohasina et al., 2024, Google maps.



*Fig. 4 : Pêche de *Siganus sutor* par les Vezos avec des filets de senne constitués de toiles de moustiquaires.
Photo : G.Lepoint*

Les juvéniles *S. sutor* capturés ont été directement placés dans des bacs de 200 litres munis de plusieurs aérateurs pour les transporter le plus vite possible jusqu'à la station marine de Belaza (Fig. 3) afin de minimiser la mortalité. Au total, 768 individus ont été capturés pour notre expérimentation.

3.2 Mise en bassin

A la station, les poissons ont été acclimatés à l'eau de leur nouvel environnement, c'est-à-dire des bassins de 16 m³ (8m X 4m X 0,5m) en béton. Les derniers poissons ont été introduits dans les bassins le 5 mars 2024. Les individus n'ayant pas survécu à la pêche ou au transport ont été prélevés afin de quantifier des traits qui seront décrits ci-après. Ces individus ont été considérés comme représentatifs de la population sauvage avant la mise en charge des bassins. Ceux-ci seront donc qualifiés de « T0 » au vu de l'expérimentation.

Conditions d'élevage

Les quatre bassins en béton utilisés étaient initialement destinés à l'holoturiculture (Fig. 5). Un système d'ombrage était également présent ainsi que des filets protégeant les poissons des oiseaux et autres prédateurs potentiels, permettant également la création de zones d'ombre pour limiter l'augmentation de température dans les bassins et minimiser le stress des poissons (Fig. 5). La densité initiale de mise en charge était de 12 individus par m³. Il est important de signaler que de fortes mortalités ont été observées durant le premier mois. Après une analyse

de la situation, nous avons soupçonné que les poissons subissaient un stress important causé par des mauvaises pratiques d'élevage telles des introductions trop fréquentes de personnes dans les bassins afin de les nettoyer. Par conséquent, un redémarrage de l'expérimentation a été nécessaire. Le 17 avril 2024, tous les poissons furent redistribués entre les bassins en fonction de l'alimentation reçue précédemment, nous donnant une nouvelle densité d'élevage de 9 individus par m³.

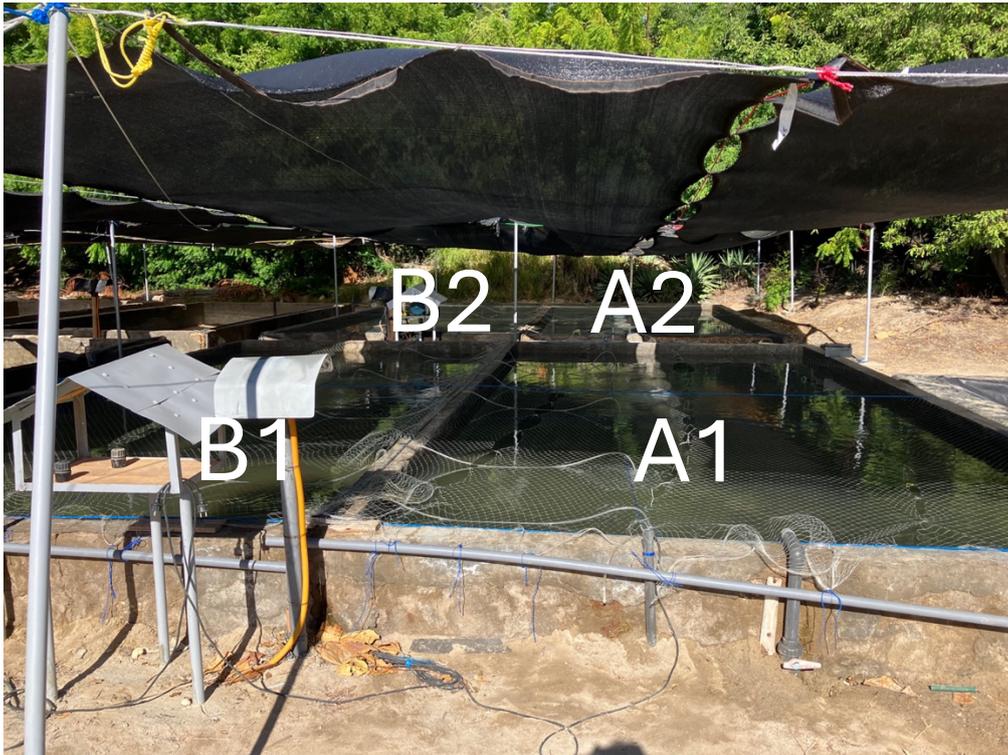


Fig. 5 : installation de la station marine de Belaza. A1 et B1 : aliment artisanal, A2 et B2 : aliment industriel.

Les paramètres de l'eau de mer dépendaient fortement de la qualité de l'eau du lagon. Grâce au système disponible à la station de Belaza, 50% de l'eau était renouvelée chaque jour durant la marée haute par un système de pompage situé directement dans le lagon à une vingtaine de mètres de la côte et donc de la station. Afin de maintenir une oxygénation optimale de l'eau pour les *Siganus*, six aérateurs (cinq de types « boules » et un de type « anneau ») ont été placés dans chaque bassin. Ceux-ci fonctionnaient 24h/24 et étaient reliés à deux compresseurs. Un compresseur permettait l'aération de deux bassins. Les paramètres physico-chimiques de l'eau (température, salinité et oxygène dissous) étaient relevés manuellement trois fois par jours (6h, 13h, 18h) avec une sonde multi-paramètres Hannah HI-9829. Les données maximales et minimales des paramètres d'intérêt sont repris dans le tableau 1. Durant le premier mois, les concentrations en oxygène dissous n'étaient pas toujours optimales (< 3 mg/L). Par

conséquent, dans une seconde partie de l'expérimentation, nous avons utilisé des pompes de circulation submersibles « Central Park 550w » en y ajoutant un système venturi afin d'améliorer l'oxygénation des bassins. Celles-ci étaient allumées dans deux bassins en alternance pendant 3h30 durant la journée dès que la source d'énergie était disponible (énergie solaire). A titre d'exemple, la figure 6 illustre la variation journalière de la concentration en oxygène dans le bassin B2 enregistrée le 3 mai 2024.

Tableau 1 : variations maximales et minimales des paramètres physico-chimiques d'intérêt dans B2 durant la durée de l'expérimentation.

	Minimum	Maximum	Moyenne
Température (C°)	22,93	33,54	26,6
Salinité [psu]	28,23	31,75	29,96
D.O. (%)	40	97,2	69,2
D.O (ppm)	2,64	8,45	4,7

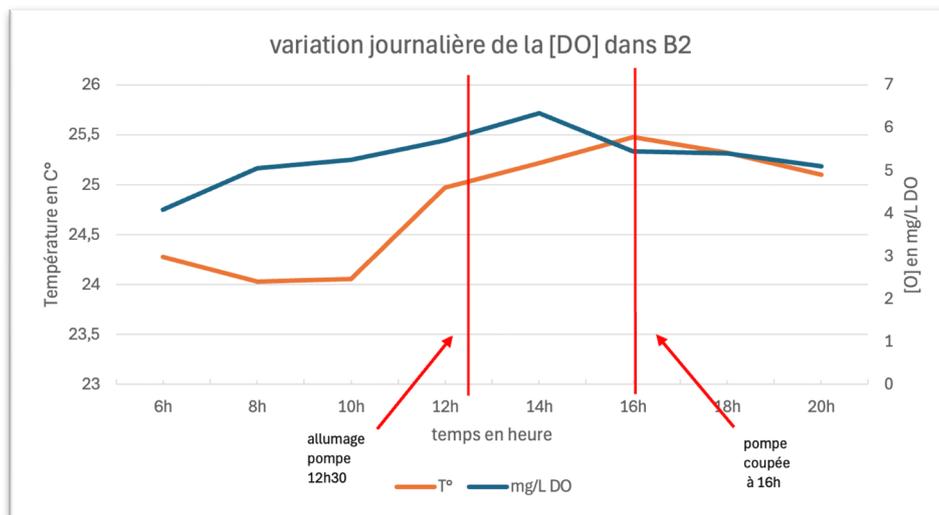


Fig. 6 : Variations journalières de la concentration en oxygène dissous dans le bassin B2 avec fonctionnement journalier des pompes de circulation pendant 3h30 le 3 mai 2024.

3.3. Nourrissage et fabrication de l'aliment artisanal

Conformément aux objectifs, 2 types d'aliment ont été testés. Le premier est un aliment industriel de la marque Agrival (protéines brut : 36,06% , lipides : 7,22%). Le second est un aliment artisanal fabriqué à la station marine de Belaza. Celui-ci est composé de laisses de mer récoltées par nos soins sur les plages environnantes. Après chaque récolte (2 à 3 fois par semaine), les laisses de mer sont triées manuellement afin d'enlever tous les déchets potentiels

(bois, plastique) qui se trouveraient parmi les macroalgues et les phanérogames. Une fois le tri réalisé, l'étape suivante consistait à broyer les laisses de mer à l'aide d'un hachoir à viande manuel pour en faire une pâte (Fig. 7b). Ensuite, cette pâte était bouillie afin de rendre l'aliment plus digeste pour les poissons (Lovell, 2003). Après cuisson, la pâte était séchée au soleil avant d'être mélangée avec les autres éléments qui composent notre aliment. La composition complète de l'aliment est reprise dans le tableau 2. La teneur en protéine totale est comprise entre 13,4% et 11%, celle en lipide est comprise entre 4,5% et 6%. Le mélange repassait ensuite dans le hachoir afin d'obtenir un aliment de forme cylindrique. La dernière étape était le séchage de l'aliment au soleil et sa découpe en petits morceaux.



Fig. 7 : Fabrication de l'aliment artisanal à base de laisses de mer. A : récolte des laisses de mer sur la plage. B : broyage des laisses après triage avec un hachoir à viande. C : mélange des laisses bouillies avec le reste des ingrédients. D : Formation de l'aliment à l'aide d'un hachoir à viande. E : rendu final de l'aliment après séchage.

Tableau 2 : Composition complète de l'aliment artisanal

Quantité(kg)	Désignation	Taux (%)
0,6	Laisse de mer	50
0,125	Farine de soja	10
0,075	Farine de maïs	6
0,025	Farine de manioc	2
0,15	Farine de Poisson	13
0,05	Farine d'Arachide	4
0,075	Son du riz	6
0,1	Huile de tournesol	8
1,2		100

Au total, quatre bassins ont été utilisés : deux par type d'aliment. La répartition s'est faite comme illustrée sur la figure 5 : les poissons des bacs A1 et B1 ont reçu l'alimentation artisanale préparée à base de laisses de mer et les individus des bacs A2 et B2 ont été nourris au moyen de l'aliment industriel. Dans un premier temps, la quantité d'aliment donnée représentait 8% de la biomasse d'élevage distribué en 3 fois par jour. Cependant, nous avons rapidement changé ce rythme de nourrissage (surnourrissage observé) pour finalement donner 4% de la biomasse en aliment et ce 5 fois par jour (8h, 10h, 12h, 14h, 16h). Ce rythme optimisait la consommation des aliments par les poissons.

3.4. Collecte des données zootechniques des poissons

Au début de l'expérimentation, le 6 mars, nous avons pesé et mesuré 50% des individus de chaque bassin. Ensuite, ces mesures ont été effectuées de la même manière toutes les deux semaines. Nous avons décidé de prendre la longueur standard (LS) pour définir la taille du corps, celle-ci étant définie comme la longueur entre l'extrémité antérieure du museau jusqu'à l'extrémité du pédoncule caudal situé au début des rayons de la nageoire caudale. Toutes ces manipulations ont été effectuées sur des poissons anesthésiés avec du MS 222 à une concentration de 20-30 mg/L (*Tricaine-Guidelines-2-7-20.pdf*, 2020).

Les individus T0 n'ayant pas survécu au transport (n = 11) ont également été pesés et mesurés (LS). Afin de comparer des variations morphologiques entre traitements, nous avons quantifié différents traits chez ces poissons T0 ainsi que chez des poissons sacrifiés le 2 mai (T1, 58 jours d'élevage) et le 19 juillet (T2, 99 jours d'élevage). Les poissons étaient

euthanasiés avec une solution de MS 222 en excès. Nous avons prélevé 5 individus par bassins, soit 10 individus par aliment . Ainsi, les poissons sacrifiés (T0, T1 et T2) ont été photographiés en parfaite vue latérale gauche. Ils ont ensuite été disséqués pour prélever et mesurer la longueur de leur tube digestif (de l'œsophage au rectum) et pour conserver leurs mâchoires afin de comparer leur dentition.

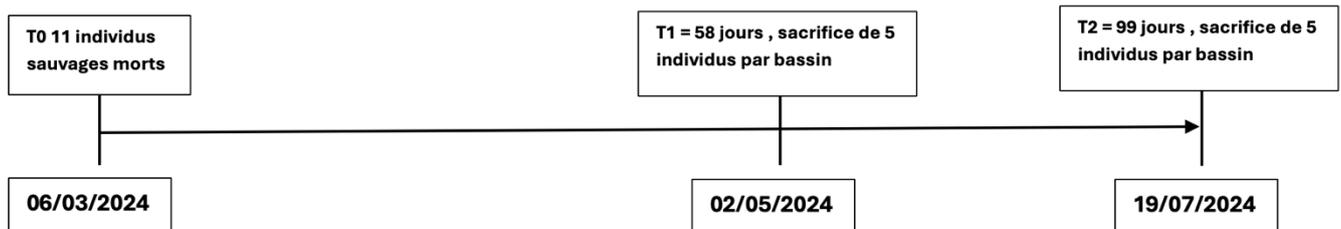


Fig 8. : Ligne du temps représentant les différents échantillonnages

3.5. Traitement des données

Toutes les statistiques ont été réalisées avec le logiciel R (version 4.0.3).

Survie

Tous les jours, les éventuels morts sont relevés des bassins. Le nombre de poissons par bassin a également été évalués toutes les deux semaines par un comptage total lors des pesées. Ce sont ces dernières données que nous allons utiliser pour évaluer la survie des *S. sutor* à Belaza. Les données s'étendent de T0 à T2 (= 99 jours d'élevage) pour les 2 régimes alimentaires. La normalité des valeurs ainsi que l'homogénéité des variances ont été testées au moyen respectivement des tests de Kolmogorov-Smirnov et de Breusch-Pagan (celui-ci étant spécifique aux modèles linéaires). Les données répondant positivement à ces différents tests (p -value > 0,05), la fonction « lm() » sera utilisée pour ajuster un modèle linéaire afin de comparer l'évolution de la mortalité en fonction du temps et de l'aliment reçu.

Analyse de la croissance

Les données de croissance (tailles et poids) ont été rassemblées par régime alimentaire et non par bassin. Cela a dû être fait au vue des problèmes que nous avons rencontrés pendant

l'élevage, rendant l'utilisation des valeurs pour chaque bassin inutilisable. La normalité des valeurs ainsi que l'homogénéité des variances ont été testées au moyen respectivement des tests de Kolmogorov-Smirnov et de Breusch-Pagan. Les données répondant positivement à ces différents tests (p -value $> 0,05$), la fonction « lm() » sera utilisée pour ajuster un modèle linéaire afin de comparer l'évolution de ces deux traits en fonction du temps et de l'aliment reçu.

En plus du poids et de la taille, le coefficient de condition de Fulton a également été calculé. Celui-ci étant donné par la formule :

$$K = \left(\frac{W}{L^3} \right) \times 100$$

K est l'indice de Fulton, W le poids du poisson en gramme, et L la longueur du poisson (longueur totale) en centimètres. Le coefficient de condition de Fulton est utilisé pour estimer le bien-être des poissons, c'est à dire comparer leur santé ou leur engraissement (Bagenal, 1978). Les données utilisées pour obtenir l'évolution au cours du temps du coefficient de condition de Fulton en fonction de deux alimentations sont celles provenant des pesées effectuées toutes les deux semaines. Celui-ci sera également calculer afin d'évaluer l'état de condition des poissons après 58 et 99 jours d'élevage. Les données utilisées pour calculer ce coefficient en fonction de l'aliment reçu viennent des poissons récoltés à T1, T2. Afin d'avoir un point de comparaison avec des poissons sauvages, les données des individus à T0 et des données provenant de précédents échantillonnages réalisés en 2021-2022 sont également utilisées. Les poissons sauvages font partie de la gamme de taille d'intérêt, soit entre 6 et 20 cm (Ls). La normalité de ces données a été vérifiée grâce au test de Kolmogorov-Smirnov et l'homogénéité des variances a été testée avec le test de Levene. Vu que ces données respectent ces conditions (p -value $> 0,05$), la fonction « lm() » sera utilisée pour ajuster un modèle linéaire afin de comparer l'évolution du coefficient de Fulton en fonction du temps et de l'aliment reçu

Analyse de la longueur du tube digestif

S. sutor est une espèce majoritairement herbivore à l'âge adulte et possède donc un très long intestin (Duray, 1998). Par conséquent, notre objectif était de vérifier si le type d'aliment avait une influence sur le développement du tube digestif. Ainsi, un rapport entre la longueur du TD et la taille des poissons mesurés à T0, T1 et T2 a été calculé pour chaque individu. La normalité de ces données a été vérifiée grâce au test de Kolmogorov-Smirnov et l'homogénéité des variances a été testée au moyen du test de Levene. Vu que ces données respectent ces

conditions (p -value $> 0,05$), une ANOVA a été appliquée au moyen de la fonction « aov () » suivie d'un test post-hoc de Tukey afin de vérifier une différence de la taille du tube digestif entre traitement.

Analyse de la variation de la forme du corps

Les photos en vue latérale de *S. sutor* ont été utilisées pour une analyse quantitative de la forme du corps au moyen de la morphométrie géométrique. En plus des clichés photographiques des individus T0, T1 et T2, des individus sauvages capturés lors de précédents échantillonnages (2021-2022) ont été également utilisés. Ces individus sauvages analysés mesuraient de 2,5 cm à 31,6 cm et ceux-ci ont permis de définir une trajectoire de variation morphologique de référence offrant un cadre comparatif pour les poissons élevés lors de l'expérimentation. Les poissons sauvages sont considérés comme juvéniles si leur longueur (LS) est inférieure à 8 cm, ceux-ci étant considérés comme subadultes au-delà de cette taille (Kamukuru, 2009). Au total, 77 clichés de poissons sauvages et 40 de poissons élevés à Belaza (20 par alimentation) ont été analysés.

La forme du corps des poissons a été quantifiée au moyen de 14 points repères (Landmarks : LMs) distribués sur l'entièreté du corps (Fig. 9) et enregistrés au moyen du programme TpsDig (version 2.32) (Rohlf, 2015). La description de chaque LM est détaillée dans le tableau 3. Le choix des LMs s'est inspiré du travail de Frédérick et al. (2012) dédié à l'étude la variation de la forme du corps d'un poisson chirurgical au cours de sa croissance. La fonction `gpagen()` du package *geomorph* (Version 4.0.4) a été utilisée pour éliminer toute variation autre que la forme au moyen d'une « Generalized Procrustes Analysis » (GPA) et pour générer les variables de formes. Ensuite, afin de visualiser des variations de forme entre les groupes dans l'espace morphologique, une analyse en composante principale (ACP) a été appliquée sur les variables de formes. Afin de vérifier la significativité des variations de formes en fonction des différents traitements, une ANOVA a été réalisée sur les scores de PC1 et PC2 au moyen de la fonction « aov() », suivi d'un test post-hoc de Tukey. Ensuite, des grilles de déformations permettant la description des différentes composantes principales ont été créées avec le logiciel Past4 (version 4.17) (Hammer et al., 2001).

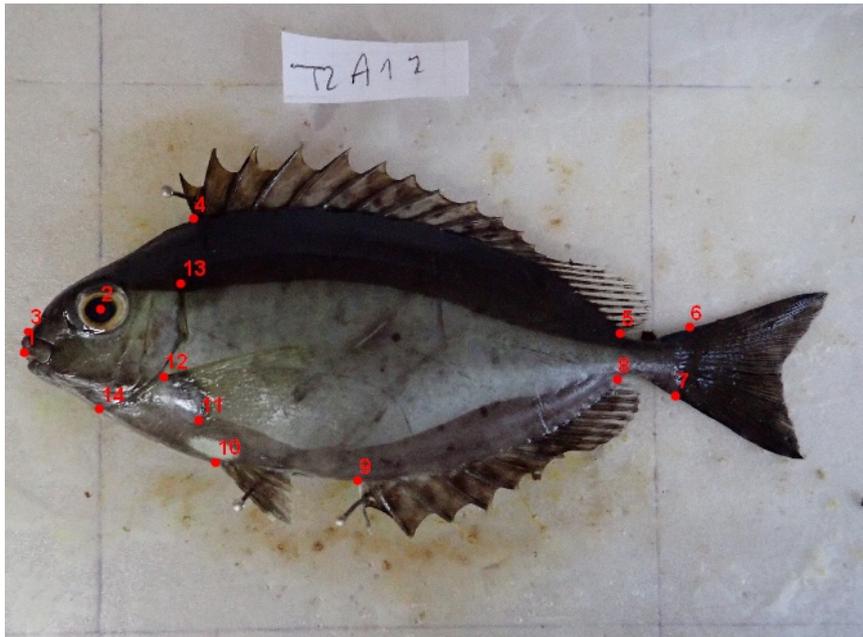


Fig. 9 : Photo d'un *Siganus sutor* avec une illustration des 14 points repères (landmarks). Ceux-ci sont décrits dans le tableau 2. Individus mesurant 14 cm (LT)

Tableau 3. Description des 14 points repères utilisés pour quantifier la forme du corps de *Siganus sutor*.

Numéro du landmark	Description du landmark
1	Extrémité de la bouche
2	Centre de l'œil
3	Extrémité postérieure du prémaxillaire
4	Insertion antérieure de la nageoire dorsale
5	Insertion postérieure de la nageoire dorsale
6	Base dorsale de la nageoire caudale
7	Base ventrale de la nageoire caudale
8	Insertion postérieure de la nageoire anale
9	Insertion antérieure de la nageoire anale
10	Insertion de la nageoire pelvienne
11	Insertion inférieure de la nageoire pectorale
12	Insertion supérieure de la nageoire pectorale
13	Bord le plus dorso-postérieur de l'opercule
14	Insertion de l'opercule en vue latérale

Analyse de la dentition

Les mâchoires supérieures et inférieures ont été minutieusement disséquées et nettoyées sous une loupe binoculaire au moyen de fines pinces. Ensuite, des photos des os prémaxillaires et dentaires ont été prises à l'aide d'un microscope Keyence VHX-7000. Les mâchoires proviennent des individus T0, T1, ainsi que d'individus échantillonnés en 2021-2022 capturés dans le milieu naturel. Ces photos seront utilisées pour une analyse visuelle comparative qualitative de la forme de la dentition de *S. sutor* élevés en bassins avec des individus sauvages.

IV. Résultats

4.1 Mortalité

Les taux de survie sont présentés par traitements. Les données des deux bassins par traitements ont dû être regroupées car un équilibrage de la mise en charge a été nécessaire suite à l'application de pratiques d'élevage non-optimales en début de l'expérimentation.

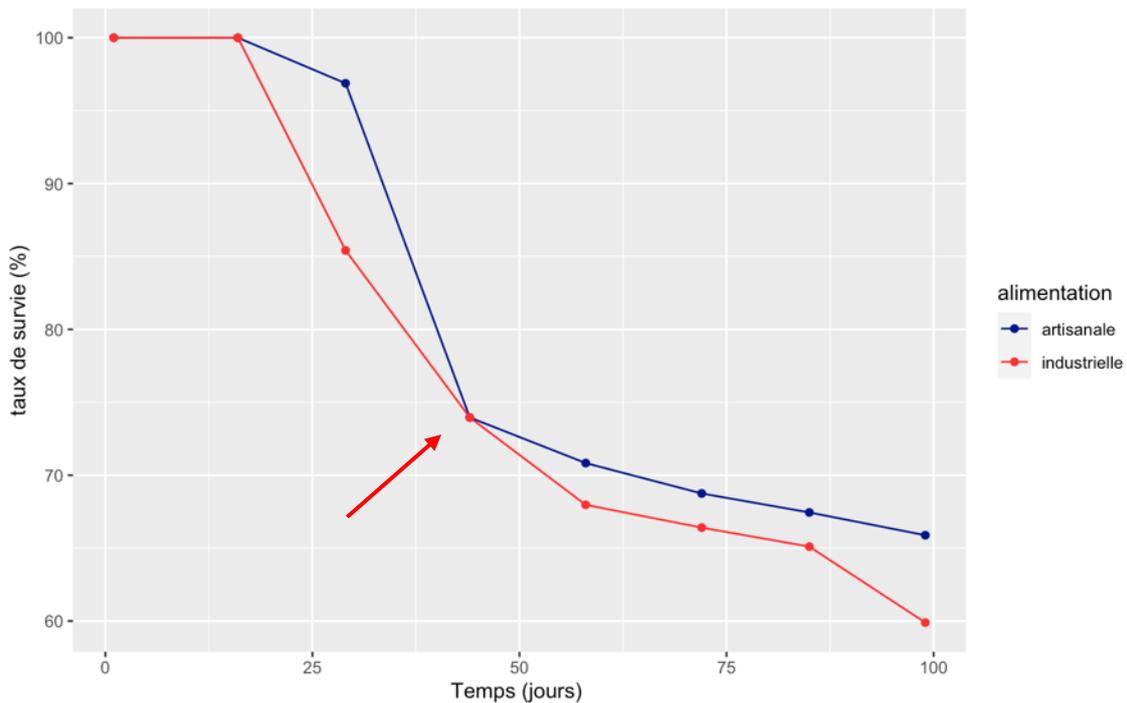


Fig. 10 : Évolution du taux de survie (%) au cours du temps selon le type d'alimentation. La flèche rouge indique le moment où les densités ont été rééquilibrées.

La figure 10 montre un relativement faible taux de survie rencontré durant le premier mois d'élevage. Une mortalité de 26% de la population initiale (200 individus) a été observée en 44 jours quel que soit le type d'aliment utilisé. Après rééquilibrage des populations et une modification de nos pratiques d'élevage, les mortalités ont fortement diminué et nous observons un taux de survie de 85% sur les derniers 55 jours d'expérience.

Que ce soit sur toute la période expérimentale (99 jours) ou seulement sur la période post adaptation (55 jours), il n'y a pas de différence significative du taux de survie entre les traitements alimentaires (p-value 99 jours = 0,8 et p-value 55 jours = 0,066).

4.2 Croissance

La figure 11 montre une croissance significativement plus rapide chez les individus ayant reçu une alimentation industrielle par rapport aux poissons nourris avec l'aliment artisanal (Fig. 11 ; taille : p-value = 3.88e-05 ; poids : p-value = 6.08e-10). Au terme de 99 jours d'élevage, les poissons nourris à l'aliment industriel ont atteint un poids corporel moyen de 91,3 g et une taille moyenne de 15,5 cm, soit une croissance moyenne de 0,79 g et 0,07 cm par jour. Les poissons nourris avec la préparation artisanale à base de laisses de marées ont atteint un poids corporel de 42,1g et une taille moyenne de 11,84 cm, soit une croissance moyenne de 0,16 g et 0,021 cm par jour.

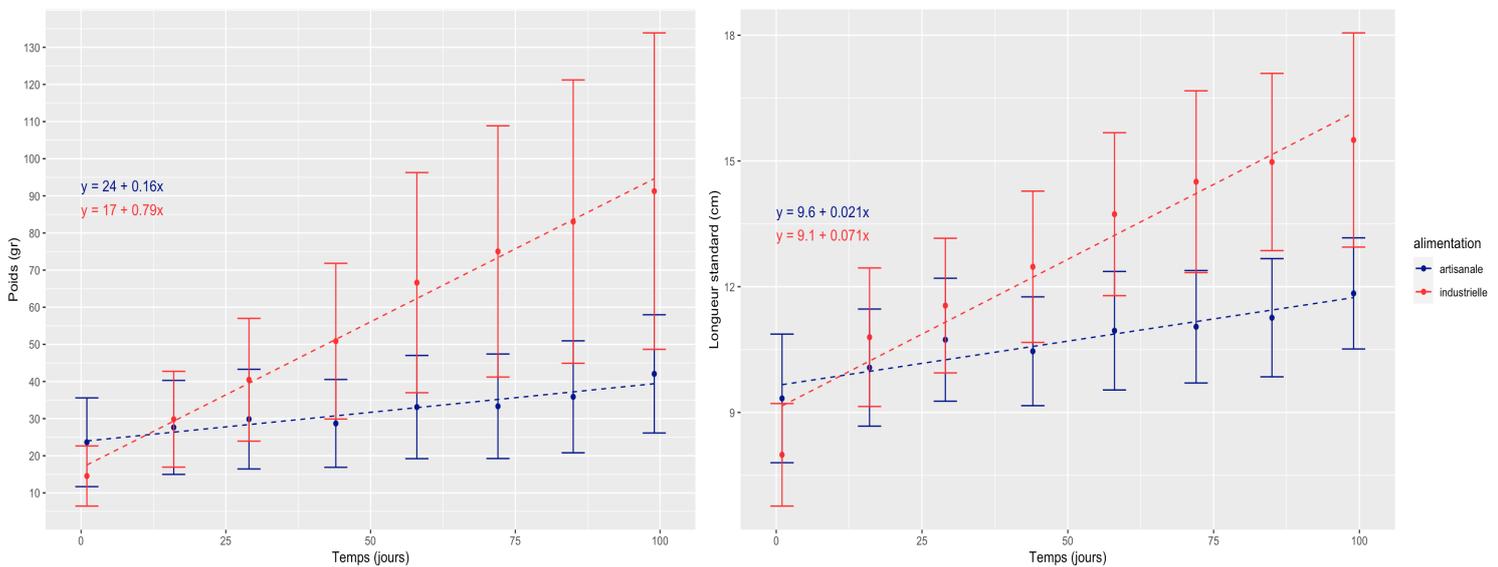


Fig. 11 Variation du poids (g) et de la longueur standard (LS) des *S. sutor* au cours du temps en fonction de deux alimentations.

Coefficient de condition de Fulton

L'application d'un modèle linéaire montre que le coefficient de condition de Fulton ne varie pas de façon significative au cours du temps (facteur « temps » : p-value = 0,075) (Fig. 12). Cette observation reste inchangée pour la variation du coefficient de condition de Fulton en fonction du temps et de l'alimentation (facteur « temps x traitement » : p-value = 0,84).

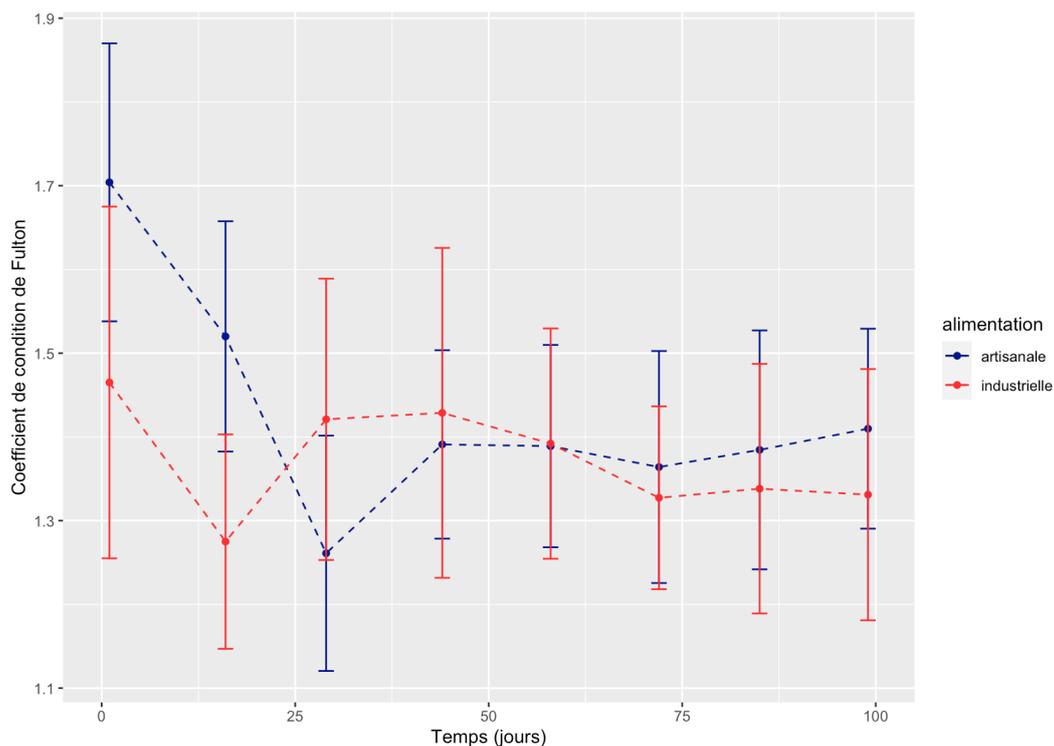


Fig. 12 : Évolution du coefficient de condition de Fulton des *S. sutor* au cours du temps en fonction de deux alimentations.

4.3 Longueurs de tubes digestifs

L'application d'une ANOVA révèle des différences significatives entre les traitements (df = 4, f-value = 26,89, p-value < 0,001, Fig. 13). A T2, les individus alimentés au moyen de la provende industrielle possèdent un tube digestif proportionnellement plus court (moyenne = 2,69) que celui des sauvages (moyenne = 4,17) (p-value < 0,001). Les individus alimentés au moyen de la provende artisanale possèdent également un tube digestif proportionnellement plus court (moyenne = 2,83) que les sauvages (p-value < 0,001) à T2. Cependant, on observe une importante variation temporelle de la longueur du tube digestif entre les poissons ayant reçu l'aliment artisanal jusqu'à T1 (moyenne = 4,45) et ceux l'ayant reçu jusqu'à T2 (moyenne = 2,83) (p-value < 0,001). La même tendance est observée entre les poissons nourris avec

l'aliment industriel jusqu'à T1 (moyenne = 3,64), et ceux élevés jusqu'à T2 avec le même aliment (moyenne = 2,69) (p -value < 0,001). Aucune variation significative de la longueur du tube digestif n'est observée entre les individus sauvages et ceux élevés à Belaza jusqu'à T1 quel que soit l'aliment reçu.

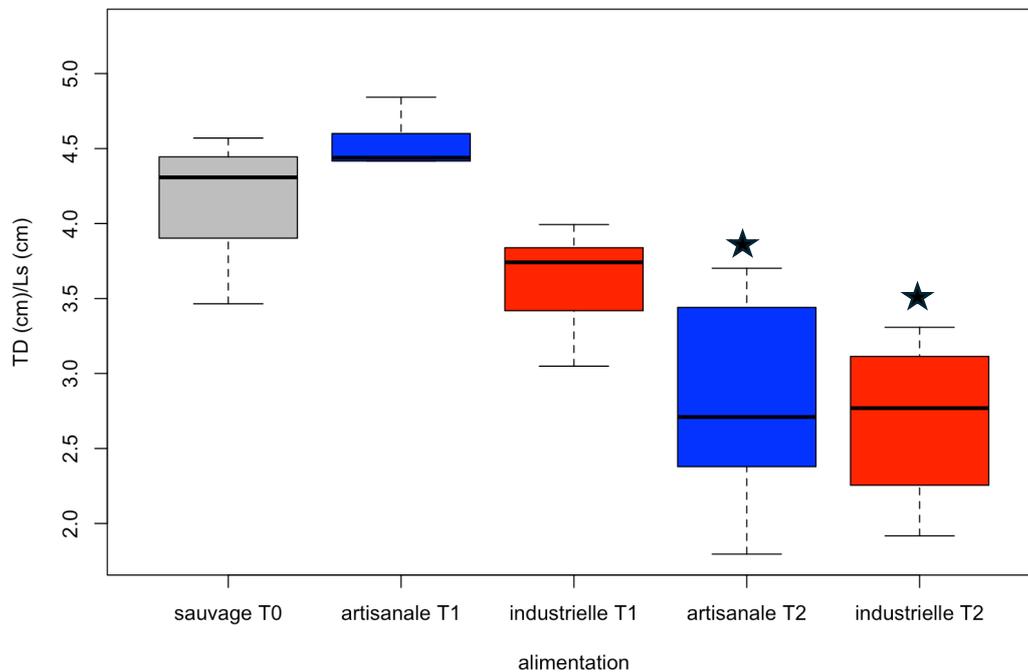


Fig. 13 : Boîte à moustache des rapports de longueur de tube digestif (TD) en centimètres sur la longueur standard (LS) en centimètres. Les données sont celles des individus élevés à la station de Belaza jusqu'à T1 et T2 avec deux alimentations différentes et celles d'individus sauvages prélevés à T0 sur l'herbier en face de Sarodrano.

4.4 Morphométrie géométrique

Analyses sur adultes et juvéniles : ontogénie S. sutor.

Dans le set de données utilisé, il y a des poissons sauvages de toute taille (de 2,5 à 31,6 cm) et les poissons élevés à la station de Belaza (T1 et T2). Le premier axe (PC1) et le deuxième axe (PC2) de l'ACP appliqué sur les variables de forme expliquent respectivement 56,7% et 9,6% de la variation, soit un total de 66% de la variation de forme du corps chez *S. sutor* (Fig. 14).

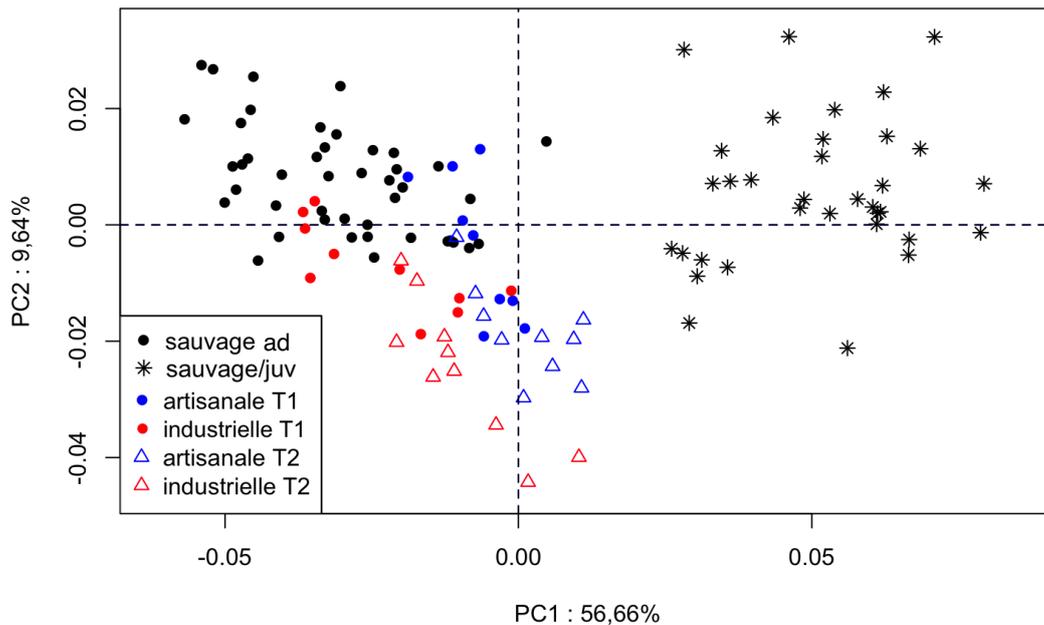


Fig. 14 : Résultat de l'analyse en composante principale illustrant les variations morphologiques chez les *S.sutor* sauvages de toute taille en séparant les juvéniles des autres individus et chez les poissons élevés à Belaza avec les 2 aliments à T1 et T2.

La distribution des poissons dans l'espace de forme suggère des variations morphologiques entre traitements (Fig. 14). L'axe PC1 capture majoritairement une différence de forme entre juvéniles (scores positifs le long de PC1) et adultes (scores négatifs le long de PC1). D'ailleurs, une ANOVA révèle des différences de forme significatives entre les individus juvéniles et les autres le long de PC1 (ANOVA : $df = 5$, $F = 144.7$, $p = 2e-16$, Fig. 15a). PC1 capture essentiellement des variations allométriques (Fig. 16). Les juvéniles (PC1+) sont surtout caractérisés par une région operculaire et frontale plus grande par rapport au reste du corps (LM 1-3-4-5-13-14) et un corps proportionnellement plus allongé (Fig. 17). En bref, les individus juvéniles présentent une région céphalique proportionnellement plus grande par rapport au reste du corps (Fig. 17 et 18 flèches vertes). Inversement, les individus de grande taille (PC1-) présentent une région céphalique plus courte et un corps plus allongé et profond (Fig. 17 et 18 flèches vertes).

Par contre, PC2 met plutôt en évidence une variation de forme entre les poissons élevés en captivité (scores négatifs le long de PC2 ,Fig. 14) et les poissons sauvages (scores positifs le long de PC2, Fig.14). Ces différences significatives (ANOVA : $df = 5$, $F = 25.31$, $p = 2e-16$, Fig. 15b) semblent peu liées à une variation de taille entre traitement et aliment reçu (Fig. 16).

Les *S. sutor* élevés à Belaza présentent des scores négatifs le long de PC2 (Fig. 14). Ces poissons d'élevage ont la région comprise entre l'insertion antérieure de la nageoire anale (landmark 9) et l'insertion de la nageoire pelvienne (landmark 10) plus courte (Fig. 17 et 18 flèches rouges). On remarque aussi que la région inférieure à l'insertion de la nageoire pectorale (landmark 11 et 12) est plus postérieure. Globalement, les *S. sutor* élevés à la station, pour les deux types d'alimentation, ont une région ventrale plus rectiligne que les individus sauvages. Ces variations de la forme expliquée par PC2 sont visibles grâce aux flèches rouges sur la figure 18.

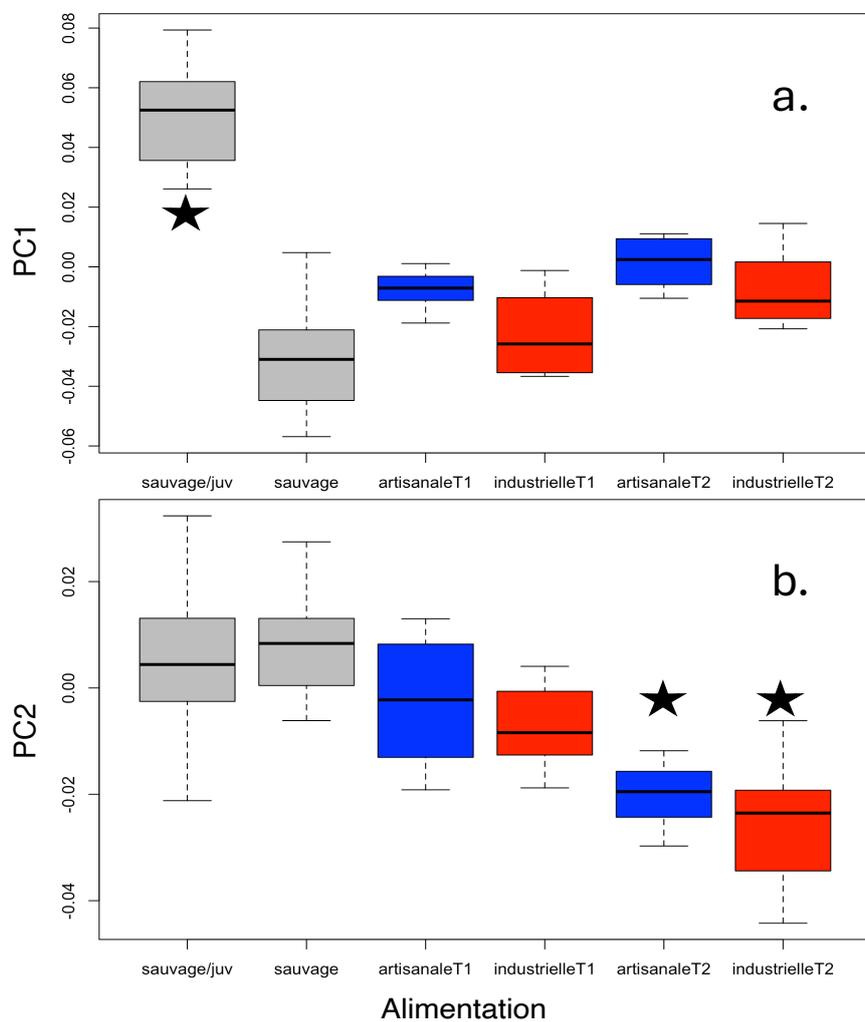


Fig. 15 : Boîtes à moustaches des scores de l'ACP en fonction des différents traitements reçus.
(PC1 = a., PC2 = b.)

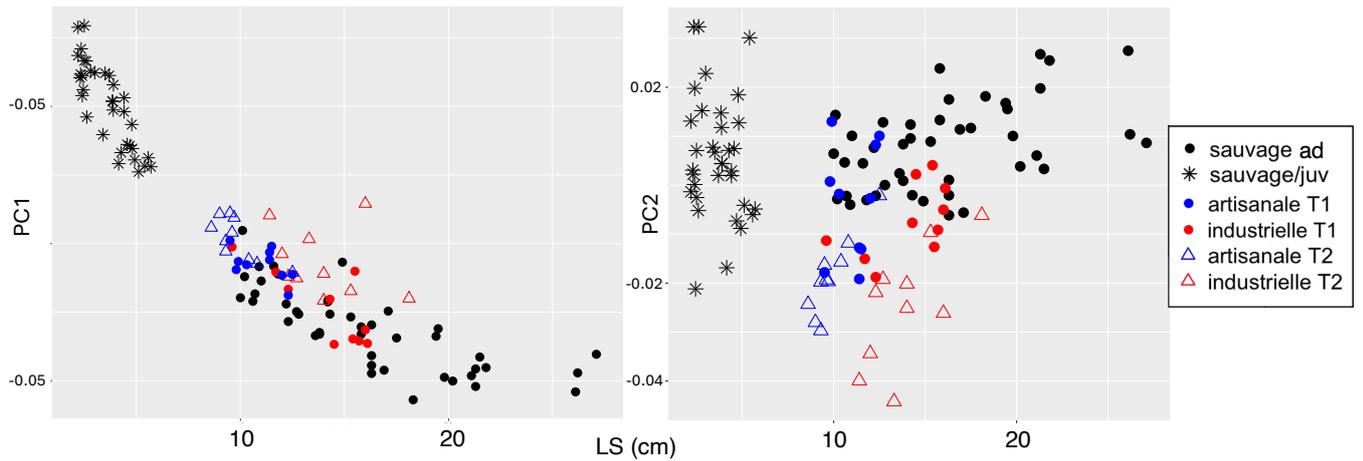


Fig. 16 : Graphiques des résultats de la PC1 (gauche) et de la PC2 (droite) en fonction de la longueur standard (LS) des poissons élevés jusqu'à T1 et T2, et les individus sauvages capturés en 2021-2022.

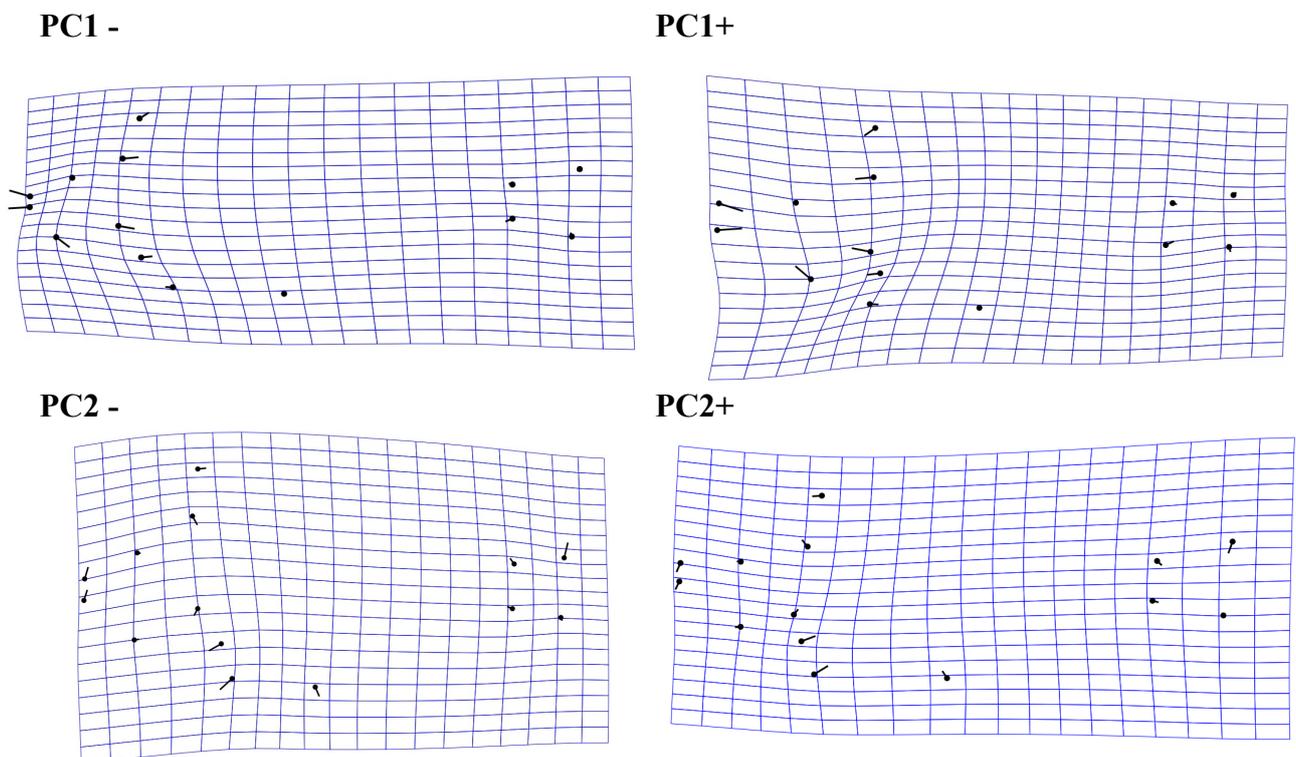


Fig. 17 : Grilles de déformation exprimant la variation de forme entre la forme consensus et les individus aux valeurs extrêmes le long des axes PC1 et PC2. La gauche de chaque grille correspond à la tête du poisson et la droite est la région caudale. Les points correspondent à l'emplacement des landmarks aux extrêmes et le point de départ des lignes liées à ceux-ci correspondent à l'emplacement des landmarks sur le consensus.

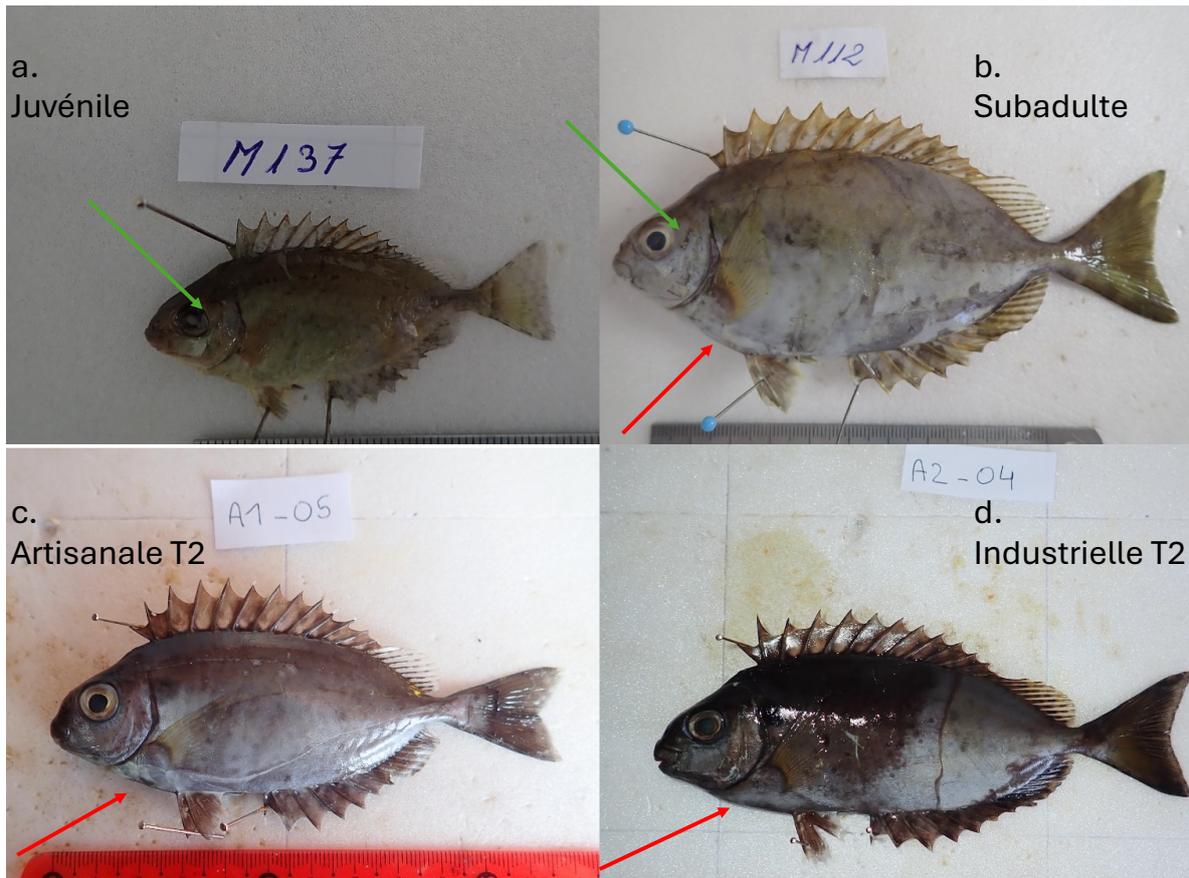
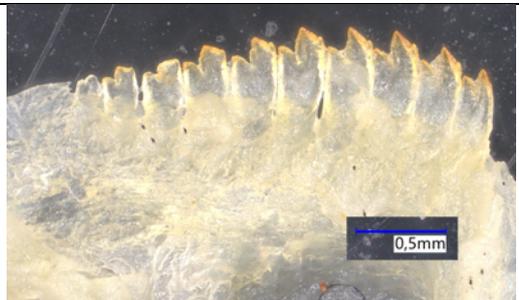


Fig. 18 : Photos de *S.sutor* sauvages (a,b) et élevés à la station de Belaza (c,d). Les flèches vertes montrent les zones de variations pour PC1 et les rouges pour PC2. La taille (LS) des différents individus est la suivantes :
 $a = 4,8 \text{ cm}$, $b = 12,2 \text{ cm}$, $c = 9,6 \text{ cm}$, $d = 13,3 \text{ cm}$.

4.5. Dentition

Alimentation	Prémaxillaire	Dentaire
Juveniles sauvages		

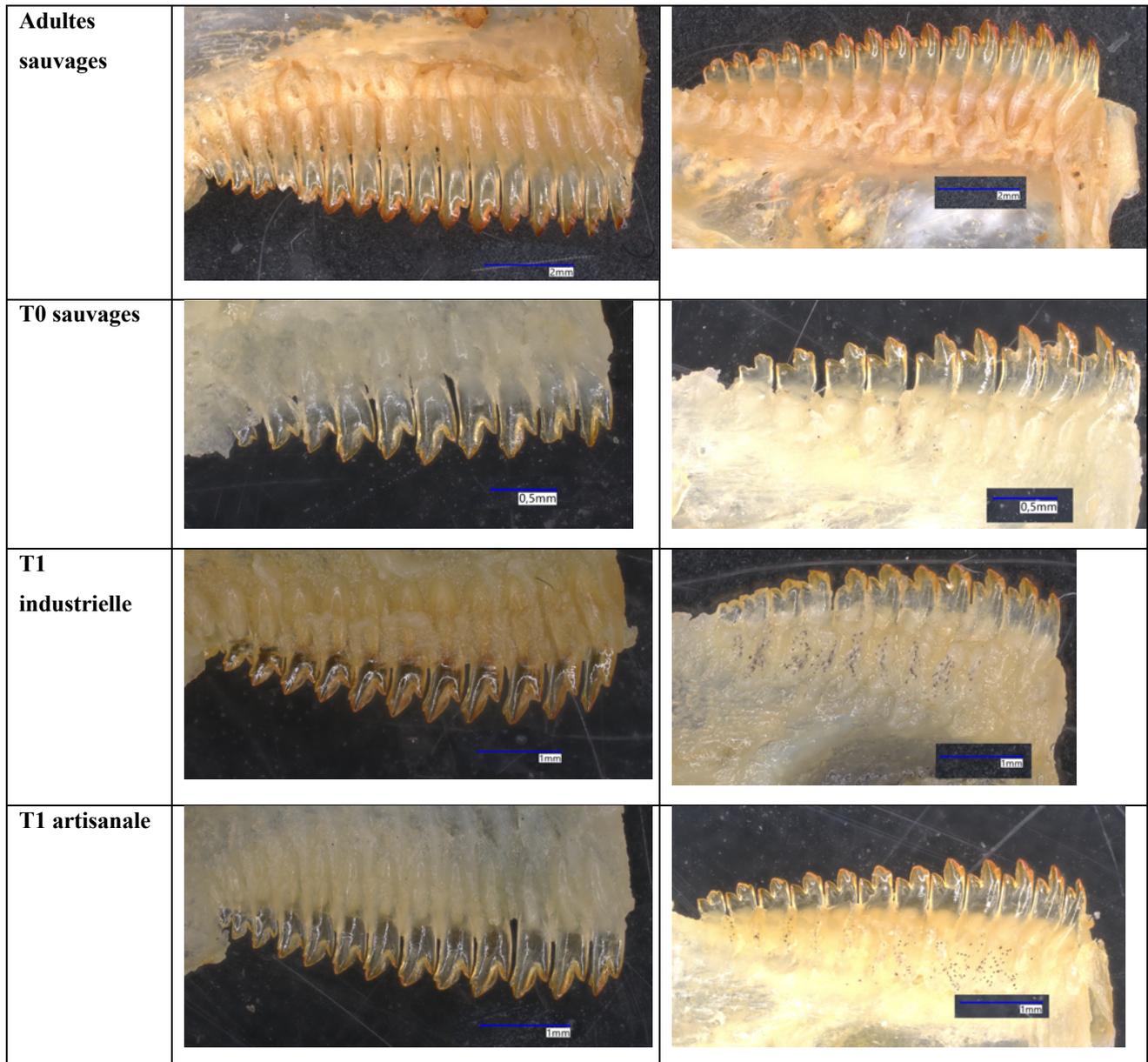


Fig. 19 : Dentition de *S.sutor* selon l'aliment. La mâchoire gauche des individus est représentée avec la mâchoire supérieure (prémaxillaire) et inférieure (dentaire).

La dentition des *S.sutor* est semblable à celle d'autres siganidés décrite dans la littérature. Ils ont des mâchoires qui se superposent à la fermeture. Les dents de la mâchoire supérieure sont plus pointues que celles de la mâchoire inférieure (Fig. 19). La forme des dents est caractérisée par une entaille et une cuspide en saillie de chaque côté. La position de la cuspide principale est différente entre la mâchoire supérieure et la mâchoire inférieure. Celle-ci est en position postérieure sur le prémaxillaire et en position antérieure sur le dentaire (Bryan, 1975).

Les dents multidenticulaires sont caractéristiques de poissons avec un régime alimentaire herbivore, les aidant à arracher les végétaux du substrat (Gibson, 2015).

On observe que chez les juvéniles, les dents sont plus acérées que chez les adultes et cela diminue en vieillissant pour arriver à des dents plus « arrondies » (Fig. 19). On remarque que la différence de hauteur entre les deux cuspides est différente. Avec une cuspide principale plus longue et plus acérée chez les juvéniles que chez les adultes à la fois pour le prémaxillaire et le dentaire.

On ne constate cependant pas de différences dans la forme des dents entre les poissons sauvages et les poissons d'élevage. On n'observe pas non plus de différences visuelles entre les poissons élevés avec un aliment artisanal ou industriel.

V. Discussion

Le but de ce travail était d'évaluer la faisabilité de développer une production aquacole contrôlée de *S. sutor* et d'évaluer l'impact de deux régimes alimentaires différents (un artisanal issu de matières premières végétales et un industriel) sur la croissance, la survie et des caractères phénotypiques (rapports des longueurs des tubes digestifs, variations de forme du corps et de la dentition).

La survie s'est avérée être similaire quel que soit le régime alimentaire reçu. La croissance quant à elle a été globalement meilleure pour les poissons nourris avec l'aliment industriel. Pour ce qui est des caractères phénotypiques, il a été observé que les poissons élevés jusqu'à T2 ont des tubes digestifs plus courts que les individus sauvages et ceux élevés jusqu'à T1 indépendamment du régime alimentaire. Des variations de formes du corps ont été observées. A T2, quel que soit l'alimentation, les poissons d'élevages montrent une morphologie différente des individus sauvages, notamment au niveau des insertions des nageoires. Pour ce qui est de la dentition, aucune variation liée à l'alimentation n'a été observée.

Ces résultats vont être discutés d'une manière intégrative en essayant de faire des liens entre les différentes parties pour émettre des hypothèses afin de les expliquer. Finalement, je tenterai de donner un avis sur l'aquaculture de *S. sutor* et des opportunités que celle-ci offre.

5.1. *Survie de S. sutor en milieu fermé*

Le premier mois d'élevage des *S. sutor* a été caractérisé par d'importantes mortalités. Dans un premier temps, celles-ci ont été attribuées au stress subi par les poissons causé par la forte présence humaine autour et dans les bassins. Trois fois par semaines, plusieurs personnes s'introduisaient dans les bassins en béton pour les nettoyer des dépôts vaseux. Durant cette opération, le niveau d'eau était fortement baissé afin de pouvoir nettoyer le fond du bassin tout en laissant les poissons dans celui-ci. Une telle pratique provoquait certainement un trop grand stress chez les poissons (Barton & Iwama, 1991) mais celle-ci semblait nécessaire par rapport aux dimensions des bassins. De plus, cette technique de nettoyage augmentait fortement la turbidité de l'eau remettant les matières en suspension, ce qui pouvait provoquer un colmatage des branchies (Ardjosoediro & Ramnarine, 2002). Les jours qui suivaient ces opérations de nettoyage, de fortes mortalités étaient observées. Une fois cette pratique terminée, le taux de mortalité a diminué, passant de 26% à 15% (Fig. 10). A cela s'ajoute que, avant l'arrêt de ces pratiques, les poissons étaient manipulés toutes les deux semaines sans anesthésiant.

Un autre facteur ayant pu expliquer les mortalités en début d'expérimentation est la concentration en oxygène dissous dans les bassins. Durant le premier mois, les hautes températures atmosphériques enregistrées (jusqu'à 40 °C) faisaient monter la température de l'eau jusqu'à plus de 33 °C. La quantité d'oxygène dissous étant corrélée négativement à la température de l'eau, de faibles taux d'oxygène dissous ont été observés durant ces périodes (tableau 1). Il faut ajouter à cela les nombreuses coupures d'électricité nocturnes causant l'arrêt de l'aération des bassins durant la nuit. Ces différents problèmes ont mené à une concentration en oxygène dissous minimale de 2,64 ppm (tableau 1). Cependant, aucune mortalité particulière n'a été recensée les jours suivant ce taux minimal or, ce sont des concentrations extrêmement basses même pour des espèces considérées comme résistantes comme le tilapia *Oreochromis niloticus* (Makori et al., 2017). Le problème fut en partie résolu lors de l'ajout de pompes de circulation et d'un système venturi associé à celles-ci en seconde partie d'expérimentation.

Il faut noter que le taux de survie était similaire entre les deux types d'alimentation (74% durant le premier mois et demi et 85% pour la fin de l'élevage). L'aliment composé de laisses de mer semble donc procurer un apport suffisant à la survie n'engendrant pas un taux de mortalité plus élevé chez *S. sutor*. Une précédente étude réalisée sur *S. sutor* utilisant un autre mode d'élevage (hapas en eau saumâtre, 15 ind/m²) a montré des taux de survie allant de 71,1% à 93,3% sur 90 jours en fonction du traitement reçu (différentes concentrations en larves de mouches soldats noires (*Hermetia illucens*) dans l'alimentation (Okemwa et al., 2022). On peut remarquer que nos taux de survies se situent dans le même intervalle que cette étude. C'était la première expérience d'élevage de *S. sutor* en bassin et des adaptations zootechniques ont dû être réalisées au fur et à mesure du travail.

5.2. Croissance

Nous avons mis en évidence des différences de vitesse de croissance des *S.sutor* en fonction du régime alimentaire reçu. L'aliment industriel a fortement favorisé la croissance des poissons. Ceci était prévisible étant donné que c'est un aliment formulé spécialement pour le grossissement de poissons en milieu contrôlé. Les taux de croissances obtenus grâce à l'aliment industriel sont similaires, voir supérieurs à ceux d'autres espèces de Siganidae. Par exemple, *Siganus guttatus* élevé à différentes densités a donné un gain de poids journalier maximal de 0,49 g/jour (100 ind/m²) pour des poissons de la même gamme de taille (entre 6 cm et 13 cm) que les nôtres (Syah et al., 2020). Dans notre étude, Les *S. sutor* ayant reçu l'aliment industriel

ont atteint un gain de poids journalier de 0,79 g/jour. Ces résultats sont ceux d'espèces ayant de forts taux de croissance, tels que des tilapias (*O. niloticus*) juvéniles élevés à une densité de 14 individus par aquarium de 168 litres qui ont des gains de poids journaliers en système expérimental de 0,4 g/jour avec un poids initiale de 19 g et final de 36,1g durant 60 jours d'élevage (El-Sherif & El-Feky, 2009). Afin d'avoir un point de comparaison avec une autre espèce marine herbivore, j'ai choisi de comparer les résultats avec le taux de croissance du mullet à grosse tête (*Mugil cephalus*). Celui-ci élevé à une densité de 1 ind/m³ atteint une croissance de 0,89 g/jour dans des bassins de 5000 m³. Nos résultats sont donc plutôt intéressants dans le cadre du développement d'une production aquacole destinée à la vente. Cependant, cet aliment n'est peut-être pas adapté dans des perspectives de développement durable dans un pays du Sud. En effet, dans une optique de production aquacole dans un pays en développement, il est intéressant de trouver un aliment de bonne qualité à moindre coût et ayant un moindre impact sur l'environnement (moins de protéines animales). Il est préférable d'utiliser un aliment local, afin de minimiser au maximum le coût de celui-ci et maximiser sa durabilité. L'utilisation de larves de mouches soldats noires (BFS) (Okemwa et al., 2022) est par exemple prometteuse étant donné la facilité d'élevage de celles-ci et les concentrations intéressantes en protéines qu'elles contiennent. Une production de larves de BFS visant à nourrir des poissons se situant à quelques mètres de l'élevage semble être une bonne piste de recherche.

Les poissons ayant reçu l'aliment à base de laisses de mer ont quant à eux montré des vitesses de croissance beaucoup plus faibles (0,16 g/jour) même si les coefficients de condition de Fulton, qui permettent d'évaluer l'embonpoint des poissons, ne varient pas significativement entre les régimes alimentaires. Plusieurs hypothèses sont envisageables. Tout d'abord, la teneur en protéines dans notre aliment végétal (13,4% et 11%) est environ trois fois moins importante que celle de l'aliment industriel (36,06%). Or, une alimentation riche en protéines est indispensable pour la croissance de poissons juvéniles. La teneur en protéines devrait être comprise entre 35% et 45% pour une croissance optimale de poissons juvéniles, même herbivores (Parazo, 1990; Fernandes et al., 2016). Une teneur en protéines avoisinant les 12% n'est donc pas suffisante pour garantir une croissance élevée chez *S. sutor*. Il est très probable que la différence de croissance entre les deux régimes alimentaires est majoritairement due à une carence en protéines de l'alimentation à base de laisses de mer. Une autre différence est que l'aliment artisanal n'a pas été complété par des vitamines et autres nutriments, or, des carences en certains nutriments peuvent avoir des effets négatifs sur la croissance voir provoquer des

malformations (Mazik et al., 1987; Oliva-Teles, 2012). Dans notre expérience, aucune malformation n'a été observée chez les individus ayant reçu l'aliment artisanal, mais il est probable que la différence de croissance soit aussi expliquée par des carences en protéines. Une autre explication potentielle est qu'il a été montré que les *S. sutor* juvéniles ont un régime alimentaire en partie composé de proies animales avant de basculer vers un régime totalement herbivore. En plus de macroalgues et de plantes aquatiques, des analyses des contenus stomachaux chez les *S. sutor* juvéniles sauvages ont montré de grandes quantités de proies benthiques (Ravelohasina et al., 2024). En conclusion, le manque de protéines animales et l'absence de suppléments vitaminés expliquent très probablement le retard de croissance par rapport à l'alimentation industrielle.

Les teneurs en lipides sont légèrement différentes entre les deux alimentations. Les analyses effectuées montrent une teneur en lipides allant de 4,5% à 5,8% pour l'aliment artisanal et de 7% pour l'aliment industriel. Il est connu que les poissons herbivores ont moins de besoins en lipides que les poissons carnivores, mais un minimum de 5% de lipides dans l'aliment est quand même recommandé pour l'élevage de ceux-ci (Glencross, 2009; Ghanawi et al., 2011; Li et al., 2018). On peut donc dire que les teneurs en lipides dans les deux aliments sont acceptables. Une étude visant à définir la concentration optimale en lipide dans l'aliment chez une autre espèce herbivore de poisson lapin (*Siganus rivulatus*) a montré que l'optimum se situait autour à 9,8% pour des poissons juvéniles (Ghanawi et al., 2011). Augmenter la teneur en lipide est certainement une piste d'amélioration pour l'élevage de *S. sutor*.

Dans l'optique d'une production aquacole et de mise en vente, l'aliment industriel reste actuellement le meilleur. Néanmoins, dans le cadre d'une réintroduction de juvéniles dans le milieu naturel, il a déjà été montré que chez certaines espèces, le régime alimentaire influençait fortement les taux de survies et les capacités d'adaptation des espèces réintroduites. Dès lors, une alimentation fortement différente de celle retrouvée dans le milieu naturel peut nuire au succès de la réintroduction (Belk et al., 2008; Yang et al., 2020).

5.3. Variations phénotypiques

Les résultats des variations du rapport de taille des tubes digestifs sont intrigants. Il est attendu que les espèces herbivores présentent des tailles de tubes digestifs plus longues que les espèces carnivores. Cela est dû principalement à la difficulté de digestion et d'assimilation des protéines végétales (German & Horn, 2006; Karachle & Stergiou, 2010; Duque-Correa et al., 2024). Dans un premier temps, cette tendance était visible grâce aux résultats à T1. Les *S. sutor* ayant reçu l'aliment à base de laisses de mer avaient des tubes digestifs significativement plus longs que ceux des poissons nourris avec l'aliment industriel. Il n'y avait pas de différences significatives entre la taille du tube digestif des poissons sauvages et celle des individus nourris avec l'aliment végétal. On pouvait donc dire que les poissons à T1 ayant reçu l'aliment artisanal présentaient un tube digestif de morphologie similaire à celui de poissons sauvages de même gamme de tailles ayant reçu une alimentation naturelle. Cependant, cette observation a complètement changé avec la comparaison des données observées à T2. Les tubes digestifs sont significativement plus courts chez les poissons à T2 quel que soit l'aliment reçu par rapport à tous les autres. Une explication potentielle est que les dissections et mesures à T0 et T1 ont été réalisées par moi-même alors que les mesures des tubes digestifs à T2 ont été réalisées par une autre personne après mon retour de Madagascar. Un changement d'expérimentateur a peut-être causé des variations dans les mesures. Une autre hypothèse pouvant expliquer les variations de taille de tubes digestifs observées est la chimie de l'eau. En effet, il a été rapporté que les concentrations élevées en ion ammonium (NH_4^+) impactaient la taille du tube digestif (Shuai et al., 2018). Il est possible que de hautes concentrations en ion ammonium aient causé un stress physiologique aux poissons élevés à Belaza. L'ammonium est le principal produit d'excrétion des poissons, qui, sous sa forme non ionisée (NH_3), est toxique pour les organismes aquatiques (Zadinelo et al., 2015). Un stress physiologique causé par d'importantes concentrations en ion ammonium liées à la forte population des bassins a peut-être impacté la taille des tubes digestifs des poissons sur le long terme. Cependant, Shuai et al., (2018) a également remarqué l'effet inverse chez certaines espèces. L'augmentation en NH_4^+ dans l'eau est également liée à une mauvaise digestibilité de la nourriture d'après cette étude. Il a été observé une augmentation de la taille du tube digestif pour palier à ça chez d'autres espèces de l'étude. Il semblerait donc que ce paramètre soit lié également à la tolérance de l'espèce.

Notre étude morphométrique démontre une importante variation de formes du corps durant la croissance de *S. sutor* : les individus juvéniles présentent une région céphalique

proportionnellement plus grande par rapport au reste du corps et inversement, les individus de grandes taille présentent une région céphalique plus courte et un corps plus allongé. cela correspond à ce qui est rapporté dans la littérature. Il a été montré par Frédérich et al. (2012) que des variations de formes étaient observées entre les stades juvéniles et adultes chez les poissons récifaux. Ceux-ci passent les premiers stades de croissance en pleine mer avant de revenir sur le récif. L'écologie et l'alimentation étant différente entre les larves et les adultes (Frederich et al., 2006), les différences morphologiques observées sont probablement dues à un changement de régime alimentaire, celui-ci étant plus benthique à l'âge adulte.

Les analyses de la variation de forme ont montré que les poissons élevés jusqu'à T2 (corrélés négativement à PC2, figure 14,15 et 16) avaient une région ventrale plus rectiligne. Si ces données s'avèrent cohérentes, il se peut que ce « ventre plus plat » observé chez les individus élevés jusqu'à T2 soit effectivement dû aux plus petits tubes digestifs observés quel que soit le régime alimentaire.

Notre étude morphométrique de la forme du corps révèle que le type d'alimentation n'a pas eu d'impact sur le développement morphologique mais que c'est plutôt le temps passé dans un environnement contrôlé qui engendre ces variations de formes entre poissons d'élevages et sauvages. Pour rappel, les poissons élevés à Belaza ont une région ventrale plus aplatie ainsi qu'une insertion de la nageoire pectorale plus postérieure par rapport aux autres individus (figure 17 et 18). Une hypothèse pouvant expliquer cette variation de formes est le manque d'activité de nage. Les *S. sutor* vivants dans un milieu marin turbulent (particulièrement sur le récif), un manque d'activité de nage peut induire un plus faible développement musculaire. Ce phénomène a été observé chez la dorade royale (*Sparus aurata*). Chez cette espèce, induire une nage forcée modérée permet le bon développement musculaire et donne des individus plus « robustes » (Palstra et al., 2020). Les mêmes conclusions ont été tirées pour la truite arc-en-ciel (*Oncorhynchus mykiss*) (Waldrop et al., 2020). De plus, lors de l'allumage des pompes de circulation en seconde partie d'expérimentation, les poissons se mettaient instinctivement dans le courant mais la période d'allumage des pompes était fort courte. Il est donc probable que ce manque d'activité de nage chez *S. sutor* élevés à Belaza explique les variations de formes que l'on observe, telle que l'insertion plus postérieure de la nageoire pectorale chez les individus élevés en bassins par rapport aux individus sauvages. De plus, les bassins avaient une profondeur de 80 cm, alors que dans le milieu naturel, les *S. sutor* ont été observés nageant dans la colonne d'eau allant de 1 mètre jusqu'à 50 mètres de profondeur (al Sakaff & Esseen, 1999). La profondeur des bassins n'est donc peut-être pas idéale pour leur activité de nage.

Selon Belk et al. (2008), un autre critère influençant la forme des poissons est la position de la nourriture dans la colonne d'eau. Dans le milieu naturel, les *S. sutor* juvéniles se nourrissent de petites proies benthiques, d'algues et de plantes aquatiques pour migrer vers un régime alimentaire herbivore benthique à l'âge adulte (Ravelohasina et al., 2024). Ici, les deux alimentations données aux poissons flottaient à la surface de l'eau. D'après Belk et al. (2008), les poissons élevés en lac avec un aliment sauvage dans la colonne d'eau avaient des corps plus hauts et un meilleur succès de réintroduction que ceux élevés en bassins avec un aliment flottant. La formulation d'un aliment qui coule est donc peut-être une piste de recherche (Wang et al., 2021). Toutes ces données montrent l'importante plasticité de formes chez les poissons de manière générale (Oufiero & Whitlow, 2016).

Le fait que l'on n'observe pas de différences visuelles entre la dentition des poissons ayant un régime alimentaire à base de laisses de mer et ceux ayant reçu l'aliment industriel est cohérent avec d'autres études du genre (de Azevedo Gomes et al., 2021) même si ces études nuancent leurs résultats. En effet, chez certaines espèces, le renouvellement des dents peut prendre plusieurs mois. Il est donc aussi possible que cela soit le cas pour *S.sutor* et que nous n'avons pas observé de variation de la dentition en fonction des deux aliments pour cette raison. Il est également possible qu'aucune variation n'ait été observée étant donné que l'aliment flottait dans les deux cas et qu'il avait une forme similaire.

5.4. Le poisson-lapin *Siganus sutor* est-il un bon candidat pour l'aquaculture à Madagascar ?

Au vu de nos résultats, il est acceptable d'affirmer que *S. sutor* est une espèce à bon potentiel pour le développement d'une aquaculture. Les caractéristiques favorisant l'aquaculture de siganidés (Lam, 1974) se sont avérées correctes. Tout d'abord, *S. sutor* est une espèce herbivore qui peut effectivement avoir une vitesse de croissance rapide. Le développement de la culture d'espèces herbivores est essentiel pour atteindre une aquaculture plus durable. Un second aspect faisant de *S. sutor* un bon candidat pour l'aquaculture est l'acceptation de l'aliment qu'il soit industriel ou autre. En effet, dès le premier jour d'élevage, les deux aliments étaient consommés vigoureusement. Cela démontre un réel potentiel de domestication de cette espèce. Il est ici évident que notre aliment artisanal doit être amélioré. Un enrichissement en nutriments et en protéines (animales ou végétales) doit être envisagé. Or, dans le cas d'une réintroduction, il est important de trouver un aliment proche de celui rencontré

dans le milieu naturel. Il a été prouvé que l'aliment avait un impact sur le succès de réintroduction et la robustesse notamment dans le cas de *Chasmistes liorus* où un aliment vivant sauvage donnait de meilleurs résultats que un aliment industriel différent du naturel (Belk et al., 2008). L'utilisation de laisses de mer reste intéressante par son côté peu coûteux, sa disponibilité et le fait qu'elles sont composées d'éléments qui font parties du régime alimentaire des *S.sutor* sauvages. Cependant, en l'état, celles-ci ne permettent pas de garantir une croissance optimale. Afin d'augmenter le taux de protéines dans l'aliment, une sélection des algues à fortes concentrations en protéines est une option. Durant nos collectes, aucune sélection n'était réalisée. Certaines algues rouges par exemple contiennent jusqu'à 47% de protéines (Fleurence et al., 2012). Une autre piste de recherche a déjà été abordée précédemment où un élevage de *S. sutor* a été effectué en utilisant des larves de mouches soldats comme source de protéines. Les meilleurs taux de croissances ont été observés lorsque l'alimentation était composée à 75% de larves de mouches (le reste étant composé de farine de poissons) (Okemwa et al., 2022). Un mélange de ces larves avec des algues à hautes valeurs nutritives est une alternative prometteuse afin de produire un aliment de qualité, local, bon marché et durable.

Malgré un grand espace d'élevage (16 000 litres), les poissons restaient en banc, n'occupant qu'une faible partie de l'espace à un moment donné. Ce comportement laisse présager l'acceptation de fortes densités d'élevage. Cette capacité à supporter de hautes densités semble commune aux siganidés nageant en banc. Par exemple, *S. guttatus* a déjà été élevé à des densités élevées (100 ind/m³) (Syah et al., 2020) alors que nous avons appliqué une densité de 12 ind/m³ pour *S.sutor*. Il est ressorti de cette étude une corrélation positive de la densité d'élevage et de la croissance chez *S. guttatus*. Il faudra à l'avenir tester si une augmentation de la densité d'élevage chez *S. sutor* pourrait donner des résultats similaires. À la vue des nombreuses variations des paramètres physico-chimiques de l'eau et particulièrement des concentrations en oxygène dissous, *S. sutor* a démontré une forte tolérance à ces variations environnementales. C'est un critère important pour le développement d'un élevage dans un pays en développement comme Madagascar dans lequel les moyens financiers et technologiques sont plus limités. Les mises au point zootechniques que nous avons dû apporter au cours de notre recherche devront aussi être prises en compte pour améliorer l'élevage.

La grande disponibilité de juvéniles de *S. sutor* sur le grand récif de Toliara est également un avantage à ce développement de l'aquaculture. Il semble que le recrutement de post-larves sur le Grand Récif de Toliara puisse être prédit grâce à des modèles. Ceci permettant de rendre plus efficace le prélèvement de post-larves et de promouvoir des activités alternatives à la pêche

(Jaonalison, 2019). De plus, cette espèce est fortement demandée localement. A la vue de l'augmentation démographique de Toliara, une telle production a un grand potentiel pour pouvoir garantir une sécurité alimentaire aux populations locales. Néanmoins, un problème social risque de survenir. L'idée originale étant de développer l'aquaculture de cette espèce pour diminuer l'effort de pêche sur le récif, mais la pêche restera tout de même une activité importante dans la région de Toliara, celle-ci étant une tradition fortement ancrée dans la culture Vezo. Le succès des campagnes de réintroduction devra donc passer par une sensibilisation et une formation aux métiers de l'aquaculture des populations locales en les impliquant dans le projet. Cela doit être fait dans l'optique de développer une aquaculture villageoise visant à garantir aux populations des revenus alternatifs à ceux de la pêche, mais un arrêt total des activités de pêche vivrière n'est pas envisageable.

L'option d'une réintroduction de *S. sutor* sur le récif reste une autre possibilité non négligeable afin de permettre aux populations de poissons de se stabiliser et de soutenir les stocks de géniteurs sauvages. Cependant, il a déjà été montré que chez certaines espèces le régime alimentaire influençait fortement les taux de survies et les capacités d'adaptation des espèces réintroduites. Ainsi, une alimentation fortement différente de celle retrouvée dans le milieu naturel peut nuire au succès de la réintroduction. Cela se traduit notamment par la composition du microbiote intestinal qui est influencé par l'alimentation. Il a été montré qu'un microbiote différent de celui présent chez les individus sauvages nuisait au succès des réintroductions de poissons (Yang et al., 2020). Pour les prochaines expérimentations, des conditions d'élevages et un aliment proche de ce qui est retrouvé dans le milieu naturel sont essentiels pour garantir le succès d'une réintroduction. Les différences phénotypiques observées entre les individus sauvages et ceux élevés à Belaza démontrent que l'élevage est encore perfectible afin d'augmenter les taux de réussite de futures réintroductions.

Dans le cadre d'une domestication complète de l'espèce, certains individus ont été élevés jusqu'à la taille théorique de maturité sexuelle qui est de 20,3 cm pour les mâles, et 21,6 cm pour les femelles (Kamukuru, 2009). Cependant nous n'avons pas eu la possibilité de vérifier si ces poissons étaient matures sexuellement. Deux espèces de siganidés (*S. rivulatus* et *S. canaliculatus*) ont déjà été reproduites avec succès par pontes induites et *Siganus fuscescens* a déjà pondu naturellement en captivité (Lam, 1974). Il est donc raisonnable de penser qu'une maîtrise des cycles de reproduction chez *S. sutor* est possible. A l'heure actuelle, seule une fécondation de *S. sutor* a été réalisée avec succès mais les taux de survies des larves ont été de

0% (Fourrooghifard et al., 2020). Il est raisonnable de penser qu'avec de l'expérience, une maîtrise des cycles de reproduction chez *S. sutor* soit possible dans le futur.

VI. Conclusion

La surpêche sur le Grand Récif de Toliara utilisant des techniques destructrices ainsi que la diminution des populations de *S.sutor* liée à ces techniques sont des faits avérés. Notre étude visait à évaluer la faisabilité d'une production contrôlée de cette espèce dans une optique de production aquacole destinée à la vente ou une production de géniteurs destinée à soutenir les stocks de poissons sauvages, le tout en évaluant l'impact de deux régimes alimentaires (un végétal local et un industriel peu durable) sur la survie, la croissance et sur des caractères phénotypiques. Les résultats ont montré que *S. sutor* est un bon candidat à l'aquaculture. Le principal axe d'amélioration est l'alimentation. L'aliment industriel est assez coûteux et peu durable dans l'optique d'une production aquacole destinée à la vente mais des alternatives bon marché, locale et durables peuvent être trouvées (larves de mouches soldats noires, sélection des algues). L'aliment à base de laisses de mer reste une alternative intéressante comme base d'alimentation, celui-ci étant proche de l'alimentation naturelle des *S. sutor*. Un enrichissement de celui-ci en protéines (larves de mouches par exemple) est nécessaire afin d'avoir des taux de croissance acceptables. L'idée d'une aquaculture villageoise durable de *S. sutor* développée et gérée par les populations locales leur assurant une source de revenus est envisageable pour le futur.

VII. Bibliographie

- al Sakaff, H., & Esseen, M. (1999). Occurrence and distribution of fish species off Yemen (Gulf of Aden and Arabian Sea). *Naga, the ICLARM Quarterly*, 22(1), 43-47.
- Andréfouët, S., Guillaume, M. M. M., Delval, A., Rasoamanendrika, F. M. A., Blanchot, J., & Bruggemann, J. H. (2013). Fifty years of changes in reef flat habitats of the Grand Récif of Toliara (SW Madagascar) and the impact of gleaning. *Coral Reefs*, 32(3), 757-768. <https://doi.org/10.1007/s00338-013-1026-0>
- Ardjosoediro, I., & Ramnarine, I. W. (2002). The influence of turbidity on growth, feed conversion and survivorship of the Jamaica red tilapia strain. *Aquaculture*, 212(1), 159-165. [https://doi.org/10.1016/S0044-8486\(01\)00881-X](https://doi.org/10.1016/S0044-8486(01)00881-X)
- Atta-Mills, J., Alder, J., & Rashid Sumaila, U. (2004). The decline of a regional fishing nation : The case of Ghana and West Africa. *Natural Resources Forum*, 28(1), 13-21. <https://doi.org/10.1111/j.0165-0203.2004.00068.x>
- Bagenal, T. (1978). *Methods for assessment of fish production in fresh waters—3. Ed.* Oxford (UK) Blackwell Scientific Pub.
- Barton, B. A., & Iwama, G. K. (1991). Physiological changes in fish from stress in aquaculture with emphasis on the response and effects of corticosteroids. *Annual Review of Fish Diseases*, 1, 3-26. [https://doi.org/10.1016/0959-8030\(91\)90019-G](https://doi.org/10.1016/0959-8030(91)90019-G)
- Behivoke, F., Etienne, M.-P., Guitton, J., Randriatsara, R. M., Ranaivoson, E., & Léopold, M. (2021). Estimating fishing effort in small-scale fisheries using GPS tracking data and random forests. *Ecological Indicators*, 123, 107321. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.107321>

- Belk, M. C., Benson, L. J., Rasmussen, J., & Peck, S. L. (2008). Hatchery-induced morphological variation in an endangered fish : A challenge for hatchery-based recovery efforts. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 65(3), 401-408. <https://doi.org/10.1139/f07-176>
- Belle, E. M. S., Stewart, G. W., Ridder, B. D., Komeno, R. J.-L., Ramahatratra, F., Zephir, B. R., & Rostaing, R. S.-. (2009). Establishment of a community managed marine reserve in the Bay of Ranobe, southwest Madagascar. *Madagascar Conservation & Development*, 4(1), Article 1. <https://doi.org/10.4314/mcd.v4i1.44010>
- Bruggemann, J., Rodier, M., Guillaume, M., Andréfouët, S., Arfi, R., Cinner, J., Pichon, M., Ramahatratra, F., Rasoamanendrika, F., Zinke, J., & McClanahan, T. (2012). Wicked Social-Ecological Problems Forcing Unprecedented Change on the Latitudinal Margins of Coral Reefs : The Case of Southwest Madagascar. *Ecology and Society*, 17(4). <https://doi.org/10.5751/ES-05300-170447>
- Bryan, P. G. (1975). Food Habits, Functional Digestive Morphology, and Assimilation Efficiency of the Rabbitfish *Siganus spinus* (Pisces, Siganidae) on Guam. *Pacific Science*. <https://www.semanticscholar.org/paper/Food-Habits%2C-Functional-Digestive-Morphology%2C-and-Bryan/eac7b748b8be434c04f5138a0da64719d8b997e6>
- Chande, M., Kimirei, I. A., Igulu, M. M., Kuguru, B., Kayanda, R., Mwakosya, C., Kangwe, S. J., Sululu, J., & Ulotu, E. (2019). Assessment of the impacts of artisanal fishing gears on nearshore fish stocks along coastal waters off the Kilwa–Mafia seascape in Tanzania. *Regional Studies in Marine Science*, 27, 100531. <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2019.100531>
- Chong-Seng, K. M., Nash, K. L., Bellwood, D. R., & Graham, N. A. J. (2014). Macroalgal

- herbivory on recovering versus degrading coral reefs. *Coral Reefs*, 33(2), 409-419.
<https://doi.org/10.1007/s00338-014-1134-5>
- Cinner, J. E. (2011). Social-ecological traps in reef fisheries. *Global Environmental Change*, 21(3), 835-839. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2011.04.012>
- Crain, C. M., Halpern, B. S., Beck, M. W., & Kappel, C. V. (2009). Understanding and Managing Human Threats to the Coastal Marine Environment. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1162(1), 39-62. <https://doi.org/10.1111/j.1749-6632.2009.04496.x>
- Criscoli, A., Carpentieri, P., Colloca, F., Belluscio, A., & Ardizzone, G. (2017). Identification and Characterization of Nursery Areas of Red Mullet *Mullus barbatus* in the Central Tyrrhenian Sea. *Marine and Coastal Fisheries*, 9(1), 203-215. <https://doi.org/10.1080/19425120.2017.1290723>
- Daskalov, G. M. (2002). Overfishing drives a trophic cascade in the Black Sea. *Marine Ecology Progress Series*, 225, 53-63. <https://doi.org/10.3354/meps225053>
- de Azevedo Gomes, A. M., Fontanillas, R., Owen, M., Busti, S., Parma, L., Bonaldo, A., Witten, P. E., & Huysseune, A. (2021). A quantitative analysis of gilthead seabream, *Sparus aurata*, juvenile dentition as a tool to assess the effect of diet. <https://doi.org/10.1139/cjz-2020-0284>
- Du, Y., Sun, J., & Zhang, G. (2021). *The Impact of Overfishing on Environmental Resources and the Evaluation of Current Policies and Future Guideline: 2021 International Conference on Public Relations and Social Sciences (ICPRSS 2021)*, Kunming, China. <https://doi.org/10.2991/assehr.k.211020.316>
- Duque-Correa, M. J., Clements, K. D., Meloro, C., Ronco, F., Boila, A., Indermaur, A., Salzburger, W., & Clauss, M. (2024). Diet and habitat as determinants of intestine

- length in fishes. *Reviews in Fish Biology and Fisheries*, 34(3), 1017-1034.
<https://doi.org/10.1007/s11160-024-09853-3>
- Duray, M. N. (1998). *Biology and culture of siganids*.
- Ebrahim, A., Bijoux, J. P., Mumby, P. J., & Tibbetts, I. R. (2020). The commercially important shoemaker spinefoot, *Siganus sutor*, connects coral reefs to neighbouring seagrass meadows. *Journal of Fish Biology*, 96(4), 1034-1044.
<https://doi.org/10.1111/jfb.14297>
- El-Sherif, M. S., & El-Feky, A. M. I. (2009). Performance of Nile Tilapia (*Oreochromis niloticus*) Fingerlings. I. Effect of pH. *Int. J. Agric. Biol.*, 11(3).
- Fernandes, H., Peres, H., & Carvalho, A. P. (2016). Dietary Protein Requirement During Juvenile Growth of Zebrafish (*Danio rerio*). *Zebrafish*, 13(6), 548-555.
<https://doi.org/10.1089/zeb.2016.1303>
- Fisheries Statistics (FishStat)*. (2023). [External Data Spec]. European Environment Agency. <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/external/fao-fisheries-statistics>
- Fleurence, J., Morançais, M., Dumay, J., Decottignies, P., Turpin, V., Munier, M., Garcia-Bueno, N., & Jaouen, P. (2012). What are the prospects for using seaweed in human nutrition and for marine animals raised through aquaculture? *Trends in Food Science & Technology*, 27(1), 57-61.
<https://doi.org/10.1016/j.tifs.2012.03.004>
- Fourooghifard, H., Matinfar, A., Roohani Ghadikolaee, K., Moezzi, M. M. M. com, Abdolalian, E., Zahedi, M. R., & Tamadoni Jahromi, S. (2020). Effect of salinity, light intensity and tank size on larval survival rate of shoemaker rabbitfish *Siganus sutor* (Valenciennes, 1835). *Iranian Journal of Fisheries Sciences*, 19(1),

340-351. <https://doi.org/10.22092/ijfs.2019.118534>

Fraser, D. J. (2016). *Risks and benefits of mitigating low marine survival in wild salmon using smolt-to-adult captive-reared supplementation.*

Frédérich, B., Colleye, O., Lepoint, G., & Lecchini, D. (2012). Mismatch between shape changes and ecological shifts during the post-settlement growth of the surgeonfish, *Acanthurus triostegus*. *Frontiers in Zoology*, 9(1), 8.

<https://doi.org/10.1186/1742-9994-9-8>

Frederich, B., Parmentier, E., & Vandewalle, P. (2006). A preliminary study of development of the buccal apparatus in Pomacentridae (Teleostei, Perciformes). *Animal Biology (Leiden, Netherlands)*, 56(3), 351-372.

<https://doi.org/10.1163/157075606778441831>

Froehlich, H. E., Montgomery, J. C., Williams, D. R., O'Hara, C., Kuempel, C. D., & Halpern, B. S. (2023). Biological life-history and farming scenarios of marine aquaculture to help reduce wild marine fishing pressure. *Fish and Fisheries*, 24(6), 1034-1047. <https://doi.org/10.1111/faf.12783>

German, D. P., & Horn, M. H. (2006). Gut length and mass in herbivorous and carnivorous prickleback fishes (Teleostei : Stichaeidae): ontogenetic, dietary, and phylogenetic effects. *Marine Biology*, 148(5), 1123-1134.

<https://doi.org/10.1007/s00227-005-0149-4>

Ghanawi, J., Roy, L., Davis, D. A., & Saoud, I. P. (2011). Effects of dietary lipid levels on growth performance of marbled spinefoot rabbitfish *Siganus rivulatus*.

Aquaculture, 310(3), 395-400. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2010.11.012>

Gibson, S. Z. (2015). Evidence of a specialized feeding niche in a Late Triassic ray-finned fish : Evolution of multidenticulate teeth and benthic scraping in

- †Hemicalypterus. *Die Naturwissenschaften*, 102(3-4), 10.
<https://doi.org/10.1007/s00114-015-1262-y>
- Glencross, B. D. (2009). Exploring the nutritional demand for essential fatty acids by aquaculture species. *Reviews in Aquaculture*, 1(2), 71-124.
<https://doi.org/10.1111/j.1753-5131.2009.01006.x>
- Gomes, E. F., Rema, P., & Kaushik, S. J. (1995). Replacement of fish meal by plant proteins in the diet of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) : Digestibility and growth performance. *Aquaculture*, 130(2-3), 177-186.
[https://doi.org/10.1016/0044-8486\(94\)00211-6](https://doi.org/10.1016/0044-8486(94)00211-6)
- Gough, C. L. A., Dewar, K. M., Godley, B. J., Zafindranosy, E., & Broderick, A. C. (2020). Evidence of Overfishing in Small-Scale Fisheries in Madagascar. *Frontiers in Marine Science*, 7, 317. <https://doi.org/10.3389/fmars.2020.00317>
- Gundermann, N., Popper, D., & Lichatowich, T. (1983, avril 1). *Biology and Life Cycle of Siganus vermiculatus (Siganidae, Pisces)*.
<https://www.semanticscholar.org/paper/Biology-and-Life-Cycle-of-Siganus-vermiculatus-Gundermann-Popper/3b72c01a6fdf060c2960f17a077c348d715fbcf0>
- Hair, C., Bell, J., & Doherty, P. (2002). *The use of wild-caught juveniles in coastal aquaculture and its application to coral reef fishes*. (p. 327-353).
<https://doi.org/10.1079/9780851996042.0327>
- Hall, C., Dawson, T. P., Macdiarmid, J. I., Matthews, R. B., & Smith, P. (2017). The impact of population growth and climate change on food security in Africa : Looking ahead to 2050. *International Journal of Agricultural Sustainability*, 15(2), 124-135.
<https://doi.org/10.1080/14735903.2017.1293929>

- Hammer, O., Harper, D. A. T., & Ryan, P. D. (2001). *PAST: Paleontological Statistics Software Package for Education and Data Analysis*.
- Harris, A., Manahira, G., Sheppard, A., Gough, C., & Sheppard, C. (2010). *DEMISE OF MADAGASCAR'S ONCE GREAT BARRIER REEF – CHANGE IN CORAL REEF CONDITION OVER 40 YEARS*.
- Hernandez de-Dios, M. A., Tovar-Ramírez, D., Maldonado García, D., Galaviz-Espinoza, M. A., Spanopoulos Zarco, M., & Maldonado-García, M. C. (2022). Functional Additives as a Boost to Reproductive Performance in Marine Fish : A Review. *Fishes*, 7(5), Article 5. <https://doi.org/10.3390/fishes7050262>
- Hussain, S. M., Bano, A. A., Ali, S., Rizwan, M., Adrees, M., Zahoor, A. F., Sarker, P. K., Hussain, M., Arsalan, M. Z.-H., Yong, J. W. H., & Naeem, A. (2024). Substitution of fishmeal : Highlights of potential plant protein sources for aquaculture sustainability. *Heliyon*, 10(4). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e26573>
- Jaonalison, H. (2019). *Les premiers stades de vie des poissons dans le SO de Madagascar : Éléments pour une meilleure connaissance de la biodiversité et une meilleure gestion des ressources exploitées*.
- Johannes, R. E. (1978). Reproductive strategies of coastal marine fishes in the tropics. *Environmental Biology of Fishes*, 3(1), 65-84. <https://doi.org/10.1007/BF00006309>
- Kamukuru, A. T. (2009). Trap Fishery and Reproductive Biology of the Whitespotted Rabbitfish *Siganus sutor* (Siganidae), within the Dar es Salaam Marine Reserves, Tanzania. *Western Indian Ocean Journal of Marine Science*, 8(1), Article 1. <https://doi.org/10.4314/wiojms.v8i1.56677>
- Karachle, P. K., & Stergiou, K. I. (2010). Intestine Morphometrics of Fishes : A

- Compilation and Analysis of Bibliographic Data. *Acta Ichthyologica Et Piscatoria*, 40(1), 45-54. <https://doi.org/10.3750/AIP2010.40.1.06>
- Lam, T. J. (1974). *SIGANIDS: THEIR BIOLOGY AND MARICULTURE POTENTIAL*.
- Li, Y., Zhang, Q., & Liu, Y. (2018). Rabbitfish – an Emerging Herbivorous Marine Aquaculture Species. In *Aquaculture in China* (p. 329-334). John Wiley & Sons, Ltd. https://doi.org/10.1002/9781119120759.ch3_12
- Link, J. S., & Watson, R. A. (2019). Global ecosystem overfishing : Clear delineation within real limits to production. *Science Advances*, 5(6), eaav0474. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aav0474>
- Lovell, R. T. (2003). 13—Diet and Fish Husbandry. In J. E. Halver & R. W. Hardy (Éds.), *Fish Nutrition (Third Edition)* (p. 703-754). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-012319652-1/50014-8>
- Makori, A. J., Abuom, P. O., Kapiyo, R., Anyona, D. N., & Dida, G. O. (2017). Effects of water physico-chemical parameters on tilapia (*Oreochromis niloticus*) growth in earthen ponds in Teso North Sub-County, Busia County. *Fisheries and Aquatic Sciences*, 20(1), 30. <https://doi.org/10.1186/s41240-017-0075-7>
- Mazik, P. M., Tomasso, J. R., & Brandt, T. M. (1987). Effects of Dietary Vitamin C on Growth, Caudal Fin Development, and Tolerance of Aquaculture-Related Stressors in Channel Catfish. *The Progressive Fish-Culturist*, 49(1), 13-16. [https://doi.org/10.1577/1548-8640\(1987\)49<13:EODVCO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1577/1548-8640(1987)49<13:EODVCO>2.0.CO;2)
- Muluye, T., Tekle-Giorgis, Y., & Tilahun, G. (2016). The Extent of Immature Fish Harvesting by the Commercial Fishery in Lake Hawassa, Ethiopia. *Momona Ethiopian Journal of Science*, 8(1), Article 1. <https://doi.org/10.4314/mejs.v8i1.3>
- Ntiba, M. J., & Jaccarini, V. (1988). Age and growth parameters of *Siganus sutor* in Kenyan

- marine inshore water, derived from numbers of otolith microbands and fish lengths. *Journal of Fish Biology*, 33(3), 465-470. <https://doi.org/10.1111/j.1095-8649.1988.tb05487.x>
- O'Keefe, T. (2003). *Plant Protein Ingredients for Aquaculture Feeds : Use Considerations & Quality Standards*.
- Okemwa, M. D., Ngugi, C. C., & Mirera, D. O. (2022). *GROWTH PERFORMANCE OF RABBITFISH (Siganus sutor) REARED IN INTERTIDAL BRACKISH WATER EARTHEN PONDS USING HAPA NETS*.
<https://karuspace.karu.ac.ke/handle/20.500.12092/2879>
- Oliva-Teles, A. (2012). Nutrition and health of aquaculture fish. *Journal of Fish Diseases*, 35(2), 83-108. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2761.2011.01333.x>
- Orth, R. J., Carruthers, T. J. B., Dennison, W. C., Duarte, C. M., Fourqurean, J. W., Heck, K. L., Hughes, A. R., Kendrick, G. A., Kenworthy, W. J., Olyarnik, S., Short, F. T., Waycott, M., & Williams, S. L. (2006). A Global Crisis for Seagrass Ecosystems. *BioScience*, 56(12), 987-996. [https://doi.org/10.1641/0006-3568\(2006\)56\[987:AGCFSE\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1641/0006-3568(2006)56[987:AGCFSE]2.0.CO;2)
- Oufiero, C. E., & Whitlow, K. R. (2016). The evolution of phenotypic plasticity in fish swimming. *Current Zoology*, 62(5), 475-488. <https://doi.org/10.1093/cz/zow084>
- Palstra, A. P., Roque, A., Kruijt, L., Jéhannet, P., Pérez-Sánchez, J., & Dirks, R. P. (2020). Physiological Effects of Water Flow Induced Swimming Exercise in Seabream *Sparus aurata*. *Frontiers in Physiology*, 11.
<https://doi.org/10.3389/fphys.2020.610049>
- Parazo, M. M. (1990). Effect of dietary protein and energy level on growth, protein utilization and carcass composition of rabbitfish, *Siganus guttatus*. *Aquaculture*,

86(1), 41-49. [https://doi.org/10.1016/0044-8486\(90\)90220-H](https://doi.org/10.1016/0044-8486(90)90220-H)

Pauly, D., Christensen, V., Guénette, S., Pitcher, T. J., Sumaila, U. R., Walters, C. J., Watson, R., & Zeller, D. (2002). Towards sustainability in world fisheries. *Nature*, 418(6898), 689-695. <https://doi.org/10.1038/nature01017>

Pauly, D., Watson, R., & Alder, J. (2005). Global trends in world fisheries : Impacts on marine ecosystems and food security. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 360(1453), 5-12. <https://doi.org/10.1098/rstb.2004.1574>

Pollom, R., Cheok, J., Pacoureau, N., Gledhill, K. S., Kyne, P. M., Ebert, D. A., Jabado, R. W., Herman, K. B., Bennett, R. H., Silva, C., Fernando, S., Kuguru, B., Leslie, R., McCord, M. E., Samoily, M., Winker, H., Fennessy, S., Pollock, C. M., Rigby, C. L., & Dulvy, N. K. (2021). *Overfishing and Climate Change Elevate Extinction Risk of Endemic Sharks and Rays in the Southwest Indian Ocean Hotspot*. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-984080/v1>

Ranaivoson, E., Fontenelle, G., Rabenevanana, M. W., Ramiaramanana, J., Salem, M. C. C., & Ralijaona, C. (2006). *Identification des conditions d'appropriation de la gestion durable des ressources naturelles et des écosystèmes : « Cas du Grand Récif de Toliara »*.

Ravelohasina, H. B., Rasolofonirina, R., Jaonalison, H., Mahafina, J., Lepoint, G., Ponton, D., & Frédéric, B. (2024). Variability of trophic ecology in two teleost species associated with lagoonal habitats (Great Reef of Toliara, SW Madagascar). *Regional Studies in Marine Science*, 75, 103563-. <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2024.103563>

Robson, L., & Rakotozafy, F. (2015). The freedom to choose : Integrating

- communitybased reproductive health services with locally led marine conservation initiatives in southwest Madagascar. *Madagascar Conservation & Development*, 10(1), Article 1. <https://doi.org/10.4314/mcd.v10i1.S2>
- Rohlf, F. (2015). The Tps series of software. *Hystrix*, 26, 1-4. <https://doi.org/10.4404/hystrix-26.1-11264>
- Sallam, E. A., Matter, A. F., Mohammed, L. S., Azam, A. E., Shehab, A., & Mohamed Soliman, M. (2021). Replacing fish meal with rapeseed meal : Potential impact on the growth performance, profitability measures, serum biomarkers, antioxidant status, intestinal morphometric analysis, and water quality of *Oreochromis niloticus* and *Sarotherodon galilaeus* fingerlings. *Veterinary Research Communications*, 45(4), 223-241. <https://doi.org/10.1007/s11259-021-09803-5>
- Shuai, F., Yu, S., Lek, S., & Li, X. (2018). Habitat effects on intra-species variation in functional morphology : Evidence from freshwater fish. *Ecology and Evolution*, 8(22), 10902-10913. <https://doi.org/10.1002/ece3.4555>
- Simon, A. (2012). Estimation of Important Reproductive Parameters for Management of the Shoemaker Spinefoot Rabbitfish (*Siganus sutor*) in Southern Kenya. *International Journal of Marine Science*. <https://doi.org/10.5376/ijms.2012.02.0004>
- Srinivasan, U. T., Cheung, W. W. L., Watson, R., & Sumaila, U. R. (2010). Food security implications of global marine catch losses due to overfishing. *Journal of Bioeconomics*, 12(3), 183-200. <https://doi.org/10.1007/s10818-010-9090-9>
- Syah, R., Makmur, Tampangallo, B. R., Undu, M. C., Asaad, A. I. J., & Laining, A. (2020). Rabbitfish (*Siganus guttatus*) culture in floating net cage with different stocking densities. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 564(1),

012022. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/564/1/012022>

Syukur, A., Mahrus, M., & Syachrudin. (2018, octobre 10). *Environmentally friendly fish farming and seagrass conservation as an instrument of economics development of small-scale fishermen in coastal waters of Tanjung Luar East Lombok.*

The State of World Fisheries and Aquaculture 2022. (2022). FAO.

<https://doi.org/10.4060/cc0461en>

Tricaine-Guidelines-2-7-20.pdf. (s. d.). Consulté 27 juillet 2024, à l'adresse

<https://www.brown.edu/research/sites/research/files/Tricaine-Guidelines-2-7-20.pdf>

Universalis, E. (2014, mars 3). *MADAGASCAR.* Encyclopædia Universalis.

<https://www.universalis.fr/encyclopedie/madagascar/>

von Dorrien, C. (2008). Fishing for Sustainable Policies—Political Causes of Over-fishing and Solutions for Sustainable Fisheries. In H. von Storch, R. S. J. Tol, & G. Flöser (Éds.), *Environmental Crises* (p. 83-100). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-540-75896-9_7

Waldrop, T., Summerfelt, S., Mazik, P., Kenney, P. B., & Good, C. (2020). The effects of swimming exercise and dissolved oxygen on growth performance, fin condition and survival of rainbow trout *Oncorhynchus mykiss*. *Aquaculture Research*, 51(6), 2582-2589. <https://doi.org/10.1111/are.14600>

Wang, H., Ma, S., Yang, J., Qin, Y., Cheng, H., Xue, M., Li, J., & Li, J. (2021). Optimization of the process parameters for extruded commercial sinking fish feed with mixed plant protein sources. *Journal of Food Process Engineering*, 44(1), e13599. <https://doi.org/10.1111/jfpe.13599>

Yang, H., Leng, X., Du, H., Luo, J., Wu, J., & Wei, Q. (2020). Adjusting the Prerelease Gut

Microbial Community by Diet Training to Improve the Postrelease Fitness of Captive-Bred *Acipenser dabryanus*. *Frontiers in Microbiology*, 11.

<https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.00488>

Yunanto, A., Wiguna, H. J., Endo, S., Nugraha, E., Yusrizal, & Krisnafi, Y. (2018). *Do marine protected areas have lower overfishing level?* 11(5), 1672-1679.

Zadinelo, I. V., Alves, H. J., Moesch, A., Colpini, L. M. S., da Silva, L. C. R., & dos Santos, L. D. (2015). Influence of the chemical composition of smectites on the removal of ammonium ions from aquaculture effluents. *Journal of Materials Science*, 50(4), 1865-1875. <https://doi.org/10.1007/s10853-014-8749-3>