



LA GRAINE ET LE MUGE

VERS UNE PISCICULTURE BASSE CONSOMMATION ? Rapport scientifique 2 – CIRAD

Test du remplacement du tourteau de soja par de la farine d'ulve (*Ulva rigida*) dans un aliment pour les muges (*Liza ramada* et 2 autres espèces)

Philippe Cacot (CIRAD), le 29/02/2020



BASSIN DE THAU
Entre Terre et Lagune



❖ Résumé

Cette étude fait suite à une précédente portant sur le remplacement du maïs par du pain rassis comme source d'amidon dans l'aliment du muge *Liza ramada*. Toujours avec cette espèce, il s'agit maintenant de tester la farine de la macroalgue verte ulve (*Ulva rigida*) comme source de protéines alternative au tourteau de soja (TS).

La farine d'algue (FA) utilisée est issue d'une ulve cultivée en lagunes, dans le rejet d'une éclosure-nurserie de poissons marins. Deux types de granulés extrudés ont été préparés, l'un avec 0% FA et 40% TS et l'autre avec 20% FA et 20% TS. Les teneurs en protéines étant différentes entre FA (32,4%) et TS (50,3%) (% matière sèche MS), les teneurs en gluten de blé et en farine de lupin ont été ajustées pour que ces deux aliments aient à peu près la même composition proximale. Un troisième aliment a été utilisé, un granulé industriel pour tilapia de composition similaire. La teneur en protéines était sensiblement différente entre les aliments avec 33,2%, 35,4% et 40,4% (% MS) pour les aliments 0% FA, 20% FA et industriel, respectivement. L'expérimentation a été réalisée en deux phases, avec une amélioration des conditions durant la 2^{ème} phase (autres espèces de muges retirées des bacs de *L. ramada*, température plus élevée et granulométrie plus petite pour l'aliment industriel).

Durant la 2^{ème} phase, chaque type d'aliment a été distribué à satiété à quatre bacs de 60 L stockés avec 17 poissons marqués individuellement et d'un poids moyen initial de 53,8 g. Après 37 jours à 26,6°C en moyenne, les poissons nourris aux granulés 0% FA et 20% FA avaient des performances moyennes semblables au niveau du taux de croissance spécifique (TCS 1,03 %/jour) et de l'indice de conversion alimentaire (ICA 1,85 et 1,92). Le TCS des poissons nourris avec l'aliment industriel était meilleur (1,31 %/jour, $P < 0,001$) mais l'ICA correspondant n'était pas significativement différent (1,99). La meilleure croissance avec l'aliment industriel est associée à un taux d'alimentation journalier d'un tiers supérieur aux aliments 0% FA et 20% FA ($P < 0,001$). Le taux d'efficacité protéique était différent entre les trois aliments avec 1,81, 1,61 et 1,39 pour l'aliment 0% FA, 20% FA et l'aliment industriel, respectivement ($P < 0,05$). La rétention des protéines était similaire pour les aliments 0% FA et 20% FA (30,5% et 30,1%) mais elle était plus faible pour l'aliment industriel (24,3%).

Ces résultats montrent qu'il est possible d'incorporer 20% de farine d'ulve mais le supplément de gluten de blé renchérit cet aliment. Des options sont discutées pour utiliser une farine d'ulve à la teneur supérieure en protéines et ainsi réduire le gluten de blé. Par ailleurs, la croissance des poissons pourrait être améliorée en essayant d'augmenter la consommation de l'aliment. Il serait également utile de déterminer la teneur en protéines optimale de l'aliment.

Dans nos conditions, des résultats préliminaires suggèrent que l'ICA de *L. ramada* pourrait être inférieur à celui de *Mugil cephalus* alors que le TCS est similaire pour ces deux espèces. Enfin, les performances de muges d'espèces indéterminées (*Liza aurata* et/ou *L. saliens*) semblent nettement moins bonnes que celles de *L. ramada* et *M. cephalus*.

❖ Remerciements

L'étude a reçu de nombreuses contributions, les personnes qui ont participé sont chaleureusement remerciées. Plusieurs d'entre elles le sont particulièrement pour leur patience et leur persévérance qui ont permis de mener à bien ce projet.

Organise partenaire	Contribution à l'étude	Personnes impliquées
CPIE du Bassin de Thau (Frontignan)	- Coordination du projet, - assistance technique pour la collecte des petits muges, - fabrication des aliments, - participation aux tests d'élevage.	Adeline Rimpler, Florian Martel, John Bandelier, Fabrice Jean et Terahiti Faatauira (Volontaire Civique)
Entreprise Les Poissons du Soleil (Balaruc-les-Bains)	- Accueil et maintenance du dispositif d'élevage, - participation aux tests d'élevage.	Philippe Balma, Benoît Bufflier, Caroline Vernet, Thierry Beaufort, Gilles Maingon, Wagner Maciel-Leite, Yan Combe et Terahiti Faatauira (stagiaire)
Entreprise la Ferme Marine du Douhet (La-Brée-les-Bains)	Fourniture de la farine d'algue	Jean-Sébastien Bruant, Alexandre Boinot et Julien Roblin
Université d'Annaba (Algérie)	- Fabrication des aliments, - participation aux tests d'élevage.	Hichem Kara et Meriem Chagour (doctorante)
CIRAD, UMR QualiSud (Montpellier)	Fabrication des aliments	Antoine Delpech et Jean-Paul Danflous
CIRAD, UMR ISEM	- Coordination du projet, - fabrication des aliments.	Samira Sarter, Olivier Mikolasek, Sylviane Morand et Coline Brau
Pêcherie de l'étang de l'Or (Pérols)	Pêche des muges	Laurent Pezzoti
Lycée de la Mer (Sète)	Stockage temporaire des poissons	Jean-Louis Charriaux, Sylvie Mimosa et Nadia Ranchon
Entreprise Murex (Sète)	Stockage temporaire des petits muges	Jean-Marc Vitale
Ca Tech (Villeneuve-lès-Maguelone)	Arrangements électriques et dessins 3D	Aurélien Cacot

Meriem Chagour, Terahiti Faatauira et Wagner Maciel-Leite ont assuré avec grand soin les travaux quotidiens inhérents à l'expérimentation.

❖ Liste des abréviations

CEP : Coefficient d'Efficacité des Protéines

CIRAD : Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement

CPIE : Centre Permanent d'Initiative pour l'Environnement

FMD : Ferme Marine du Douhet

ICA (ou IC) : indice de conversion alimentaire

IMTA : Integrated Multi-Trophic Aquaculture (Aquaculture Intégrée Multi-Trophique)

LPDS : Les Poissons du Soleil

TAJ : taux d'alimentation journalier (ou taux de rationnement journalier)

TCS : taux de croissance spécifique

SOMMAIRE

❖ Introduction	1
1. Contexte et objectifs	1
1.1 L'enjeu des protéines en élevage.....	1
1.1.1 Régime alimentaire et prix de l'aliment.....	1
1.1.2 Les poissons d'élevage	2
1.1.3 Régime alimentaire et impact environnemental	3
1.1.4 Elevages terrestres	4
1.2 Bioremédiation algale	5
1.2.1 Culture d'algues en aval d'un circuit fermé	5
1.2.2 Culture d'algues dans un circuit fermé	7
1.2.3 Valorisation alimentaire des macroalgues	7
1.3 Objectifs de l'étude et démarche	10
1.3.1 Le test d'alimentation	10
1.3.2 Poissons utilisés.....	10
1.3.3 Les 2 phases du test	11
1.3.4 Culture d'algue intégrée.....	11
2. Matériel et méthodes	12
2.1 Expérimentation en deux phases.....	12
2.2 Poissons utilisés	12
2.2.1 Le stock de poissons	12
2.2.2 Manipulation des poissons.....	13
2.3 Alimentation des poissons	14
2.3.1 Description des aliments	14
2.3.2 Nourrissage des poissons	18
2.4 Système d'élevage	19
2.4.1 Description du système	19
2.4.2 Maintenance du système	21
2.5 Analyse des résultats.....	22
2.5.1 Paramètres zootechniques.....	22
2.5.2 Composition des carcasses de poissons.....	23
2.5.3 Analyse des données.....	23
3. Résultats	24
3.1 Préambule	24
3.2 Résultats spécifiques pour <i>Liza ramada</i>.....	24
3.2.1 Résultats de <i>Liza ramada</i> durant la 2 ^{ème} phase	24

3.2.2 Composition corporelle de <i>Liza ramada</i>	26
3.2.3 Performances estimées de <i>Liza ramada</i> pour l'ensemble des 2 phases	27
3.3 Ensemble des résultats.....	27
3.3.1 Croissance des poissons	27
3.3.2 Efficacité alimentaire.....	29
3.4 Propreté des bacs.....	33
3.5 Qualité de l'eau.....	34
4. Discussion.....	34
4.1 Les 2 phases du test	34
4.2 Taux de nourrissage et croissance	35
4.3 Intérêt de la farine d'algue	35
4.3.1 Efficacité protéique	35
4.3.2 Farine d'algue et gluten de blé.....	36
4.4 Prix des aliments	37
4.5 Evolution par rapport au précédent test d'alimentation.....	38
4.5.1 Structures expérimentales	38
4.5.2 Protocoles.....	39
4.5.3 Résultats	40
4.6 Perspectives.....	40
4.6.1 Optimiser le prix de l'aliment.....	40
4.6.2 Tester une autre farine d'algue.....	41
4.6.3 Tester un gradient de protéines dans l'aliment.....	42
4.6.4 Potentiel aquacole de <i>Mugil cephalus</i> et d'autres Mugilidae	42
4.6.5 Potentiel des muges en pisciculture intégrée	43
4.7 Amélioration du protocole de test d'alimentation.....	44
4.7.1 Optimiser la granulométrie	44
4.7.2 Optimiser la formulation	44
4.7.3 Les fibres en question	44
4.7.4 Optimiser l'extrusion.....	44
4.7.5 Stock de poissons	45
4.7.6 Bacs d'expérimentation	45
❖ Conclusion	46
❖ Epilogue	47
❖ Annexes.....	48
❖ Références.....	68

❖ Introduction

La présente étude fait suite à une précédente toutes deux réalisées dans le cadre d'un projet en partenariat associant notamment le CPIE du Bassin de Thau à Frontignan, l'entreprise les Poissons du Soleil à Balaruc-les-Bains et le CIRAD à Montpellier.

La finalité du projet est de contribuer à la durabilité de l'aquaculture en étudiant l'élevage des muges et tout particulièrement leur alimentation. Ces poissons étant omnivores, nous nous sommes intéressés à l'incorporation de matières végétales « durables » dans leur alimentation :

- 1) La farine de pain rassis en remplacement de la farine de maïs comme source d'amidon. Cela a été l'objet de la précédente étude réalisée en phase de prégrossissement puis en phase de grossissement des poissons.
- 2) La farine de la macroalgue ulve (*Ulva rigida*) en remplacement du tourteau de soja comme source de protéines. Cela est l'objet de la présente étude ; les résultats d'un test réalisé en phase prégrossissement sont présentés dans le présent document.

Une phase de grossissement est en cours avec la même farine d'algue. Les résultats à venir seront présentés dans une version complétée de ce rapport.

Le présent rapport se concentre sur les aspects relatifs à l'utilisation de la farine d'algue. La présentation générale du projet, incluant notamment le potentiel aquacole des muges et les résultats relatifs à l'utilisation de la farine de pain ont déjà été présentés (Cacot 2019).

1. Contexte et objectifs

1.1 L'enjeu des protéines en élevage

1.1.1 Régime alimentaire et prix de l'aliment

L'approvisionnement en protéines est un enjeu majeur de l'alimentation avec des implications à la fois économiques et environnementales. A raison d'une consommation quotidienne de protéines de ≈ 50 g par personne, la consommation française annuelle peut être estimée à environ 1,2 millions de tonnes (MT).

La principale source de protéines pour la consommation humaine en France, comme dans les autres pays développés occidentaux, est d'origine animale. Les animaux d'élevage consomment eux-mêmes des protéines dont ils fixent et « restituent » une fraction pour la consommation humaine. Cette fraction de protéines fixées est, dans le meilleur des cas, de l'ordre de 35-40% (œufs de poule).

Pour tous les êtres vivants, la « perte » des protéines consommées est principalement liée au remplacement continu des protéines dans l'organisme (ex : fibres musculaires) et à l'utilisation des protéines comme source d'énergie. Cette dernière est particulièrement importante dans le cas d'un régime alimentaire carnivore. Un régime alimentaire omnivore est quant à lui associé à l'utilisation privilégiée de l'amidon comme source d'énergie du fait de la présence d'enzymes digestives adaptées (ex : amylase). C'est pour cette raison fondamentale que tous les animaux d'élevage destinés à la consommation humaine sont omnivores, du moins en ce qui concerne les animaux terrestres, car l'amidon est bien moins

cher que la protéine pour une valeur énergétique assez proche (Tableau 1). Ainsi, l'énergie brute de l'amidon de maïs ($\approx 0,06$ €/mégacalorie) est 2 et 6 fois moins cher que celle des protéines de tourteau de soja et de farine de poissons, respectivement.

Tableau 1 : Amidon et protéines de trois matières premières importantes en alimentation animale.

Matière première	Prix/kg (€) ^a	Amidon				Protéines			
		Teneur ^b	Prix/kg	Kcal/g ^c	Prix/Mcal (€)	Teneur	Prix/kg	Kcal/g	Prix/Mcal (€)
Farine de poissons	1,23	0,0%	-	-	-	65,4%	1,88	5,6	0,336
Tourteau de soja	0,31	0,1%	-	-	-	45,6%	0,68	5,6	0,121
Maïs	0,15	66,3%	0,23	4,1	0,055	7,2%	-	-	-

Kcal : kilocalorie ; Mcalorie : mégacalorie (10^6 calories),

^a d'après le prix international à la tonne,

^b composition des matières premières utilisées dans la présente étude,

^c énergie brute d'après (Tacon et al. 2009).

Les poissons d'élevage sont quant à eux omnivores ou carnivores en fonction des espèces. La fraction de protéines fixée est donc très variable, d'environ 20-25% pour les poissons carnassiers marins (ex : daurade) à 40-50% pour les poissons omnivores (ex : carpes). Avec ces derniers, la fixation des protéines peut être encore plus élevée dans des systèmes d'élevage en polyculture en étangs, grâce au recyclage des rejets par le réseau trophique.

Les poissons d'élevage se distinguent également au niveau de la nature des protéines assimilables et donc incorporées aux rations : la principale source de protéines va être la farine de poissons (ou la farine de viande si autorisée) pour les carnivores et les graines oléo-protéagineuses (entières ou après extraction d'huile) pour les omnivores. Cela a un impact sur le prix de l'aliment des poissons car la protéine de la farine de poisson est 2,7 fois plus cher que celle du tourteau de soja.

1.1.2 Les poissons d'élevage

En pisciculture, au niveau mondial, les poissons élevés sont principalement omnivores ($\approx 70\%$), avec principalement des carpes (une dizaine d'espèces) puis des tilapias et des poissons-chats (FAOSTAT). Néanmoins, dans les pays développés occidentaux, ce sont les poissons carnivores qui dominent en pisciculture, avec principalement deux salmonidés (saumon et truite) et deux poissons marins (daurade et bar). Cette production de poissons carnivores est davantage destinée à satisfaire un marché lucratif qu'à contribuer efficacement à l'approvisionnement en protéines. Ainsi, en pratique, la production d'un kilo de poisson carnivore comme la daurade requiert l'équivalent d'environ 2 kg de poissons frais incorporés en farine aux granulés.

En France, la production piscicole totale est d'environ 45.200 T/an¹. Elle est dominée par les poissons carnivores, avec 32.000 T de truites en eau douce et 5200 T de poissons marins carnivores (bars, daurades et autres espèces). La production de carpe commune omnivore en

¹ <https://agriculture.gouv.fr/la-pisciculture-production-et-consommation>

étang d'eau douce est d'environ 8000 T. L'élevage de poissons carnivores peut donc sembler important mais il ne représente que 2,2% du marché national total en poissons (1,65 MT/an¹ (Agrimer 2016)), la pisciculture totale étant elle-même dérisoire (2,7% du marché). Ce marché est principalement approvisionné par des poissons de pêche (nationale et internationale) et des poissons d'élevage internationaux. Les importations de poissons carnivores d'élevage marin proviennent pour l'essentiel de la Norvège et de l'Ecosse (saumon), de la Tunisie, de la Grèce et de la Turquie (daurades et bars). Les importations de poissons omnivores d'élevage en eau douce (panga et tilapia) proviennent pour l'essentiel d'Asie (Viêtnam et Chine notamment).

1.1.3 Régime alimentaire et impact environnemental

Pourquoi la pisciculture française est-elle si peu développée ? Entre autres éléments de réponse, il y a le possible impact environnemental de cette production et son corolaire de normes de rejets et de restriction d'accès aux sites.

Le possible impact environnemental est lié aux rejets des poissons. Parmi ces rejets, les sels nutritifs dissous que sont l'ammoniaque, les nitrates et le phosphate sont particulièrement limitants ; les normes de rejets les concernant sont drastiques. Par exemple, pour l'élevage de truites en eau douce, la variation de concentration d'ammoniaque dans le cours d'eau ne doit pas dépasser 0,4 mg/L. Ces sels nutritifs peuvent en effet causer des blooms de macroalgues (ulves en particulier) qui constituent une nuisance (échouages sur les côtes) et peuvent causer l'eutrophisation du milieu lagunaire lorsque ces algues se décomposent (bloom de bactéries qui consomme beaucoup d'oxygène dissous).

Le rejet de sels nutritifs par les poissons est un corolaire de la fixation des protéines par ces poissons qui est elle-même liée à leur régime alimentaire. L'azote constitue environ 16% du poids de protéines. Cet azote est libéré lors de la dégradation des protéines non fixées, et excrété sous forme d'ammoniaque dans l'eau au niveau des branchies. Le rejet azoté peut donc être plus important avec des poissons carnivores qu'avec des poissons omnivores. Le différentiel de rejet entre ces deux types de poissons est une question importante qui mérite d'être précisée en fonction des espèces ciblées, du type d'aliment utilisé et du système d'élevage. En monoculture intensive, on peut considérer a priori qu'un poisson carnivore va possiblement rejeter $\approx 30\%$ d'azote en plus qu'un poisson omnivore². On retrouve ce différentiel notamment dans les informations fournies par Biomar (fabriquant d'aliment pour poissons) avec, par tonne de poissons produits avec un IC de 1,3, un rejet d'azote de 60 kg et 45 kg pour la daurade et le tilapia, respectivement (Figure 1). Le rejet azoté de la truite est égal à celui du tilapia alors que la truite est carnivore ; cela est probablement lié à la teneur élevée en lipides dans l'aliment truite (30% contre 6% dans l'aliment tilapia) qui permet de couvrir les besoins en énergie et ainsi de réduire la dégradation des protéines.

En pratique, pour un élevage de daurades en grossissement, une distribution quotidienne de 100 kg d'aliment (45% protéines) correspond à une production annuelle de ≈ 28 T. Cette consommation d'aliment génère un rejet quotidien de ≈ 5 kg d'azote, soit l'équivalent du rejet azoté de 500 personnes (≈ 10 g/personne/jour). Du phosphore accompagne également le

¹ 24,9 kg/habitant/an x 66,3 M habitants.

² Avec 45% et 30% de protéines pour les aliments carnivores et omnivores, respectivement, et, commun aux deux types de poissons, un IC de 1,3 et une teneur en protéines de 18% dans carcasse des poissons.



1.1.4 Elevages terrestres

Quant est-il de la situation des élevages terrestres qui sont très développés en France ? L'élevage porcin notamment, avec une production annuelle de 2,3 MT équivalent carcasse, correspond à la consommation nationale (2,25 MT/an¹). Il correspond également à 50 fois la production piscicole total. Les rejets porcins en sels nutritifs sont pourtant massifs. Avec un rejet azoté du porc à l'engraissement de 51,6 kg par tonne de production (d'après (Rey & Lobry 2017)), le rejet total de la filière porcine est au moins équivalent à 50% du rejet azoté total des habitants du pays... On remarque que le rejet azoté par tonne de production est similaire entre le porc à l'engraissement et les poissons d'élevage en grossissement cités plus haut.

Alors pour quelle(s) raison(s) la production porcine est-elle donc autant développée ? Une raison majeure semble être que la filière porcine sait gérer ses effluents, ou plus exactement les recycler. Chaque élevage de porc est en effet tenu de traiter son lisier, principalement par l'épandage sur des terres agricoles. Les rejets azotés de l'élevage sont bien connus en fonction des stades (Annexe Tableau 1) de même que la quantité d'azote exporté par les différentes cultures (Annexe Tableau 2). Cette exportation d'azote varie de 75 à 264 kg/ha/an pour une prairie permanente (0,5 T foin/ha/an) et une culture de maïs (12 T grains/ha/an), respectivement. Par ailleurs, il existe une directive nitrates qui limite l'apport d'azote à 170 kg/ha/an. Ainsi, par tonne de porcs engraisés (≈ 11 animaux), en considérant le lisier brut, une surface d'épandage d'au moins 3000 m² est nécessaire.

4

Cet aspect recyclage est essentiel pour la filière porcine, de même que pour les autres filières animales terrestres, à la fois pour une question de protection de l'environnement et pour l'économie que constitue l'apport des sels nutritifs aux cultures. De plus, cela contribue certainement à « l'acceptabilité sociétale » des productions animales qui peuvent être jugées doublement utiles. Saurions-nous capable d'en faire autant avec la pisciculture ? Actuellement, les piscicultures sont tenues de respecter des normes de rejet, exprimées en variation de concentration dans l'eau de rejet et/ou en quantité de rejet (ex : kg azote/an) ; il n'y a pas d'impératif de traitement du rejet lui-même.

1.2 Bioremédiation algale

1.2.1 Culture d'algues en aval d'un circuit fermé

Les macroalgues absorbent efficacement les sels nutritifs dissous ; c'est d'ailleurs ce qui cause leur prolifération lors d'épisodes de pollution. Cette capacité peut être exploitée dans les systèmes aquacoles intégrés multitrophiques (IMTA en anglais¹) pour « bioremédier » tout ou partie des rejets d'ammoniaque, nitrates et phosphates dissous (Neori et al. 2004 ; Soto 2009). La culture est le plus souvent placée dans le rejet d'un circuit fermé avec lequel la concentration en sels nutritifs est élevée (Abreu et al. 2011 ; Ben-Ari et al. 2014 ; Hussenot & Richard 2010). L'eau ainsi filtrée par les algues est rejetée dans le milieu naturel.

Ce mode de culture est assez extensif et il nécessite donc une surface de culture relativement importante. Ainsi, environ 4000 m² sont nécessaires pour la bioremédiation - théorique et intégrale - du rejet azoté issu de la consommation quotidienne de 100 kg d'aliment (Tableau 2). Cette culture est également soumise aux aléas climatiques ; la production d'algues est très variable au cours de l'année, de presque rien en hiver à environ 200 g/m²/jour au printemps et en été. On remarque également que la quantité d'algue produite peut être importante avec possiblement 400 kg d'algue fraîche par jour, soit plusieurs fois la production de poissons. Cette culture va donc nécessiter de la main d'œuvre spécifique dédiée à la récolte ainsi qu'aux opérations post-récolte : rinçage et centrifugation et, pour la production de farine d'algue, séchage et broyage. Les exigences de cette culture impliquent donc que celle-ci soit profitable, tant au niveau de la réduction des rejets que de la valorisation commerciale de l'algue produite. Cela semble être le cas à la Ferme Marine du Douhet sur l'Île d'Oléron où la culture d'ulve en lagunes est pratiquée depuis une dizaine d'année (Figure 2).

¹ Integrated Multi-Trophic Aquaculture.

Tableau 2 : Bioremédiation algale en aval d'un circuit fermé d'élevage de daurades.
Estimation avec une culture de l'ulve *Ulva rigida* en lagune avec éclairage naturel.

Ces résultats sont l'objet de travaux distinct du CIRAD sur les daurades

Azote excrété par les poissons

Aliment / jour (kg)	100
Indice de conversion alimentaire	1,3
Production poissons / jour (kg)	76,9
Teneur en protéines dans les poissons	18%
Protéines fixées par les poissons / jour (kg)	13,8
Teneur en protéines dans l'aliment	45%
Apport en protéines aliment / jour (kg)	45,0
Protéines fixés par les poissons	30,8%
Protéines dégradées	69,2%
Protéines dégradées / jour (kg)	31,2
Azote (% protéines)	16%
Azote excrété / jour (kg)	5,0

Azote fixé par les algues

Production algue fraîche/m ² /jour (g)	100
Matière sèche algue (% algue fraîche)	23%
Production algue sèche/m ² /jour (g)	23,0
Teneur en azote dans l'algue sèche	5,0%
Azote (% protéines)	16%
Teneur en protéines dans l'algue sèche	31,3%
Azote fixé par les algues/m ² /jour (g)	1,2
Surface de culture nécessaire	4334

Productions

	Poissons frais	Algue	
		Fraîche	sèche
Production / jour (kg)	77	433	100
Production / an (tonnes)	28	158	36

Note : les chiffres en jaune sont fixés, les autres chiffres sont calculés.



En alternative à la culture semi-extensive en lagune, la culture d'algues peut être placée dans le circuit fermé des poissons lui-même. Cette 2^{ème} méthode est rarement rapportée mais c'est celle qui nous semble la plus intéressante et que nous avons choisie lors de nos essais d'élevage en circuit fermé réalisés aux Poissons du Soleil à Balaruc-les-Bains (Maciel-Leite 2016 ; Maciel-Leite 2017).

1.2.3 Valorisation alimentaire des macroalgues

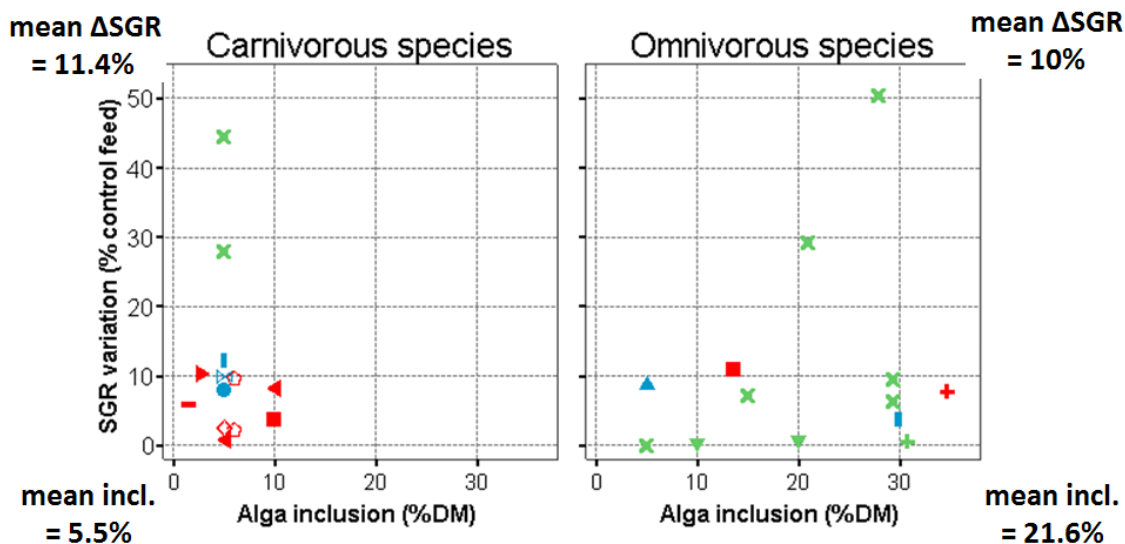
Les algues cultivées en IMTA recyclent les protéines : en absorbant les sels nutritifs (et le gaz carbonique) excrétés par les poissons, elles synthétisent et accumulent des protéines algales. Avec des algues cultivées dans le rejet d'un circuit fermé classique (avec biofiltre bactérien),

la teneur en protéines peut atteindre 30-35% de la matière sèche. Cette teneur est plus élevée avec une culture qui remplace le biofiltre bactérien.

Les algues ainsi produites peuvent donc constituer une source de protéines. La teneur de 30-35% rend possible l'utilisation de la farine d'algue comme ingrédient pour des granulés destinés à des poissons omnivores. Cette teneur est en revanche trop faible pour constituer une source de protéines importante pour des poissons carnivores.

De nombreuses publications présentent des résultats d'incorporation de macroalgues dans l'alimentation des poissons. Une synthèse réalisée par l'auteur présentait 50 tests avec un gradient d'incorporation ; ils concernaient pour moitié des poissons carnivores et moitié des poissons omnivores (Cacot 2016). Sur tous ces tests, 28 présentaient des résultats positifs par rapport aux aliments contrôle sans algues. Sur l'ensemble des meilleurs résultats obtenus, le niveau moyen d'incorporation de l'algue est environ 4 fois plus élevé avec les poissons omnivores qu'avec les poissons carnivores, d'environ 20% et 5%, respectivement (Figure 3). En moyenne, l'incorporation d'algues permet un gain de croissance d'environ 10% pour tous les poissons et une réduction de l'indice de conversion alimentaire (ICA) deux fois meilleure pour les poissons omnivores que pour les poissons carnivores, d'environ 10% et 20%, respectivement. Il s'agit là de valeurs moyennes sachant que la variabilité des résultats est très grande entre les différences espèces de poissons et d'algues. Cela peut être lié à des digestibilités différentes qui dépendent à la fois des poissons et des algues. La variabilité est également grande pour un même genre d'algue, *Ulva* notamment ; cela peut être lié notamment à la variabilité importante de la teneur en protéines, en l'occurrence de 7% à 40% de la matière sèche chez *Ulva*.

Best fish growth



Best feeding efficiency

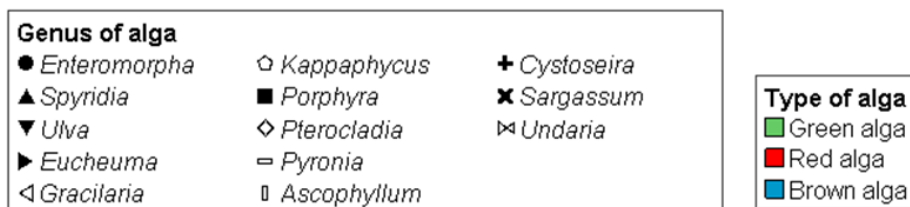
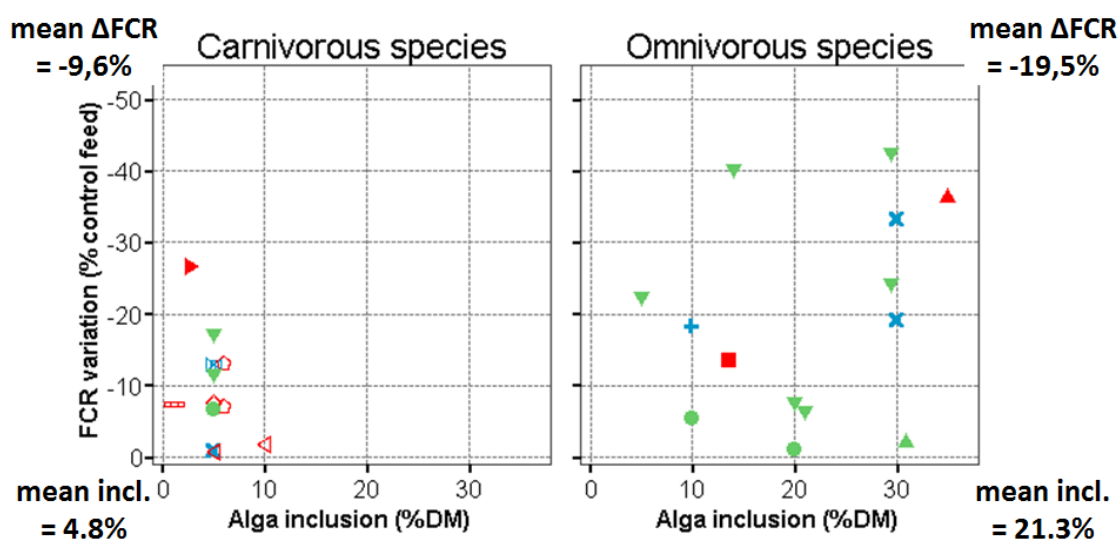


Figure 3 : Meilleures performances de croissance et d'efficacité alimentaire obtenues avec des macroalgues dans l'alimentation de poissons carnivores ou omnivores (Cacot 2016).

Note : SGR : Specific Growth Rate (Taux de croissance spécifique, TCS) ; FCR : Feed Efficiency Ration (Indice de Conversion alimentaire, ICA) ; incl. : taux d'incorporation de l'algue dans l'aliment (% de la matière sèche).

1.3 Objectifs de l'étude et démarche

1.3.1 Le test d'alimentation

Pour l'alimentation des muges, nous avons réalisé un test de substitution de la moitié du tourteau de soja par de la farine d'ulve (*Ulva rigida*) comptant pour 20% des ingrédients secs des granulés. La formulation a été réalisée en nous basant sur la composition proximale d'un granulé industriel (Biomar) pour grossissement de tilapia (poisson omnivore) avec 37% protéines et 9% lipides (% produit brut).

Nous avions initialement l'intention d'utiliser la farine d'algue issue de la culture de l'ulve *Ulva rigida* réalisée dans le circuit fermé lors du test d'alimentation des muges avec la farine de pain en 2017 (Cacot 2019). Nous n'avons finalement pas utilisé cette farine d'algue car elle a été conservée assez longtemps (≈ 2 ans).

La farine d'algues utilisée ici provenait donc de la Ferme Marine du Douhet (FMD) sur l'Île d'Oléron qui produit des juvéniles de bars et daurades. La culture d'algue était réalisée en lagunes en terre avec éclairage naturel et l'eau de rejet des circuits fermés de la ferme. La teneur en protéines de cette farine était de 32,4% (% matière sèche) ce qui était inférieur à celle du tourteau de soja (48,1%). La substitution du tourteau de soja a donc nécessité de modifier la composition de deux autres ingrédients (gluten de blé et farine de lupin). Notre test n'est donc pas littéralement une simple substitution du soja par l'algue.

Deux types de granulés expérimentaux ont donc été fabriqués, avec ou sans farine d'algue, par nous-même en utilisant un petit extrudeur appartenant au CIRAD. Ces granulés avaient donc a priori une qualité proche des granulés industriels extrudés ; l'extrusion permet en effet de cuire les ingrédients et d'assurer une cohésion optimale des ingrédients. Un 3^{ème} aliment a été testé ; il s'agissait du granulé industriel Biomar pour tilapia qui nous a permis d'évaluer la qualité de nos deux granulés expérimentaux.

1.3.2 Poissons utilisés

Ces trois aliments ont été testés sur le muge de l'espèce *Liza ramada*, comme pour les tests précédents avec la farine de pain rassis. Cette espèce est localement la plus abondante parmi les 5 espèces de muges présentes dans la région. La collecte des muges a été particulièrement laborieuse cette fois-ci. Elle a duré plusieurs mois avec plusieurs pêches sur plusieurs sites : canal à Mèze, étang de Thau, étang de L'Or et canal à Villeneuve-lès-Maguelone. Les poissons ont été stockés temporairement au Lycée de la Mer à Sète puis, toujours à Sète, dans l'entreprise Murex. Enfin, les poissons ont été examinés par un service vétérinaire puis ils ont reçu un traitement préventif afin de limiter les risques sanitaires avant leur transfert chez LPDS. Nous avons bien appris et maintenant nous savons (1) que l'hiver est de loin la meilleure période de pêche (petits poissons abondants et robustes), (2) que l'utilisation de la capéthead dans les canaux est un bon mode de pêche et (3) que l'entreprise Murex est un lieu de stockage temporaire adéquat.

Le stock de *Liza ramada* (ou autres espèces assimilées) était tout juste suffisant. Nous avons environ 280 poissons ce qui nous a permis d'utiliser 12 bacs avec 22-23 poissons par bac. A raison de 4 bacs par type d'aliment, nous avons pu tester 3 types d'aliment dont 0% et 20% farine d'algue et l'aliment industriel de référence. Ce protocole était minimal ; nous souhaitions tester un gradient d'incorporation de la farine d'algue avec 0-10-20-30%, plus l'aliment industriel de référence, soit 5 traitements, avec 4 bacs par traitement cela aurait fait

20 bacs au total ; tous ces bacs étaient disponibles dans notre circuit fermé d'expérimentation. Par ailleurs, nous n'avons pas pu nous permettre d'être très sélectif sur la taille initiale des poissons ; nous avons dû garder des poissons assez petits et d'autres assez gros, avec pour conséquence des lots par bac assez hétérogènes (coefficient de variation du poids de 32,7% pour *Liza ramada* en 2^{ème} phase de test). Les résultats obtenus sont néanmoins satisfaisants ; le marquage individuel des poissons a permis d'évaluer l'effet de la taille initiale des poissons sur la croissance ; nous avons également pris soin d'établir des lots de poissons initiaux semblables dans les bacs.

Outre *Liza ramada*, nous avons pu effectuer des observations sur *Mugil cephalus*, un autre muge d'intérêt aquacole, avec des petits et des grands poissons (un bac de chaque nourris avec l'aliment 20% algue). Enfin, durant la 2^{ème} phase du test, nous avons également pu constituer 3 bacs de muges d'espèce « indéterminée » (certainement *Liza aurata* et/ou *Liza saliens*) avec un bac par type d'aliment.

1.3.3 Les 2 phases du test

Le test d'alimentation s'est déroulé en 2 phases successives de 6 et 5 semaines. Après la 1^{ère} phase, nous avons apporté les changements suivants : (1) séparation des muges d'espèces indéterminées qui avaient été initialement mis avec les *Liza ramada* (les poissons initialement petits n'étaient pas faciles à identifier), (2) augmentation de la température de l'eau (de 23 à 28°C) grâce à l'optimisation de la culture d'algue (réduction de l'apport d'eau neuve froide) et (3) reconditionnement de l'aliment industriel de référence (en granulés de petite taille plus facilement ingérés par les poissons).

1.3.4 Culture d'algue intégrée

Ce test d'alimentation a constitué une occasion supplémentaire d'utiliser la culture d'algue comme biofiltre intégré au circuit fermé. Nous l'avons déjà fait lors du précédent test d'alimentation réalisé avec des muges au Lycée de la Mer à Sète (Cacot 2019). Cette expérimentation indépendante du projet du consortium porté par le CPIE a été validée par les partenaires afin de mutualiser les installations mais n'est pas intégrée à cette étude.

2. Matériel et méthodes

2.1 Expérimentation en deux phases

Tableau 3 : Description des deux phases de l'expérimentation.

Paramètres	Phase 1	Phase 2
Durée	41 jours	37 jours
Poissons stockés	▪ 22-23 poissons par bac dont un mélange de 17-18 <i>Liza ramada</i> et 4-5 muges d'espèces indéterminées (<i>Liza saliens</i> et/ou <i>Liza aurata</i>). ▪ 4 bacs par type d'aliment testé. ▪ Poissons « indéterminés » différenciés clairement des <i>Liza ramada</i> lors de la biométrie en fin de 1^{ère} phase. ▪ <i>Mugil cephalus</i> : 1 bac de petits poissons et 1 bac de gros poissons, tous deux nourris avec l'aliment 20% algue.	▪ 17-18 poissons par bac avec <i>Liza ramada</i> exclusivement ▪ Toujours 4 bacs par type d'aliment testé. ▪ Poissons indéterminés placés dans d'autres bacs avec 1 bac par type d'aliment testé. → Meilleure précision de l'ICA pour <i>Liza ramada</i>. ▪ <i>Mugil cephalus</i> : idem phase 1.
Aliment industriel	Sous forme de miettes (granulés d'origine broyés et tamisés entre 2,25 et 1 mm). → Mauvaise consommation de cet aliment et mauvaise croissance des poissons	Granulés d'origine broyés finement et reconditionnés en granulés plus petits. → Amélioration de la consommation de cet aliment
Température de l'eau	≈ 23°C	≈ 26,6°C grâce à l'amélioration du recyclage de l'eau (amélioration de la culture d'algues). → Optimisation de la prise alimentaire et de la croissance

2.2 Poissons utilisés

2.2.1 Le stock de poissons

Les muges principalement utilisés appartiennent à l'espèce *Liza ramada*. Nous avons également utilisé des muges de l'espèce *Mugil cephalus* et d'autres encore dont nous n'avons pas pu déterminer l'espèce avec précision (*Liza aurata* et/ou *Liza saliens*) (Figure 4). Tous ces poissons sont sauvages et issus de la pêche dans les lagunes et les canaux du littoral entre Palavas-les-Flots et Mèze. Ils ont tous été capturés en 2019 ; ils étaient vraisemblablement pour la plupart dans leur première année.

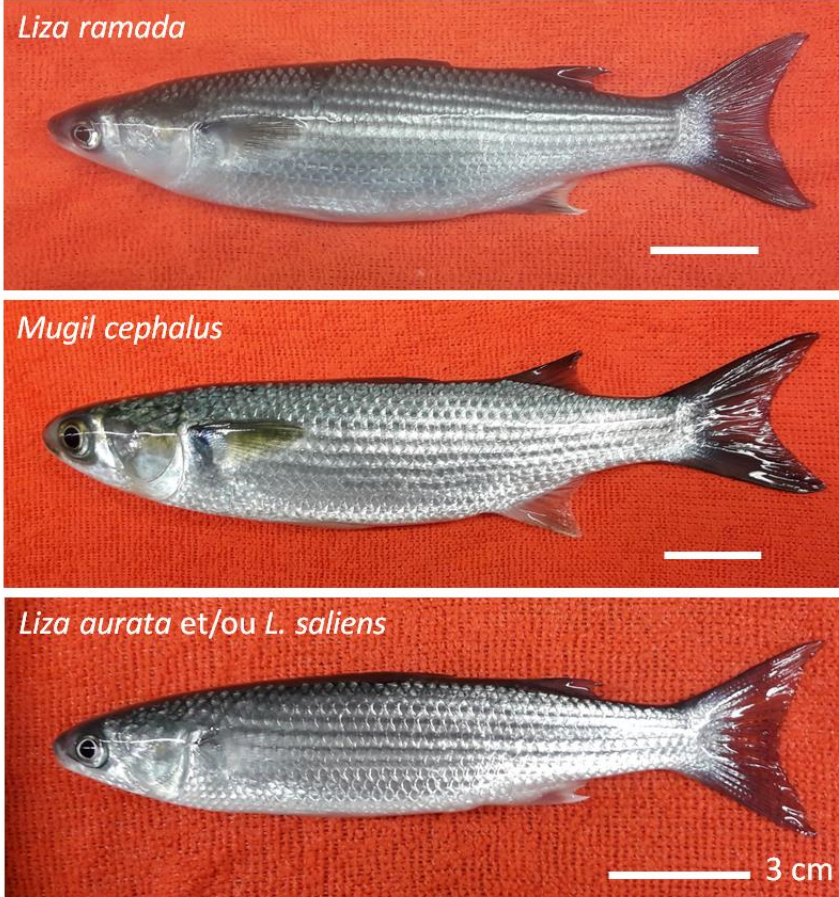


Figure 4 : Les espèces de muges utilisées.

Note : *Liza aurata* et/ou *L. saliens* ont été considérés ici comme « poissons indéterminés ».

Le stock de poissons constitué a fait l'objet d'un examen vétérinaire avant leur transfert sur un site d'élevage de LPDS où d'autres poissons d'élevage de l'entreprise sont déjà présents. Cet examen de 2 lots de poissons a montré que ces poissons étaient en bonne santé mais qu'ils étaient porteurs de souches bactériennes potentiellement pathogènes pour la daurade (*Photobacterium damsela damsela* et *Vibrio alginolyticus*). Pour réduire le risque de contamination, les muges ont reçu un traitement avant leur transfert sur le site d'expérimentation. Ce traitement était un bain statique à 60 g/m³ d'antibiotique (oxytétracycline) à 75% à renouveler 3 fois à 48h d'intervalle. Les poissons ont été transférés mi-septembre 2019 puis ils sont restés stockés dans un bac de 500 L durant 2 mois avant le début de l'expérimentation mi-novembre 2019. Ils ont été nourris durant cette période à satiété (tapis d'aliment 20h/24) avec le granulé industriel Biomar pour tilapia qui sera utilisé ensuite durant l'expérimentation (Annexe Figure 1).

Tous les poissons utilisés ont été marqués avec des microtags pour un suivi individuel de la croissance. L'implantation des marques a été réalisée sur les poissons anesthésiés.

2.2.2 Manipulation des poissons

Les poissons ont été manipulés plusieurs fois, lors des transferts, des prélèvements, du marquage et des biométries. A chaque fois, les poissons ont été mis à jeun durant 3 jours, du

jour précédent au jour suivant la manipulation. Avant manipulation, les poissons ont été anesthésiés par balnéation dans une solution de benzocaïne (50 ml/m^3 d'une solution préparée). Il est important que les poissons manipulés soient immobiles sans quoi ils risquent de perdre des écailles ce qui est la principale cause de blessure et de mortalité des muges.

2.3 Alimentation des poissons

2.3.1 Description des aliments

Trois types d'aliments ont été testés dont deux granulés expérimentaux et un granulé de référence industriel pour tilapia (Tableau 4, Figure 5). La formulation des granulés expérimentaux a été ajustée pour que leur composition proximale corresponde au mieux à celle du granulé industriel. Les paramètres fixes ont été les teneurs en (1) farine et huile de poissons, levure de bière, prémix et CaPO_4 pour garantir les apports nutritionnels, (2) farine de maïs pour garantir la bonne extrusion et la cohésion des granulés et (3) la farine de pain pour répondre à l'objectif du projet sur la valorisation de cette matière première (recyclage alimentaire). Nous avons incorporé 20% de farine d'algue en remplacement de 20% de tourteau de soja. La teneur en protéines de la farine d'algue (32,4%) (% matière sèche) étant plus faible que celle du tourteau de soja (48,1%), la formulation du granulé 20% algues a été ajustée en augmentant la teneur en gluten de blé et en réduisant celle de la farine de lupin (Tableau 5).

Nous nous sommes basés sur la composition des matières premières indiquée par les fournisseurs, sauf pour la farine d'algue que nous avons faites analyser. Chaque type de granulé a ensuite été analysé en laboratoire pour déterminer leur composition réelle ; il en a été de même pour le tourteau de soja, le gluten de blé et la farine de lupin. Nous n'avons pas procédé aux analyses avant par souci d'économie ; nous voulions être sûr de la qualité des résultats du test d'alimentation avant de faire faire les analyses de composition.

Il s'avère que la composition des granulés ne correspond pas exactement à celle prévue en particulier pour les protéines. La teneur en protéines est en effet de 33,1%, 35,4% et 40,2% pour les aliments 0% algue, 20% algue et Biomar, respectivement. La teneur en lipides est similaire entre les granulés ($\approx 10\%$) de même que l'énergie brute ($\approx 3,8 \text{ kcal/g}$). Notre intention était d'avoir des granulés de composition proche de celle annoncée pour le granulé Biomar, c'est-à-dire 37% protéines, 9% lipides et 4,5 kcal/g. Or il se trouve que la composition réelle de ce granulé en % de matière sèche est assez différente, avec 40,6% protéines, 10% lipides et 3,78 kcal/g. La différence entre les deux vient du fait que la composition de l'aliment Biomar est donnée sans mention du taux d'humidité, qui est en pratique de 7%. La différence entre nos deux granulés expérimentaux est assez faible au niveau des protéines (2,3%) ; elle pourrait être liée aux écarts de composition des matières premières entre les valeurs annoncées et les valeurs réelles ($\approx 2\%$ pour le tourteau de soja et le gluten de blé).

Tableau 4 : Composition des aliments testés.

	Granulés expérimentaux		Granulé Biomar ^d	
	0% farine algue	20% farine algue	Miette ^e	Reconditionné ^f
Ingrédients (%) ^a				
Farine d'algue	-	20,15	-	-
Tourteau de soja	40,24	20,19	-	-
Farine de maïs	15,18	14,58	-	-
Farine de pain	12,60	10,98	-	-
Farine de poisson	4,80	4,82	-	-
Gluten de blé	1,20	8,20	-	-
Huile de poisson	1,64	1,64	-	-
Levure de bière	1,96	1,97	-	-
Farine de lupin	16,57	11,15	-	-
Huile de soja	3,00	3,50	-	-
Prémix ^c	1,85	1,86	-	-
CaPO ₄	0,96	0,97	-	-
Composition proximale (%) ^b				
Protéines brutes	33,15	35,37	40,63	40,20
Lipides bruts	10,20	10,70	10,02	8,69
Fibres totales	20,84	21,62	21,34	23,50
Cendres	6,36	8,64	7,30	7,39
Extrait non azoté (ENA)	29,49	23,58	20,80	20,27
Energie brute (kcal/g)	3,84	3,76	3,78	3,66
Granulométrie (mm) ^g	^B 2,03 ± 0,21	^B 2,00 ± 0,14	^A 2,59 ± 0,34	^B 2,01 ± 0,07

^a En % de la matière totale (humidité incluse),

^b En % de la matière sèche, d'après l'analyse de la composition,

^c Prémix Aquatechna (minéraux, vitamines, lysine et méthionine) (Annexe Tableau 3),

^d EFICO Cromis 832F pour tilapia en grossissement (données du fournisseur). Ingrédients : tourteau de colza, tourteau de tournesol, farine de sang, protéines de plumes hydrolysées, farine de poisson, huile de colza, tourteau de la farine de soja, phosphate monocalcique, chlorure de choline, propionate de calcium (fiche technique en Annexe Tableau 3).

^e Granulés broyés et tamisés pour la 1^{ère} phase du test (détail des particules : longueur 3,18 ± 0,47 mm, largeur 2,00 ± 0,53 mm).

^f Granulés broyés finement et extrudés avec 2% de CMC ajouté, pour la 2^{ème} phase du test,

^g Moyenne ± écart-type (N = 30)

Différences significatives entre les 4 types de granulés : A, B (P < 0,001).



	Farine d'algue	Tourteau de soja	Gluten de blé	Farine de lupin
Composition proximale (%) *				
Protéines brutes	32,42	48,14	83,22	42,67
Lipides bruts	1,09	1,75	2,10	10,56
Fibres	25,87	21,23	6,51	39,22
Cendres	18,34	7,09	0,76	4,19
Extrait non azoté (ENA)	21,62	21,66	7,51	3,45
Energie brute (kcal/g)	2,81	3,38	3,09	3,58
Protéines (% granulés)				
0% farine algue	0,00	19,63	1,00	6,78
20% farine algue	6,56	9,74	6,78	4,84

Les deux granulés expérimentaux ont été préparés avec un petit extrudeur¹ (Figure 6, Figure 7). Le granulé industriel extrudé avait une granulométrie de 3 mm, trop grande pour les petits muges. Pour la 1^{ère} phase du test d'alimentation, ces granulés ont été broyés grossièrement puis tamisés. Ces granulés broyés sont sensiblement plus grands que les deux autres types de granulés. Par conséquent, pour la 2^{ème} phase du test, ces granulés ont été broyés finement (broyeur à aiguille) puis reconditionnés avec ajout d'un liant alimentaire (carboxy-méthyl cellulose, 2%), hydratation (35% d'eau ajoutée) et extrudés à température modérée ($\approx 80^{\circ}\text{C}$).

16

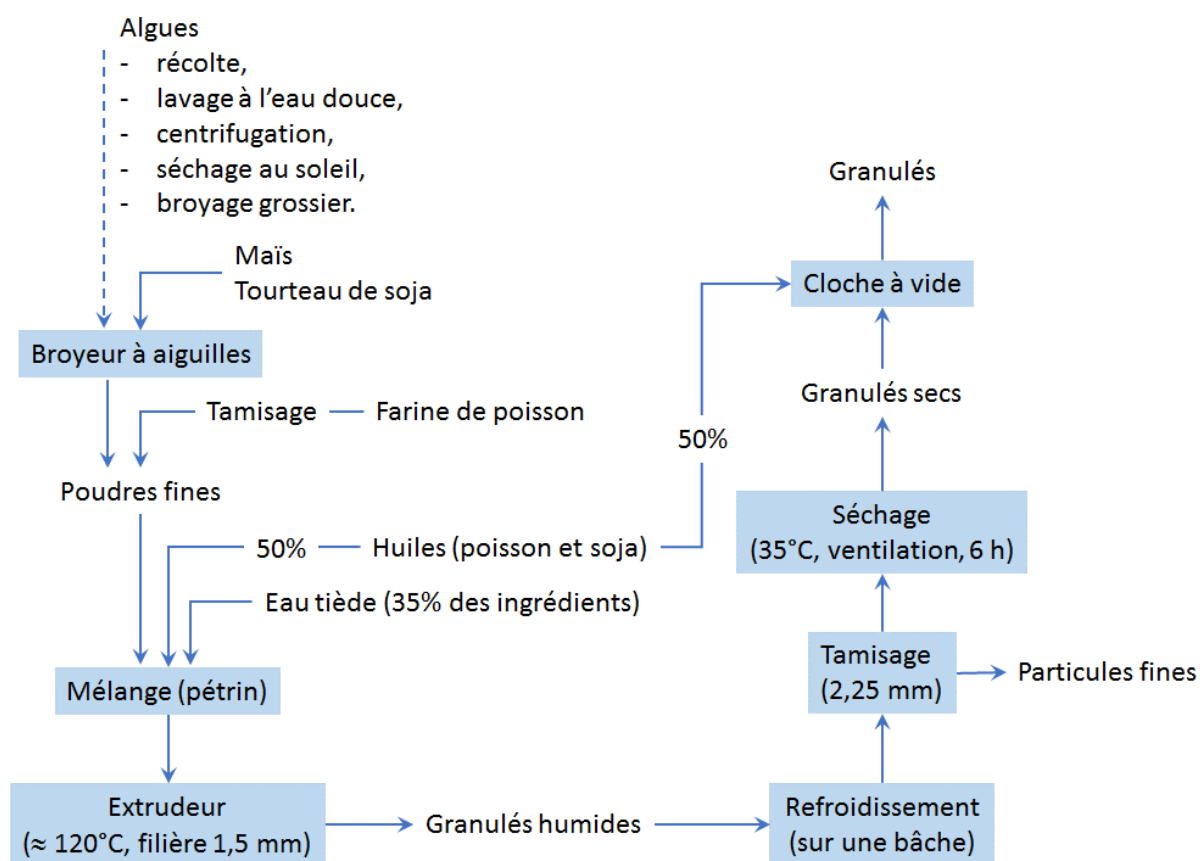
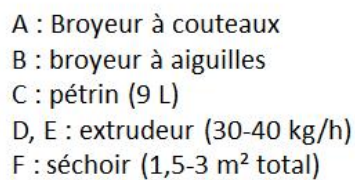


Figure 6 : Process de fabrication des granulés extrudés expérimentaux.



2.3.2 Nourrissage des poissons

18

si la précédente distribution avait été entièrement ingérée. La présence de granulés non consommée était observée sur le fond des bacs avant chaque distribution. L'éventuel reliquat non consommé du matin était proposé avec l'autre moitié de la ration journalière l'après-midi.

Lorsque la totalité de la ration journalière prévue était ingérée le jour J, la ration du jour J+1 était majorée de 5%. Si la ration journalière n'était pas entièrement consommée, le reliquat de granulés non distribué était pesé. Les granulés distribués mais restant au fond du bac étaient comptés et le poids correspondant calculé ($N \times \text{poids unitaire granulé}$). La quantité totale de granulés non consommés était notée pour déduire la quantité effectivement consommée chaque jour (= ration prévue – quantité non consommée). Les résultats de TAJ et d'indice de conversion alimentaire (ICA, § 2.5.1) concernent la quantité d'aliment effectivement consommée.

2.4 Système d'élevage

2.4.1 Description du système

Les poissons étaient stockés dans des bacs cylindriques de 60 L d'eau. Ces bacs de la marque Gilac étaient des récipients du format d'une poubelle de 75 L en PEHD¹ contact alimentaire et de couleur verte (réf. : G612036-1). Au total, 17 bacs ont été utilisés sur les 20 disponibles ; les bacs de chaque traitement ont été répartis aléatoirement dans la salle d'expérimentation. Les bacs étaient disposés dans un circuit fermé pour le recyclage de l'eau. Le système d'élevage était placé dans un grand container frigorifique (40 pieds) (Figure 8, Figure 9, Annexe Figure 2 et Annexe Figure 3). Le volume d'eau total du circuit fermé était d'environ 2620 L dont 1020 L en bacs poissons utilisés, le reste étant des bacs non utilisés et les volumes dédiés à la circulation et au traitement de l'eau. L'apport d'eau neuve total était d'environ 70%/jour (% volume total du circuit) soit $\approx 3\%/h$.

Un filtre à tambour (modèle AEM-S22 PRO) éliminait les rejets solides. Une culture d'algue absorbait l'ammoniaque et les autres sels nutritifs dissous ainsi que le gaz carbonique². De l'oxygène gazeux était apporté en permanence dans chaque bac (0,1-0,2 L/mn). Le débit de recirculation d'eau dans les bacs était d'environ 400 L/h, soit $\approx 650\%/h$. Chaque bac était couvert d'un disque de grillage plastique vert (maille 10 mm) pour empêcher les poissons de sauter hors du bac. Ce grillage était lui-même recouvert d'une toile brise-vue verte foncée sur les 2/3 de la surface pour le bien être des poissons. L'évacuation de l'eau des bacs se faisait au centre des bacs, par le haut lors du nourrissage et par le bas le reste du temps. Ce système évitait de perdre les granulés coulants utilisés (Annexe Figure 3).

¹ Polyéthylène haute densité

² Les détails de cette culture ne sont pas fournis car cette technique fait l'objet d'un autre programme de R&D spécifique au Groupe Aqualande et au CIRAD.

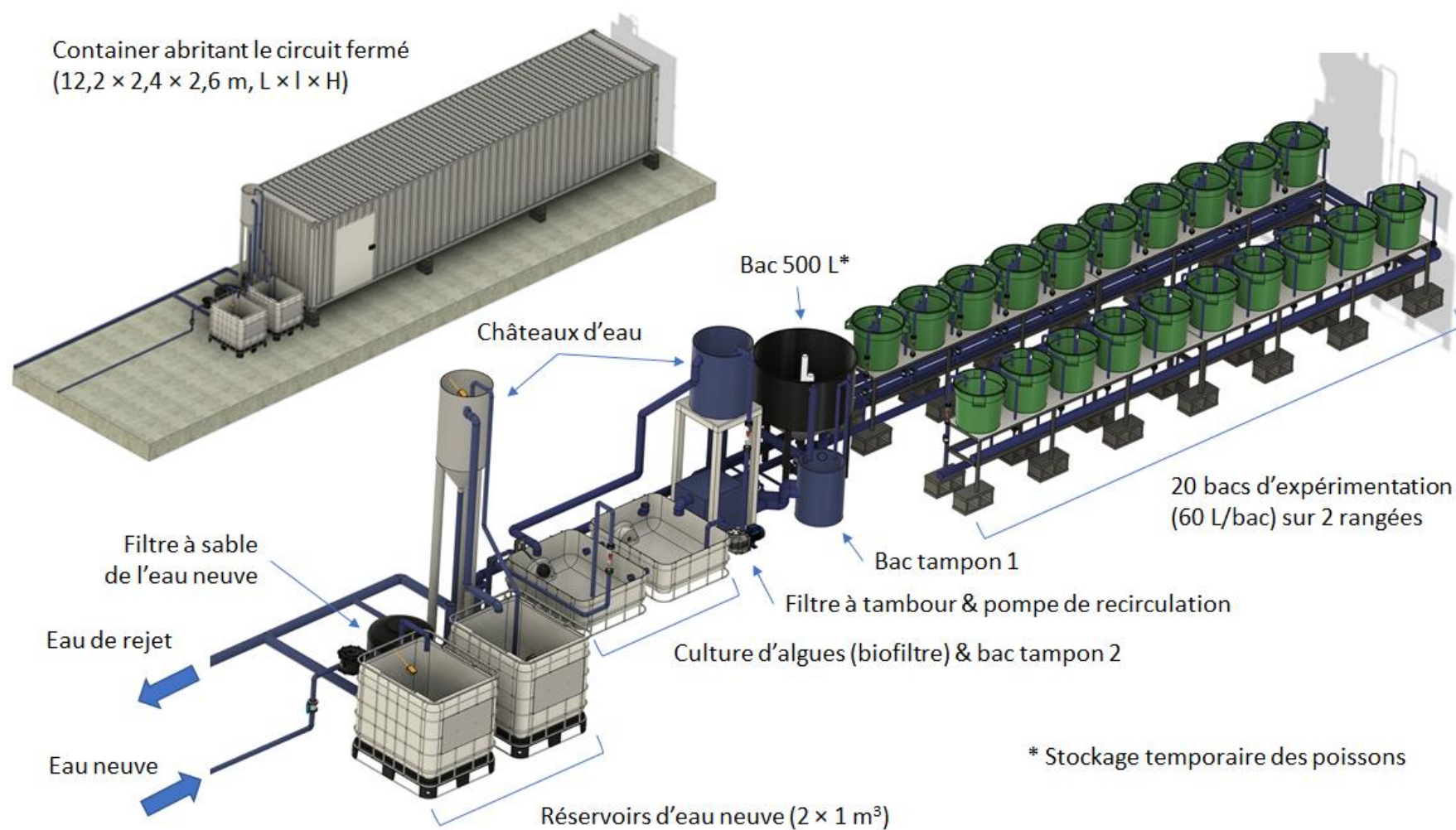


Figure 8 : Système d'élevage utilisé pour le test d'alimentation.



Tableau 6 : Opérations de maintenance du stock de poisson et d'entretien du circuit fermé.

Opération	Fréquence
Nourrissage des poissons	2 fois par jour 7 jours/7
Purge des fonds de bassins	1 fois/jour
Nettoyage à l'eau de javel du filtre à tambour	1 fois/semaine
Nettoyage des débitlitres	1 fois/semaine
Nettoyage des bacs extérieurs	1 fois / 2 semaines
Récolte des algues	Variable
Relevé des paramètres de qualité d'eau :	
Oxygène ^a	2 fois/jour dans chaque bac
pH ^b	2 fois/jour dans le circuit
Température ^a	2-4 fois/jour dans le circuit
CO ₂ ^c	Ponctuellement, 4 fois/jour dans le circuit
Sels nutritifs dissous ^d	3 prélèvements/jour dans le circuit ; prélèvements regroupés et analysés (1 échantillon analysé/jour)

^a Oxymètre Handy Polaris d'Oxyguard,

^a pH mètre Eutech,

^c CO₂ mètre Oxyguard,

^d Kits d'analyse d'eau adaptés au spectromètre DR1900 de HACH (Annexe Tableau 4).

2.5 Analyse des résultats

2.5.1 Paramètres zootechniques

Les résultats concernent la biométrie et la croissance des poissons, la consommation de l'aliment et l'efficacité alimentaire. Les indicateurs suivants ont été utilisés :

$$\text{Coefficient de condition} = 100 \times \frac{\text{Poids vif (g)}}{\text{Longueur à la fourche (cm)}^3}$$

TCS : Taux de Croissance Spécifique

$$\text{TCS (\%/jour)} = 100 \times \frac{(\ln(\text{Poids final}) - \ln(\text{Poids initial}))}{\text{Durée (jours)}}$$

$$\text{Croissance relative (\%)} = 100 \times \frac{(\text{Poids final} - \text{Poids initial})}{\text{Poids initial}}$$

$$\text{Gain Moyen Quotidien (g)} = 100 \times \frac{(\text{Poids final} - \text{Poids initial})}{\text{Durée (jours)}}$$

TAJ : Taux d'Alimentation Journalier (ou taux de rationnement)

$$TAJ (\%/jour) = 100 \times \frac{Qté\ aliment\ moyenne\ /jour}{Biomasse\ moyenne}$$

ICA : Indice de Conversion Alimentaire (ou indice de conversion)

$$ICA (g) = \frac{Quantité\ totale\ d'aliment\ consommé}{Gain\ de\ biomasse}$$

CEP : Coefficient d'Efficacité Protéique

$$CEP = \frac{Gain\ de\ biomasse}{Quantité\ totale\ de\ protéines\ consommées}$$

Ou encore :

$$CEP = 1/(ICA \times teneur\ en\ protéines\ de\ l'aliment)$$

Taux de rétention des protéines (TRP) :

$$TRP (\%) = 100 \times \frac{Qté\ protéines\ fixées}{Qté\ protéines\ consommées}$$

2.5.2 Composition des carcasses de poissons

Des poissons ont été analysés pour la composition de leur carcasse entière. Les analyses portaient sur les teneurs en eau, matière sèche, protéines totales (azote total x 6,25), lipides totaux et cendres totales.

Quatre échantillons de poissons ont été analysés avec 8 poissons par échantillon. Un échantillon correspond au début de la 1^{ère} phase d'élevage (*Liza ramada* avec certainement des poissons d'espèces indéterminées). Puis, en fin de 2^{ème} phase, il y a eu un échantillon de *Liza ramada* (identification certaine) par type d'aliment (2 poissons bar bac x 4 bacs = 8 poissons).

2.5.3 Analyse des données

Les données ont été traitées avec le logiciel SPSS version 23.

Les poissons ayant été marqués individuellement, les tests de comparaisons multiples des moyennes (Duncan et Bonferroni) appliqués aux mesures individuelles (poids, croissance) ont été réalisés en intégrant le répliquat comme facteur aléatoire (4 bacs ou répliquats par traitement). Le marquage a également permis d'effectuer les comparaisons 2 à 2 (test T) avec des mesures appariées sur les individus.

Les figures avec des barres présentent les valeurs moyennes $\pm$ 1 erreur standard.

3. Résultats

3.1 Préambule

Les résultats obtenus avec *Liza ramada* lors de la 2^{ème} phase du test sont les plus fiables de tous les résultats (deux phases et toutes espèces confondues) pour les raisons suivantes : (1) une seule espèce est stockée par bac, (2) 4 bacs sont utilisés par type d'aliment, (3) la température de l'eau est supérieure à celle de la 1^{ère} phase et (4) la consommation de l'aliment Biomar a été meilleure que lors de la 1^{ère} phase du fait du reconditionnement de ces granulés. Nous présentons cependant les autres résultats obtenus avec *Liza ramada* et les autres espèces durant les deux phases ; ces résultats fournissent de premières informations intéressantes sur ces autres espèces ; cela pourra aider à orienter de possibles futurs tests.

Les principaux résultats sont présentés dans le texte ; pour que le document ne soit pas trop long, seul le poids vif des poissons est considéré pour la croissance. Des tableaux de résultats détaillés sont présentés en annexe ; ceux-ci incluent notamment les mesures de longueur à la fourche des poissons et le coefficient de condition, ainsi que le coefficient de variation pour les mesures individuelles.

3.2 Résultats spécifiques pour *Liza ramada*

3.2.1 Résultats de *Liza ramada* durant la 2^{ème} phase

Les résultats obtenus avec les 2 aliments expérimentaux (0% et 20% algues) sont proches (Tableau 7). En revanche, la croissance des poissons est meilleure avec l'aliment Biomar qu'avec les 2 aliments expérimentaux, de 27% pour le taux de croissance spécifique (TCS). Cette meilleure croissance est associée à un taux de rationnement journalier (TAJ) supérieur de 33% pour l'aliment Biomar. En considérant les données moyennes des 12 bacs, il apparaît que la croissance des poissons est très liée au TAJ (Figure 10). Autrement dit, plus les poissons mangent et plus ils grandissent vite et, l'aliment Biomar étant le plus consommé, c'est lui qui permet la meilleure croissance. Par ailleurs, pour chaque type d'aliment, le TCS tend à diminuer avec le poids initial des poissons, ce qui est normal¹ ; cette tendance est assez claire avec l'aliment Biomar (Figure 11). La variabilité (ou variance) des résultats individuels de TCS est significativement expliquée par le poids initial (16,4%) et le type d'aliment (16,2%), avec une légère interaction entre le type d'aliment et le répliquat (7,2%). Par ailleurs, les lots de poissons deviennent un peu plus homogènes durant l'élevage comme l'indique la réduction sensible du coefficient de variation sur le poids des poissons (Annexe Tableau 5).

L'indice de conversion alimentaire (ICA) est assez proche entre les 3 types d'aliments. En revanche, le coefficient d'efficacité protéique (CEP) est significativement différent entre les 3 aliments : il est le meilleur avec le 0% algue, puis le 20% (-11%) et enfin l'aliment Biomar (-23,2%). Ces différences sont symétriques à des celles de l'ICA, ce qui est normal car le CEP est une fonction inverse de l'ICA, accentuées probablement par l'écart de la teneur en protéines entre les 3 types d'aliments.

¹ La croissance spécifique des poissons (en %/jour), comme pour tout animal, diminue avec son âge et donc sa taille ou son poids.

Tableau 7 : Principaux résultats obtenus avec *Liza ramada* durant la 2^{ème} phase du test (valeurs moyennes).

	Granulés expérimentaux		
Paramètre	0% algue	20% algue	Granulé Biomarin
Poids initial (g)	54,5	53,5	53,4
Poids final (g)	^{ooo} 79,4	^{ooo} 77,6	^{ooo} 86,0
Croissance relative (% poids initial)	^{*** b} 47,0	^{*** b} 47,4	^a 63,2
Gain moyen quotidien (g)	^{*** b} 0,67	^{*** b} 0,65	^a 0,86
Taux de croissance spécifique (%/jour)	^{*** b} 1,03	^{*** b} 1,03	^a 1,31
Taux d'alimentation journalier (%)	^{** b} 1,85	^{** b} 1,83	^a 2,46
Indice de conversion alimentaire	1,85	1,92	1,99
Coefficient d'efficacité protéique *	^{*** a} 1,81	^{** b} 1,61	^c 1,39

* Gain de poids des poissons par gramme de protéines consommées.

Différences significatives :

- Entre poids final et poids initial pour chaque type d'aliment : °°° (P < 0,001), test T,
- Entre les 3 types d'aliments, indiquées par des lettres différentes :
a, b, c (P < 0,05), test de Duncan,
- Entre les aliments 0% et 20% algues, d'une part, et l'aliment Biomar, d'autre part :
** (P < 0,01), *** (P < 0,001), test de Bonferroni.

Valeurs détaillées en Annexe Tableau 5.

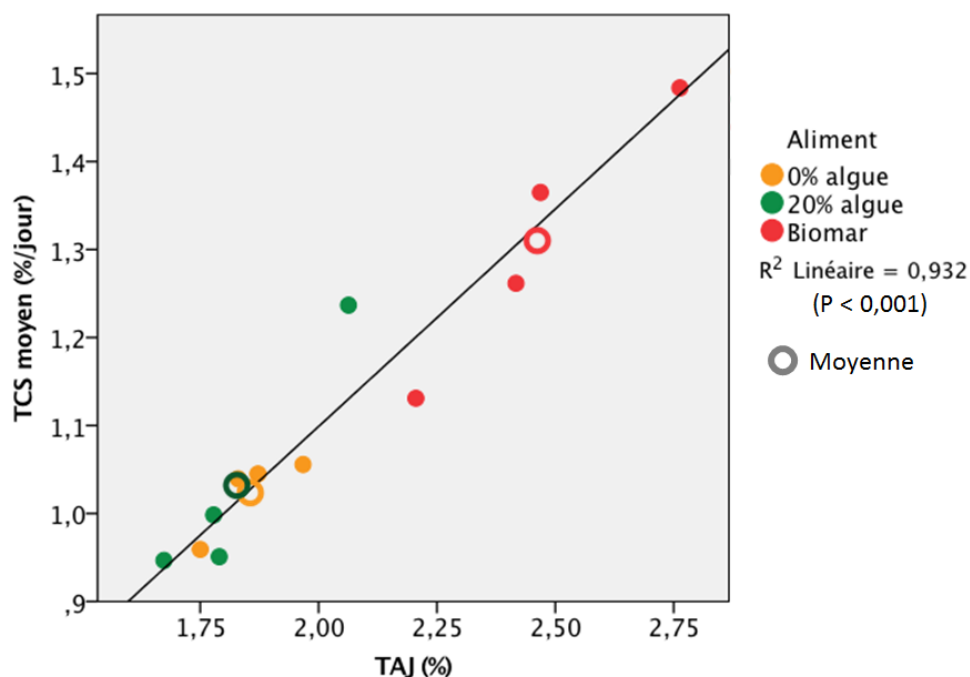


Figure 10 : Taux de croissance spécifique (TCS) en fonction du taux d'alimentation journalier (TAJ) pour *Liza ramada* durant la 2^{ème} phase.



En poids frais, les poissons en fin d'élevage ont gagné en protéines pour les 3 types d'aliments, le gain ayant été le plus fort pour l'aliment 20% algue (+17,7%) (Tableau 8). Les lipides ont également augmenté pour les aliments 0% algue et 20% algue (+ 6,7%) mais pas pour l'aliment Biomar (-7,1%). Enfin, la valeur énergétique des carcasses a augmenté pour l'aliment 0% algue (+6,8 %) et 20% algue (+7,5%) alors qu'elle a légèrement diminué pour l'aliment Biomar (-3%). Nous ne pouvons pas être catégorique sur ces différences entre les aliments car les résultats de composition n'ont pas été répliqués.

Tableau 8 : Composition des carcasses de *Liza ramada*.

26

3.2.3 Performances estimées de *Liza ramada* pour l'ensemble des 2 phases

Nous ne pouvons pas connaître très précisément les performances globales de *Liza ramada* sur l'ensemble des deux phases parce que (1) les poissons ont été changés de bacs entre les 2 phases, (2) il y avait des poissons d'espèces indéterminés avec les *L. ramada* durant la 1^{ère} phase et (3) parce que les carcasses de poissons n'ont pas été analysés entre les 2 phases mais seulement en début de 1^{ère} phase et en fin de 2^{ème} phase.

Néanmoins, nous proposons une estimation des performances globales de *Liza ramada* sur l'ensemble des 2 phases. Le principal intérêt de cette estimation concerne le taux de rétention des protéines. Cette estimation est assez crédible car elle se base sur les poids initiaux des poissons en début de 1^{ère} phase et sur les paramètres réellement obtenus pour chaque phase (croissance relative, ICA, teneurs en protéines des aliments et des poissons). Nous faisons l'hypothèse que les poissons issus de la 1^{ère} phase suivent la 2^{ème} phase (Annexe Tableau 10).

Ces résultats estimés indiquent une rétention des protéines similaire pour les aliments 0% et 20% algues de $\approx 30\%$ mais plus faible pour l'aliment Biomar (-6% soit -19,8% en base 100) (Tableau 9). Cela se traduit par une perte d'azote protéique plus importante avec l'aliment Biomar qu'avec l'aliment 0% algue (+40,1%) et 20% algue (+28,1%). La perte d'azote est sensiblement plus élevée avec 20% algues qu'avec 0% algue (+9,4%) ; cela est associé à la teneur un peu plus élevée en protéines de l'aliment 20% algue (32,4% vs 29,9%). Par ailleurs, on retrouve dans ces résultats globaux les tendances observées sur chacune des deux phases à savoir un ICA similaire entre les 3 types d'aliments et un TCS sensiblement meilleur avec l'aliment Biomar (+ 12,8% en base 100).

Tableau 9 : Performances moyennes estimées de *Liza ramada* pour l'ensemble des 2 phases.

Paramètre	0% algue	20% algue	Biomar
Rétention des protéines (%)	30,5	30,1	24,3
Coefficient d'efficacité protéique	1,69	1,55	1,31
Croissance relative (% poids initial)	129,8	125,4	153,5
Gain moyen quotidien (g)	0,49	0,47	0,58
Taux de croissance spécifique (%/jour)	1,07	1,04	1,19
Taux d'alimentation journalier (%)	2,00%	1,96%	2,31%
Indice de conversion alimentaire	1,98	1,99	2,07
Perte d'azote / kg produit (g)	65,8	72,0	92,2

3.3 Ensemble des résultats

L'analyse concerne ici la totalité des résultats obtenus pour les 2 phases du test et pour les 3 types de poissons, avec les réserves indiquées plus haut quant à l'interprétation (§ 3.1).

3.3.1 Croissance des poissons

Les commentaires qui suivent ne concernent que le taux de croissance spécifique (TCS) car ce paramètre est le plus pertinent ici. Cette croissance est en effet indépendante de la durée, elle est moins affectée par le poids initial des poissons que le gain moyen quotidien et, enfin, elle permet de rapprocher le résultat du taux d'alimentation journalier (TAJ) parce que ces deux paramètres sont exprimés en % de la biomasse.

La croissance de *Liza ramada* a légèrement diminué durant la 2^{ème} phase pour les aliments expérimentaux, de 14,1% et 11,2% pour l'aliment 0% et 20% algue, respectivement ($P < 0,05$), ça n'a pas été le cas pour l'aliment Biomar (Figure 12). Cela est lié, et peut-être dû, à la baisse du TAJ en 2^{ème} phase (explication § 3.2.1). En 2^{ème} phase et pour la durée totale du test, la croissance a été la meilleure avec l'aliment Biomar. L'optimisation des conditions d'élevage en 2^{ème} phase a donc bien profité aux poissons nourris avec l'aliment Biomar.

La croissance des poissons d'espèce indéterminée était nettement plus faible que celle des *Liza ramada*, de 2,6 fois en moyenne sur l'ensemble des résultats. Les poissons indéterminés étaient initialement plus petits que les *L. ramada*, mais cela ne semble pas jouer dans la comparaison de la croissance car, pour les 2 types de poissons, la croissance ralentit avec l'augmentation du poids initial (Annexe Figure 6). La croissance des poissons indéterminés a sensiblement augmenté en 2^{ème} phase et de manière très significative avec l'aliment Biomar ($\times 3,2$) ; comme pour *L. ramada*, c'est avec cet aliment que la croissance est la meilleure pour la 2^{ème} phase et la durée totale du test.

Avec l'aliment 20% algue, parmi les 4 types de poissons observés, les *L. ramada* ont eu la meilleure croissance en 1^{ère} phase. Leur croissance a été ensuite comparable à celle des petits *Mugil cephalus* en 2^{ème} phase ainsi que pour la durée totale du test. La croissance des petits *M. cephalus* s'est nettement améliorée en 2^{ème} phase (+69,5%, $P < 0,01$). La croissance des gros *M. cephalus* est assez faible et similaire à celle des poissons indéterminés pour les 2 phases, elle a même diminué en 2^{ème} phase (-14,3%, $P < 0,01$). Enfin, la relation entre le TCS et le poids initial des *M. cephalus* petits et gros n'est pas évidente (Annexe Figure 6).

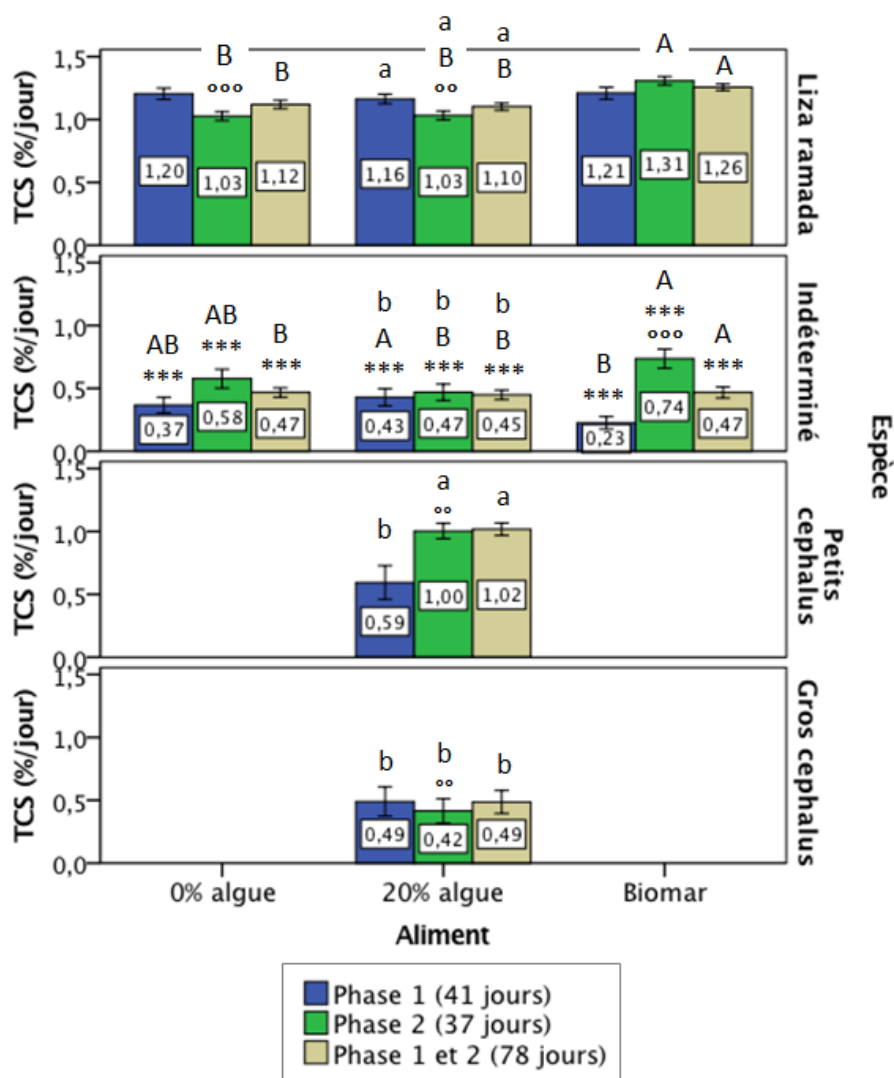


Figure 12 : Taux de croissance spécifique par type de poisson, type d'aliment et phase.

Note : Différences significatives :

- Entre les 2 phases pour chaque type d'aliment : °° ($P < 0,01$), °°° ($P < 0,001$), test T,
- Entre les 3 types d'aliments, par espèce et par phase, indiquées par des lettres différentes : A, B ($P < 0,05$), test de Duncan.
- Entre les 4 types de poissons avec l'aliment 20% algue, par phase, indiquées par des lettres différentes : a, b ($P < 0,05$), test de Duncan,
- Entre *Liza ramada* et les poissons indéterminés, par type d'aliment et par phase : *** ($P < 0,001$), test T.

Valeurs détaillées en Annexe Tableau 6 à Annexe Tableau 9.

3.3.2 Efficacité alimentaire

Pour *L. ramada*, l'indice de conversion alimentaire (ICA) a sensiblement baissé en 2^{ème} phase et de manière significative pour l'aliment 0% algue (-14%) (Figure 13). L'ICA des poissons indéterminés tend à être nettement plus élevé que celui des *L. ramada* pour les 3 types d'aliment. L'ICA a bien baissé entre la 1^{ère} à la 2^{ème} phase avec les *M. cephalus*, petits et gros, mais il reste supérieur à celui des *L. ramada* en 2^{ème} phase. L'absence de répliquat avec les

poissons indéterminés et les *M. cephalus* ne permet pas d'être catégorique mais les tendances observées semblent pertinentes.

Avec les *L. ramada* nourris avec les aliments 0% et 20% algues, la légère baisse de l'ICA en 2^{ème} phase malgré la légère baisse de la croissance est lié à la baisse également du taux de rationnement journalier (TAJ), de 23,2% et 17,9% pour celui-ci, respectivement (Figure 14). Le TAJ avec l'aliment Biomar est quant à lui resté stable en 2^{ème} phase.

En 2^{ème} phase, le TAJ des poissons indéterminés était modéré mais pas suffisamment pour compenser leur faible croissance, ce qui explique les ICA élevés de ces poissons.

Le TAJ des *M. cephalus* a diminué en 2^{ème} phase ce qui, combiné au maintien de leur croissance, a permis de réduire leur ICA.

Enfin, les résultats du coefficient d'efficacité protéique (CEP) sont dans l'ensemble assez symétriques à ceux de l'ICA, ce qui est normal car le CEP est une fonction inverse de l'ICA (Figure 15). Cependant, pour *Liza ramada*, les différences de CEP entre les types d'aliments et les phases sont bien plus tranchées qu'avec l'ICA. Ainsi, en 2^{ème} phase, le CEP avec l'aliment 0% algue est meilleur qu'avec l'aliment 20% algue (+12,4%) et l'aliment Biomar (+30,2%). Et le CEP est significativement augmenté en 2^{ème} phase pour l'aliment 0% algue (+16%) et l'aliment Biomar (+15,8%).

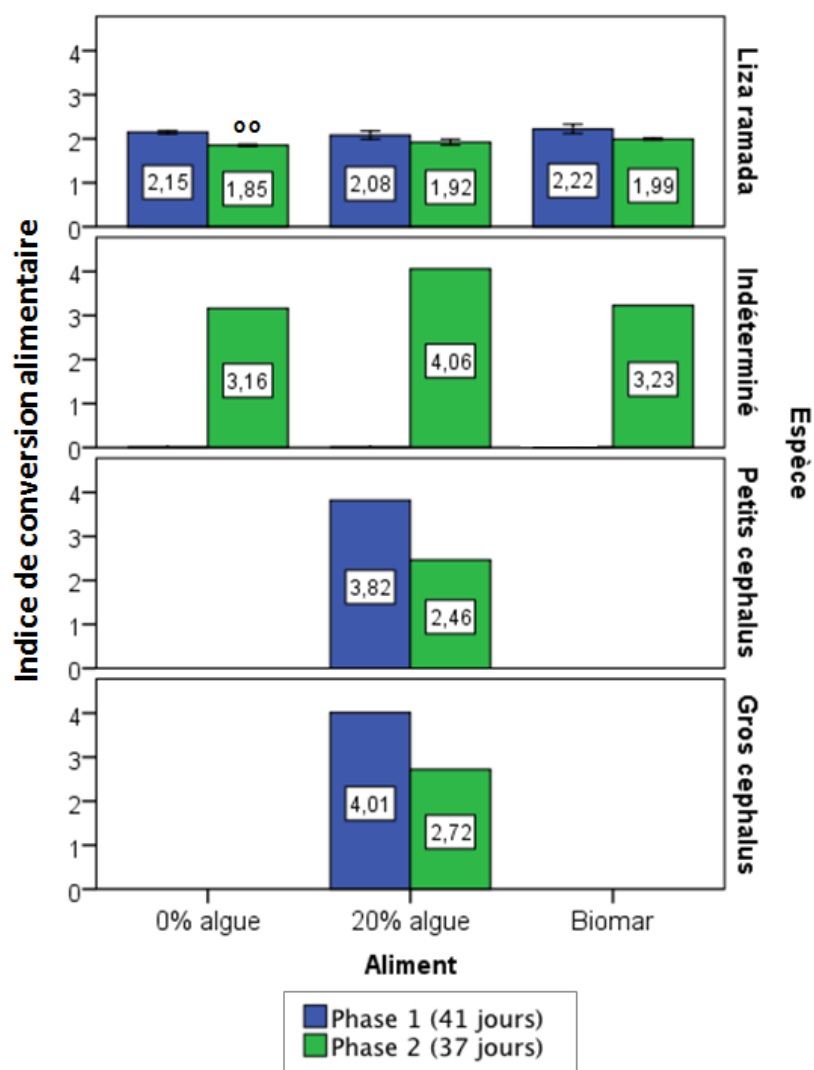


Figure 13 : Indice de conversion alimentaire par type de poisson, type d'aliment et phase.

Différence significative entre les 2 phases par type d'aliment : °° ($P < 0,01$), test T.

Valeurs détaillées en Annexe Tableau 6 à Annexe Tableau 9.

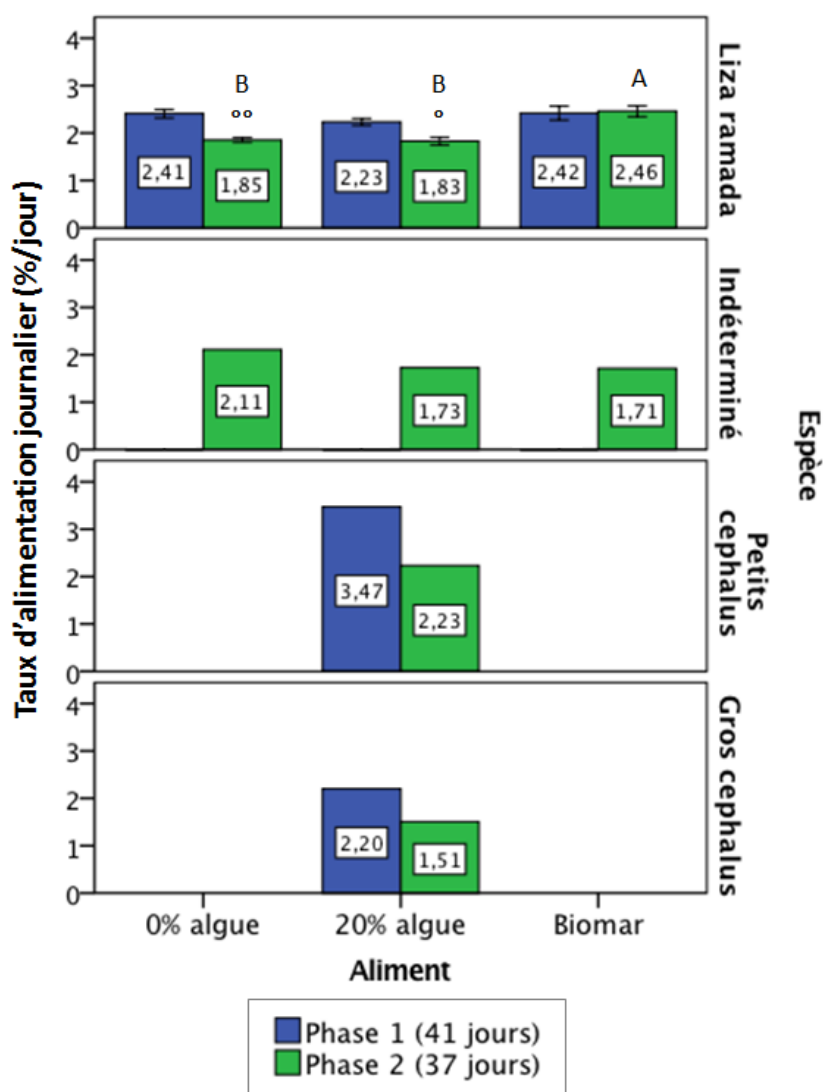


Figure 14 : Taux d'alimentation journalier par type de poisson, type d'aliment et phase.

Note : Différences significatives pour *Liza ramada* :

- Entre les 2 phases pour chaque type d'aliment : ° ($P < 0,05$), °° ($P < 0,01$), test T,
- Entre les 3 types d'aliments, par phase, indiquées par des lettres différentes : A, B ($P < 0,05$), test de Duncan.

Valeurs détaillées en Annexe Tableau 6 à Annexe Tableau 9.

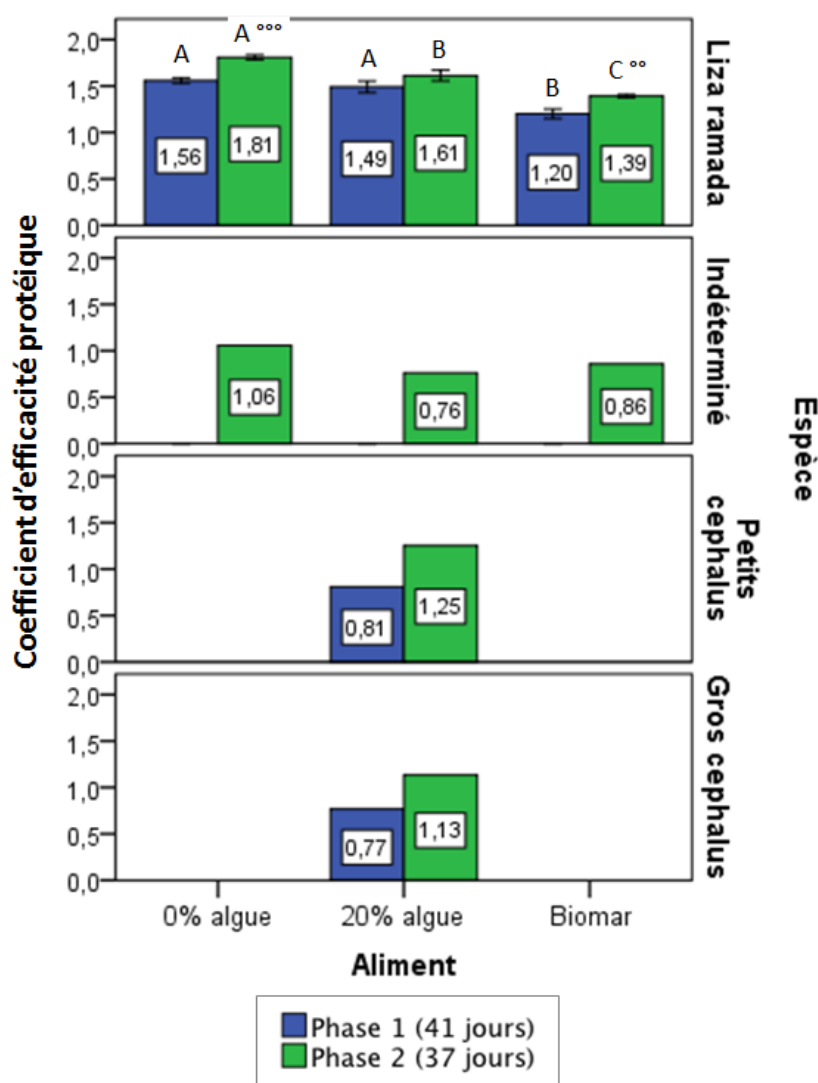


Figure 15 : Coefficient d'efficacité protéique par type de poisson, type d'aliment et phase.

Note : Différences significatives pour *Liza ramada* :

- Entre les 2 phases pour chaque type d'aliment : °° (P < 0,01), °°° (P < 0,001), test T,
- Entre les 3 types d'aliments, par phase, indiquées par des lettres différentes : A, B (P < 0,05), test de Duncan.

Valeurs détaillées en Annexe Tableau 6 à Annexe Tableau 9.

3.4 Propreté des bacs

Les bacs des muges étaient propres : rien ne restait au fond des bacs, ni aliment ni fèces. Outre la densité de poissons assez élevée de même que le taux de recirculation d'eau, et l'effet « autonettoyant » associé, les muges semblent nettoyer leur bac en consommant les particules qui s'y déposent ainsi qu'en « léchant » les parois. Ainsi, les parois des bacs sont restées relativement propres après plusieurs semaines ; ce n'était pas du tout le cas avec des daurades lors d'un précédent test d'alimentation. La propreté est même exceptionnelle avec l'espèce *Mugil cephalus* par rapport à *Liza ramada* ; avec *M. cephalus*, les parois sont comme neuves, il n'y a pas de film gluant dessus.

3.5 Qualité de l'eau

La qualité d'eau a été correcte ; les valeurs moyennes étaient bonnes pour les différents paramètres notamment N-NH₃ (< 1,0 mg/L), O₂ (> 80% saturation), pH (> 7,0) et CO₂ (< 10 mg/L) (Tableau 10). La qualité d'eau a été rarement et légèrement dégradée pour N-NH₃ (1,76 mg/L max.) et O₂ (59% saturation min.), mais cela a été ponctuel et les muges le supportent très bien. L'apport d'eau neuve était en moyenne de $\approx$ 3%/h. Nous avons modulé ce débit en fonction principalement de la température, pour la maintenir élevée en essayant cependant de ne pas dépasser 30°C. La température de l'eau neuve étant assez froide (6-12°C la plupart du temps), nous limitons donc son apport ; nous l'augmentons si besoin notamment vis-à-vis de NH₃ et du pH.

En 2^{ème} phase, l'amélioration de la culture d'algue a permis à la fois de réduire l'apport d'eau neuve et ainsi de gagner en température (+3,6°C en moyenne). Par ailleurs, la teneur en NH₃ était 3 fois plus basse du fait de la bonne bioremédiation algale.

En fin de 2^{ème} phase, la biomasse totale dans le circuit fermé était de 19,7 kg, soit $\approx$ 7,5 kg/m³ du volume total du circuit (2620 L). La quantité totale d'aliment distribuée était alors de 400 g/jour. La plus forte densité a été atteinte dans un bac de *Liza ramada*, équivalente à 27,2 kg/m³ (1,66 kg dans un bac de 60 L). En moyenne, les densités finales étaient de 23,4 kg/m³ pour les *L. ramada*, 6,7 kg/m³ pour les muges d'espèces indéterminées et de 15,1 et 13,3 kg/m³ pour les petits et les gros *Mugil cephalus*, respectivement. Ces densités sont modérées en comparaison d'un circuit fermé de production en prégrossissement de daurade qui peut atteindre 60 kg/m³.

Tableau 10 : Qualité de l'eau durant le test d'alimentation (valeurs moyennes).

Paramètre	Phase 1	Phase 2	Phases 1 et 2
Température (°C)	23,0	°° 26,6	24,6
pH	7,45	7,50	7,47
O ₂ (% saturation)	131	°° 135	133
CO ₂ (mg/L)	-	2,42	-
N-(NH ₃ + NH ₄) (mg/L)	0,66	°°° 0,21	0,44
N-NO ₂ (mg/L)	0,23	0,17	0,20
N-NO ₃ (mg/L)	1,00	°° 1,66	1,33
N totale (mg/L)	1,91	2,03	1,97
P-PO ₄ (mg/L)	0,67	0,81	0,74

Différences significatives entre les 2 phases : °° (P < 0,01), °°° (P < 0,001), test T.

Valeurs détaillées en Annexe Tableau 11.

4. Discussion

4.1 Les 2 phases du test

La modification des conditions d'élevage en 2^{ème} phase a été bénéfique. Outre le fait de clarifier les résultats pour *Liza ramada* par rapport à la 1^{ère} phase, le fait d'élever à part les muges d'espèces indéterminées a montré que ceux-ci sont nettement moins performants tant

au niveau de la croissance que de l'efficacité alimentaire. Ces poissons indéterminés, *Liza aurata* et/ou *L. saliens*, ont donc un potentiel aquacole qui paraît nettement moins intéressant que celui de *L. ramada*.

Pour les *L. ramada* spécifiquement, la 2^{ème} phase a été bénéfique surtout avec l'aliment Biomar : le maintien du taux de nourrissage a permis un léger gain de croissance. En revanche, pour les 2 aliments expérimentaux (0% et 20% algues), le taux de nourrissage a diminué ce qui a réduit la croissance, mais tout ceci assez faiblement. L'augmentation de la température en 2^{ème} phase ne semble donc pas avoir eu un effet bénéfique tangible avec les deux aliments expérimentaux sur la croissance *L. ramada*. Le maintien du taux de nourrissage avec l'aliment Biomar est certainement lié au reconditionnement des granulés : leur taille plus petite semblait bien convenir aux poissons. Par ailleurs, la 2^{ème} phase a été bénéfique pour l'efficacité protéique des 3 aliments, ce qui est lié à la légère baisse de l'ICA durant cette phase. Enfin, au terme des 2 phases d'élevage, l'embonpoint et l'engraissement modérés des *L. ramada* suggèrent que ces poissons d'environ 80 g ont encore un bon potentiel de croissance.

Quant aux *Mugil cephalus*, l'efficacité alimentaire a été bien meilleure en 2^{ème} phase pour les petits et les gros poissons. Peut-être ont-ils eu besoin de temps pour s'adapter aux conditions d'élevage, à moins que la température plus élevée en 2^{ème} phase leur ait été bénéfique. La croissance des petits *M. cephalus* a également été bien plus rapide en 2^{ème} phase. La croissance des gros *M. cephalus* a été plus lente en 1^{ère} et 2^{ème} phase que celle des petits poissons ; cela est normal pour la croissance spécifique car celle-ci diminue naturellement avec l'âge des poissons ; la croissance exprimée en gain moyen quotidien (g/poisson/jour) est bien meilleure ; il est aussi possible que les bacs aient été un peu petit pour les grands *M. cephalus*. En 2^{ème} phase, l'ICA des *M. cephalus*, bien qu'ayant diminué, reste plus élevé que celui des *L. ramada* ; néanmoins, le résultat obtenu sur un seul bac de petits *M. cephalus* ne permet pas d'être catégorique sur le potentiel aquacole relatif des *M. cephalus*.

4.2 Taux de nourrissage et croissance

L'indice de conversion alimentaire (ICA) est à peu près le même pour les 3 types d'aliment. En revanche, la croissance étant ici très liée au taux de nourrissage, et l'aliment Biomar étant le plus consommé, celui-ci est associé à la meilleure croissance, d'environ un tiers de plus pour ces deux paramètres par rapports aux aliments 0% et 20% algues. L'écart de consommation peut être lié à l'appétence ; l'aliment Biomar contient certainement plus de produits animaux que nos granulés expérimentaux (4,8% farine de poissons seulement) qui sont très appétants. Une autre raison pourrait être la digestibilité possiblement meilleure de l'aliment Biomar ; la digestion pourrait donc être meilleure et les poissons consommeraient davantage notamment lors du 2^{ème} repas de la journée, ce qui reste à démontrer.

L'incorporation de 20% de farine d'algue dans le granulé en remplacement de la même quantité de tourteau de soja ne modifie pas les performances des poissons. La croissance est exactement la même et les différences de taux de nourrissage et d'ICA sont minimales et pas significatives. La substitution soja – algue est donc potentiellement intéressante.

4.3 Intérêt de la farine d'algue

4.3.1 Efficacité protéique

Avec *Liza ramada* en 2^{ème} phase d'élevage, la légère diminution de l'efficacité protéiques (-11%) associée à l'aliment 20% algue par rapport à l'aliment 0% algue suggère que le mélange

farine d'algue et gluten de blé serait moins nutritif que le tourteau de soja. Néanmoins, il se pourrait que l'apport en protéines avec l'aliment 20% algue soit un peu plus élevé que nécessaire. Cet aliment est en effet un peu plus protéiné que le 0% algues (+2,2% matière sèche, MT). Cette hypothèse est renforcée par le fait que l'efficacité protéique de l'aliment Biomar est encore plus basse (-23,2%) et que ce résultat est associé une teneur en protéines de l'aliment encore plus élevée (+7,1% MS). Avec cette hypothèse, la teneur en protéines de 33% MS de l'aliment 0% algue serait suffisante ; au-delà de cette teneur, les protéines apportées en excès seraient dégradées.

La rétention des protéines est d'environ 30% pour les aliments 0% et 20% algues pour lesquels le rejet d'azote serait de 65,8 g et 72 g par kg de poissons produits (g/kg), respectivement. Il s'agit d'une estimation sur l'ensemble des 2 phases, il convient donc d'être prudent. Ces rejets seraient bien plus élevés que celui rapporté pour le tilapia nourri avec un aliment industriel, de 45 g/kg au maximum (Figure 1). Cet aliment industriel Biomar pour tilapia (35% protéines annoncé) est proche du nôtre testé ici (37% protéines annoncé). Cependant, la rétention des protéines avec le granulé industriel testé ici est estimée à 92,2 g/kg. Ce rejet important, corolaire d'une modeste rétention des protéines (24,3%), renforce l'hypothèse d'un apport en protéines excessif dans nos aliments testés. L'apport dépasserait la capacité de fixation des protéines par *Liza ramada*. La plus basse teneur en protéines de 33% testée ici (aliment 0% algue) est peut-être déjà excessive.

Dans les aliments pour poissons omnivores, la teneur en protéines de 30-35% est couramment employée pour le grossissement du tilapia (élevages en cages en Thaïlande par exemple). En revanche, pour d'autres espèces, la teneur est souvent plus faible notamment pour le panga au Vietnam (20-25%) et les carpes en Asie du Sud-Est (15-20%). Il est possible que le muge *L. ramada* se contente lui aussi d'un régime frugal en protéines.

4.3.2 Farine d'algue et gluten de blé

Du fait que la farine d'algue utilisée est moins riche en protéines que le tourteau de soja, pour garder la même composition proximale du granulé 20% algue, la substitution s'accompagne d'une modification des proportions de deux autres sources de protéines (↑gluten de blé et ↓farine de lupin). Ainsi, la moitié du tourteau de soja est remplacé par la farine d'algue mais seulement 33,4% des protéines de soja sont remplacées par des protéines d'algues, compensé par 17% de protéines de gluten de blé supplémentaires. Les résultats obtenus sont donc issus de la combinaison de la farine d'algue et du gluten de blé.

Cette combinaison peut sembler meilleure que le tourteau de soja seul au niveau de la « durabilité » de la production au regard du cycle de vie des produits. La farine d'algue semble assez « durable » car elle est issue d'une culture qui recycle les protéines « perdues » par un élevage de poissons. Le gluten de blé peut être quant à lui issu d'une production durable et locale (France ou Europe), alors que le tourteau de soja soulève des questions relatives à son mode de culture et son importation. Il reste à toutefois à déterminer l'impact du processus de la fabrication du gluten de blé.

4.4 Prix des aliments

Pour les matières premières, le prix des granulés tels que nous les avons fabriqués était de 1,93 €/kg pour l'aliment 0% algue (Annexe Tableau 12)¹. Le prix de l'aliment 20% algue était de 2,03 €/kg, auquel il faut ajouter le prix de la farine d'algue. Une estimation est proposée en considérant les prix de gros (qui sont à confirmer)² : le prix des granulés est de 0,59 €/kg pour l'aliment 0% algue et de 0,60 €/kg (+ farine d'algue) pour l'aliment 20% algues (Tableau 11). A titre de comparaison, le granulé Biomar utilisé a été acheté à 1,30 €/kg (incluant les matières premières et les autres coûts de fabrication).

Tableau 11 : Estimation du prix des matières premières des aliments (prix de gros).

Matière première	Composition (%) ^a		Prix/kg (€) ^b	Prix/100 kg granulé (€)	
	0% farine algue	20% farine algue		0% farine algue	20% farine algue
Farine d'algue	-	20,15	?	-	?
Tourteau de soja	40,24	20,19	0,31	12,47	6,26
Farine de maïs	15,18	14,58	0,15	2,28	2,19
Farine de pain	12,60	10,98	0,38	4,79	4,17
Farine de poisson	4,80	4,82	1,23	5,90	5,93
Gluten de blé	1,20	8,20	1,47	1,76	12,03
Huile de poisson	1,64	1,64	1,80	2,95	2,95
Levure de bière	1,96	1,97	1,05	2,06	2,07
Farine de lupin	16,57	11,15	0,41	6,71	4,52
Huile de soja	3,00	3,50	0,71	2,13	2,49
Prémix	1,85	1,86	6,60	12,21	12,24
CaPO ₄	0,96	0,97	5,57	5,34	5,37
			Total	58,60	60,21 + farine algue

^a En % de matière totale (humidité incluse),

^b Prix de gros d'après plusieurs sources ; ils méritent d'être confirmés.

Au prix des matières premières, il faut ajouter celui de la confection des granulés en incluant la main d'œuvre et l'amortissement du matériel. Pour information, le petit extrudeur qui a été utilisé au CIRAD (30-40 kg/h) coûte ≈ 3000 €. La confection telle que nous l'avons réalisée, nécessitait le travail d'une personne pendant 2 jours pour environ 20 kg d'aliment, incluant le broyage de certains ingrédients, les mélanges, l'extrusion, le séchage et le tamisage des granulés et la maintenance du matériel. La confection à plus grande échelle serait évidemment différente.

Le prix de la farine d'algue reste à déterminer. Actuellement, la farine d'algue utilisée, à savoir l'ulve *Ulva rigida* cultivée en lagune à la FMD, est vendue à environ 13 €/kg. Elle est destinée à l'industrie cosmétique (extraction des ulvanes) et à l'alimentation humaine (algue fraîche).

¹ Matières premières achetées auprès de www.rouletesbouillettes.com (destiné aux appâts de pêche), à l'exception du prémix (Aquatechna) et de l'huile de soja.

² Le devis d'un fournisseur de matière première est attendu.

Ce prix est évidemment inabordable pour l'alimentation des poissons. Nous pouvons néanmoins penser qu'il pourrait diminuer si la production d'algues se développe beaucoup.

Cependant, sans compter le prix de la farine d'algue, le prix du granulé 20% algue est déjà quasiment au même prix que celui du granulé 0% algue. Ceci vient de la teneur plus élevée en gluten de blé dans l'aliment 20% algue et du fait que cette matière première est plus cher que le tourteau de soja ; au prix de gros, le prix de la protéine est de 1,84 €/kg et 0,68 €/kg, respectivement. En pratique, la réduction de 20% du tourteau de soja s'accompagne d'une réduction par kilo d'aliment de 0,63 €/kg du tourteau de soja mais aussi d'une augmentation de 0,81 €/kg du total gluten de blé et farine de lupin.

Dans les conditions testées, l'intérêt économique de la substitution du tourteau de soja par la farine d'algue comme source de protéines est donc incertain. Tout comme la substitution du maïs par le pain rassis comme source d'amidon : le prix de l'amidon est en effet de 0,23 €/kg et 0,65 €/kg, respectivement.

4.5 Evolution par rapport au précédent test d'alimentation

4.5.1 Structures expérimentales

Le présent test d'alimentation est assez similaire au précédent réalisé dans le cadre du « projet muges » (Cacot 2019). Ce dernier avait été effectué en 2017 au Lycée de la Mer à Sète et il concernait la substitution de la farine de maïs par la farine de pain rassis (Tableau 12).

Les mêmes bacs de 60 L ont été utilisés et placés dans un circuit fermé dans les deux cas. L'agencement de ce circuit a cependant évolué. En 2017, 16 bacs étaient placés au « bain marie » dans 2 grands bacs ; cela a ainsi évité la construction d'une structure de support et du réseau d'évacuation d'eau. En 2019, 20 bacs étaient placés de manière conventionnelle sur un support et avec un réseau d'eau spécifique. Cette nouvelle structure est plus pratique, avec notamment un accès facilité à chaque bac.

La filtration physique était assurée par un filtre à sable en 2017 et par un filtre à tambour en 2019. Ce dernier est plus pratique car il se nettoie de manière autonome alors que le filtre à sable requerrait une intervention pour chaque « backwash ».

En 2017, la filtration biologique (conversion NH_3 en NO_3) était assurée d'abord par un lit bactérien dans une cuve remplie de gravier, puis nous avons substitué progressivement ce filtre par une culture d'algues (absorption du NH_3 et du CO_2). En 2019, la culture d'algue a été utilisée directement comme unique biofiltre car nous étions sûrs de son bon fonctionnement testé au préalable. La culture d'algues en 2017 était faite avec l'ulve *Ulva rigida* placée dans un bassin de 4 m² et éclairée par 4 lampes HPS (600 w/m²).

Outre la structure expérimentale, le fait d'avoir installé celle-ci chez LPDS a apporté des avantages logistiques car le dispositif était installé sur un site de production opérationnel en permanence. En particulier, la disponibilité d'O₂ gazeux qui, diffusé en permanence dans les bacs a permis de maintenir une oxygénation pratiquement 2 fois meilleure que lors du 1^{er} test. Enfin, l'accès au site était permanent chez LPDS ce qui a facilité l'organisation du travail au niveau des horaires quotidiens et des astreintes les week-ends.

Tableau 12 : Principales caractéristiques des deux tests d'alimentation réalisés avec *Liza ramada* en prégrossissement.

	1 ^{er} test : farine de pain (2017)	2 ^{ème} test : farine d'algue (2019)
Objectif	Substitution de la farine de maïs comme source d'amidon	Substitution du tourteau de soja comme source de protéines
Aliments expérimentaux	0-33-67-100% de substitution	0-20% de substitution
Nombre d'ingrédients	6 ou 7	11 ou 12
Aliment industriel	Le Gouessant pour tilapia, 32% protéines 8% lipides MT	Biomar pour tilapia, 37% protéines 9% lipides MT
Protéines / lipides moy.		
Aliments expé. (% MS)	31,8 / 6,6	34,3 / 10,5
Aliment indus. (% MS)	34,4 / 8,6	40,2 / 10
Durée (jours)	23	37
Température (°C)	27,2	26,6
Oxygène dissous (%)*	77	135
Nb Répliquats	3	4
Nb poissons par bac	35	17
Marquage des poissons	Non	Oui
Poids moyen initial (g)	42,2	53,8
Résultats moyens :		
Aliment industriel		
TCS (%/jour)	1,21	1,31
ICA	1,91	1,99
TAJ (%/jour)	2,26	2,46
CEP	1,64	1,39
Aliments expérimentaux		
0% substitution		
TCS (%/jour)	1,13	1,03
ICA	2,62	1,85
TAJ (%/jour)	2,93	1,85
CEP	1,13	1,81
Substitution max		
TCS (%/jour)	0,94	1,03
ICA	3,04	1,92
TAJ (%/jour)	2,82	1,83
CEP	0,93	1,61

MT : matière totale (humidité incluse),

MS : matière sèche,

* en % de saturation.

4.5.2 Protocoles

Le nombre de poissons était assez limité lors du 2^{ème} test et de ce fait nous n'avons pu tester que 2 niveaux d'incorporation de la farine d'algue. Les poissons étaient plus nombreux lors du 1^{er} test (et nous utilisons aussi moins de bacs par type d'aliment) et nous avons donc pu tester 4 niveaux d'incorporation de la farine de pain rassis. En revanche, lors du 2^{ème} test, les poissons ont été marqués individuellement, ce qui a permis d'obtenir des résultats bien plus précis sur la croissance (relation avec le poids initial par exemple).

Les aliments du 2^{ème} test étaient plus riches au niveau protéines (+5,8% matière sèche) et lipides (+1,4%). Cela était lié à la composition de l'aliment de référence utilisé, plus riche lors que lors du 1^{er} test ; le précédent aliment industriel était indisponible. Par ailleurs, 2 fois plus de types de matières premières différentes ont été utilisées lors du 2^{ème} test pour la préparation des granulés. Nous nous sommes inspirés de formules industrielles qui panachent les sources de protéines végétales en particulier, ici 3 sources en plus du tourteau de soja pour le 2^{ème} test contre le seul tourteau de soja pour le 1^{er} test.

Enfin, l'extrusion des granulés a été mieux faite lors du 2^{ème} test grâce à un changement apporté à la machine (nouvelle vis d'extrusion et filière de sortie) : les matières premières ont été vraisemblablement mieux cuites et les granulés étaient plus cohésifs.

4.5.3 Résultats

Les résultats obtenus sont assez proches entre les 2 tests avec l'aliment industriel. Le 2^{ème} test est légèrement meilleur au niveau du taux de croissance spécifique (TCS, +8,2%) mais il est légèrement moins bon que le 1^{er} test pour l'indice de conversion alimentaire (ICA, -4%) et surtout pour le coefficient d'efficacité protéique (CEP, -15,2%). L'aliment industriel plus riche du 2^{ème} test n'a donc pas eu un effet franchement bénéfique. Cette observation renforce l'hypothèse que la teneur en protéine de 40% est trop élevée pour *Liza ramada* (aux tailles de poissons utilisés) ; la teneur optimale pourrait donc être proche de 30%.

Au niveau des aliments expérimentaux testés, les TCS sont proches entre les deux tests. En revanche, l'ICA a été nettement amélioré lors du 2^{ème} test tant pour l'aliment 0% substitution (-29,4%) que pour l'aliment de substitution maximale (-36,8%). Les ICA obtenus lors du 2^{ème} test sont inférieurs à 2,0 et ils sont donc satisfaisants ; il s'agit là de notre principale progression au niveau des résultats du 1^{er} au 2^{ème} test.

4.6 Perspectives

4.6.1 Optimiser le prix de l'aliment

Une formulation différente de l'aliment avec la farine d'algue permettrait de réduire le prix de cet aliment. Il suffirait d'enlever la farine de pain (-12,6%) ; le gluten de blé serait bas (1,2%) et le prix de l'aliment serait de 0,49 €/kg contre 0,60 €/kg avec la farine de pain ; il faudrait toujours y ajouter le prix de farine d'algue (Tableau 13). La proportion de celle-ci serait plus importante (28% au lieu de 20%). La proportion de farine de maïs serait inchangée et à peu de chose près celle des autres ingrédients également. La composition proximale de cet aliment serait la même que celle avec la farine de pain, au niveau des protéines et des lipides, mais un peu plus basse au niveau des extraits non azotés.

Tableau 13 : Estimation du prix des matières premières pour un aliment avec la farine d'algue et sans farine de pain rassis (prix de gros).

Matière première	Composition (%) ^a	Prix/kg (€) ^b	Prix/100 kg granulé (€)
Farine d'algue	28,00	?	?
Tourteau de soja	24,69	0,31	7,65
Farine de maïs	15,18	0,15	2,28
Farine de pain	-	0,38	-
Farine de poisson	4,80	1,23	5,90
Gluten de blé	1,20	1,47	1,76
Huile de poisson	1,64	1,80	2,95
Levure de bière	1,96	1,05	2,06
Farine de lupin	16,57	0,41	6,71
Huile de soja	3,15	0,71	2,24
Prémix	1,85	6,60	12,21
CaPO ₄	0,96	5,57	5,34
		Total	49,10 + farine algue

^a En % de matière totale (humidité incluse),

^b Prix de gros d'après plusieurs sources ; ils méritent d'être confirmés.

Outre le prix économique des aliments, il faudrait également évaluer leur « prix environnemental ». Ne serait-il en effet pas plus « durable » d'utiliser les ingrédients issus du recyclage d'un déchet alimentaire (pain rassis) ou du recyclage des protéines (farine d'algue) que les matières premières « neuves » (maïs et tourteau de soja).

4.6.2 Tester une autre farine d'algue

Il serait intéressant de tester la farine de l'algue issue de la culture intégrée dans le circuit fermé. Cette algue est en effet plus riche en protéines que l'algue utilisée dans la présente étude, avec 50% et 32,4%, respectivement (% matière sèche). Cette teneur de l'algue riche en protéines est équivalente à celle du tourteau de soja et, dans ce cas, la substitution pourrait être complète (40% des ingrédients ici) sans qu'il soit nécessaire de modifier (ou de façon mineure) la proportion des autres ingrédients. Cette farine d'algue riche en protéines a été produite et utilisée lors d'un précédent test avec de substitution du tourteau de soja réalisé avec la daurade ; les résultats étaient satisfaisants¹.

Une autre option pour disposer d'une farine d'algue à teneur en protéines plus élevée serait d'appliquer un process de fermentation à l'algue. Cela a été réalisé sur une farine d'ulve (*Ulva lactuca*) en présence de levures (*Lactobacillus* sp. et *Saccharomyces cerevisiae*) (Felix & Brindo 2014). Dans cet exemple, la fermentation induit une augmentation importante de la teneur en protéines ainsi qu'en glucides et donc en énergie ; la teneur en fibre chute, ce qui est bénéfique (Tableau 14). La farine fermentée ainsi produite a été incorporée dans des granulés expérimentaux pour crevette (*Macrobrachium rosenbergii*) avec 10-20-30% d'incorporation.

¹ Ces résultats sont la propriété du Groupe Aqualande et du CIRAD.

Les résultats obtenus sont bien meilleurs qu'avec la farine d'algue non-fermentée ; ils sont optimaux avec 20% et 30% de farine d'algue fermentée pour l'efficacité alimentaire et la croissance, respectivement. La fermentation pourrait donc être une option intéressante ; il faudrait cependant étudier la possibilité de réaliser la fermentation sur les algues fraîches, avant transformation en farine, pour simplifier le processus.

Tableau 14 : Composition de la farine d'ulve (*Ulva lactuca*) avant et après fermentation lactique (Felix & Brindo 2014).

Seaweed samples	Moisture (%)	Protein (%)	Lipid (%)	Ash (%)	Fiber (%)	NFE (%)	Gross energy (K cal/g)
Raw seaweed	16.20	21.00	1.11	24.0	19.61	18.08	3.63
Fermented seaweed	16.90	30.43	2.14	20.0	2.10	28.43	4.49

NFE : Nitrogen Free Extract : Extrait Non azoté (ENA), c'est-à-dire les glucides.

Enfin, une autre option, peut-être un peu moins en phase avec l'esprit du présent projet, serait d'enrichir l'algue en protéines grâce à une culture fertilisée avec de l'azote minéral, de préférence de l'ammoniacale sous forme de chlorure d'ammonium (NH_4Cl). Cela a déjà été réalisé par l'auteur ; la teneur en protéines de l'ulve (*Ulva rigida*) peut augmenter d'environ 18% initialement à 42% (% matière sèche) en 2 semaines (Annexe Figure 7). Acheté en grand conditionnement, le NH_4Cl est bon marché ; la faisabilité d'une telle option dépendrait surtout de la disponibilité de bassins de culture à raison de 2-3 kg d'algue fraîche stockée par m^2 (bassins extérieur avec éclairage naturel et changement d'eau hebdomadaire). Cette fertilisation pourrait être envisagée comme un traitement de « finition » destiné à garantir la valeur nutritionnelle de l'algue ($\approx 40\%$ protéines) issue auparavant d'une culture intégrée l'ayant déjà amené à $\approx 30\%$ protéines.

4.6.3 Tester un gradient de protéines dans l'aliment

Les résultats d'efficacité protéique et de rétention des protéines laissent penser que nos aliments testés pourraient être trop protéinés. Par conséquent, il serait judicieux de tester un gradient de la teneur en protéines totales, a priori dans un premier temps entre 20% et 40% avec des intervalles de 5%, soit 5 types d'aliments au total.

4.6.4 Potentiel aquacole de *Mugil cephalus* et d'autres Mugilidae

Les présents résultats montrent que, pour les petits poissons, *M. cephalus* peut avoir une croissance comparable à celle de *L. ramada* mais que l'efficacité alimentaire de *M. cephalus* semble moins bonne. Les résultats sur *M. cephalus* ont cependant été obtenus avec un seul bac ; ils ne sont donc pas très fiables et, de plus, l'amélioration des performances de cette espèce en 2^{ème} phase laisse penser qu'il pourrait y avoir une marge de progrès. Par ailleurs, *M. cephalus* est la principale espèce de muges qui fait l'objet d'élevage, en Egypte notamment ; cette espèce est connue comme étant la plus grande des muges (atteint 8 kg) et elle aurait donc un potentiel de croissance intéressant. Il serait donc pertinent de refaire ce type de test d'alimentation avec *M. cephalus* dans les conditions optimales, c'est-à-dire avec plusieurs bacs par type d'aliment.

Outre *L. ramada* et *M. cephalus*, une 3^{ème} et dernière espèce de muges locale pourrait faire l'objet de tests car elle serait potentiellement intéressante. Il s'agit de *Chelon labrosus* ; ce poisson peut également atteindre une grande taille et des observations préliminaires ont montré qu'il pourrait avoir la meilleure croissance parmi ces 3 espèces. Par ailleurs, d'après des pêcheurs locaux, *C. labrosus* consommerait des macroalgues fraîches dans le milieu naturel, ce qui serait intéressant pour la valorisation des algues issues d'IMTA. Ce muge est également un peu élevé ; une éclosion en Tunisie a même produit des alevins de cette espèce. Cependant, *C. labrosus*, tout comme *M. cephalus*, semble bien moins abondant que *L. ramada* dans notre région ; il n'est pas donc certain que la pêche permette un approvisionnement suffisant pour réaliser des tests d'élevage suffisamment complets.

Enfin, les espèces « indéterminées » *Liza aurata* et/ou *L. saliens* ne semblent pas intéressantes car leur croissance et leur efficacité alimentaire ont été faibles par rapport à *L. ramada* durant la présente étude. Les tests n'ont pas été répliqués avec les muges indéterminés mais 3 bacs ont quand même été suivis durant les 2 phases avec un bac par type d'aliment et des poissons marqués ; la tendance est donc fortement en défaveur de ces poissons. Par ailleurs, il serait nécessaire de préciser l'espèce, ou les espèces, considérées comme indéterminées ici ; un test ADN pourrait être fait.

4.6.5 Potentiel des muges en pisciculture intégrée

Les résultats obtenus ici sont probablement proches de l'optimum dans nos conditions, à savoir dans des bacs avec des granulés comme seul aliment et une eau claire et de qualité physicochimique optimale. Il serait pertinent de refaire des tests dans d'autres conditions où les muges pourraient exprimer d'autres qualités.

Les muges peuvent en effet tamiser les sédiments (10 à 15 fois leur poids par jour) et, dans une certaine mesure, filtrer l'eau. Ces aptitudes peuvent être exploitées pour valoriser des aliments naturels (plancton, crustacés, mollusques et débris organiques) dans un environnement de type étang ou lagune. Ces aliments naturels peuvent être produits par exemple grâce aux rejets de poissons d'élevage (sels nutritifs dissous, aliments non consommés, fèces). Dans ce système, l'aliment granulé peut être mangé « plusieurs fois » via le recyclage des rejets dans le réseau trophique. L'efficacité alimentaire est donc généralement optimale avec un indice de conversion alimentaire qui peut être bien inférieur à 1 contre 1,85 dans le meilleur de nos 3 aliments testés. En pratique, des muges pourraient être stockés en étang ou lagune et nourris avec le granulé à base farine d'algue ; la densité finale pourrait a priori atteindre 500 g/m² (5 T/ha) comme c'est le cas dans les étangs de polyculture de carpes. Ce type d'élevage en étang est réalisé en Egypte notamment, avec des muges associés à des tilapias. Outre la surface requise pour ce type d'élevage semi-intensif, la limitation à la production serait la température ; celle-ci serait insuffisante (< 10°C) pour permettre une bonne croissance durant plusieurs mois de l'année.

Les muges peuvent également consommer directement les fèces de poissons. Cela peut être exploité pour « bioremédier » l'élevage d'une espèce nourrie avec des granulés en conditions intensives. Cela a été montré avec un élevage de muges associés à des daurades ; en bac, les rejets solides des daurades peuvent ainsi être très réduits (Shpigel et al. 2016).

4.7 Amélioration du protocole de test d'alimentation

4.7.1 Optimiser la granulométrie

La taille des granulés pourrait faire l'objet d'un test spécifique car les muges préfèrent consommer des petites particules. La taille des granulés testés ici (2,0 mm) est certainement la plus grande possible pour les tailles de poissons utilisés. Une granulométrie inférieure pourrait peut-être améliorer les performances notamment des espèces indéterminées et des *Mugil cephalus*.

4.7.2 Optimiser la formulation

La composition proximale des aliments testés diffère assez de notre objectif au niveau de la teneur en protéines. Celle-ci était de 33,2%, 35,4% et 40,6% (% MS) pour les aliments 0% algues, 20% algues et Biomar, respectivement, alors que notre teneur objectif était de 37%. Nous nous étions fiés aux compositions proximales indiquées par les fournisseurs pour les matières premières et l'aliment Biomar. Or il s'avère que ces compositions indiquées ne sont pas suffisamment fiables et/ou qu'elles sont sensiblement modifiées par le taux d'humidité (variable). Par conséquent, il s'avère indispensable de faire analyser la composition de tous les ingrédients et de l'aliment industriel de référence avant la préparation des granulés. Cette analyse a un certain coût (9 produits x 101 €/produit ≈ 900 €), auquel il faut ajouter ensuite l'analyse des différents granulés fabriqués et des carcasses de poissons.

4.7.3 Les fibres en question

La nature des fibres analysées doit être précisée. Nous avons fait analyser ici ce qui semble être les fibres totales (hémicellulose, cellulose et lignine), or les compositions proximales des aliments pour poissons intègrent souvent la seule cellulose brute. Par exemple, pour l'aliment industriel Biomar, les fibres totales sont de 19,8% alors que le fournisseur indique 4,2% de cellulose brute. Il en découle une teneur d'Extractif Non Azoté (ENA)¹³ ou « glucides » très différente entre les deux compositions de ce même aliment, de 19,3% et de 33% suivant que l'on considère les fibres totales ou la cellulose brute, respectivement. La valeur énergétique de l'ENA étant de 4,1 kcal/g, il en résulte une valeur énergétique de l'aliment complet bien différente, de 3,51 et 4,49 kcal/g suivant que l'on considère les fibres totales ou la cellulose brute, respectivement.

Outre l'aspect analytique des fibres, nous pourrions nous interroger sur la digestibilité de ces celles-ci. En général, les « fibres totales » ou la « cellulose brute » sont considérées comme dénuées de valeur énergétique pour les poissons, du moins pour les espèces carnassières. Cependant, des poissons omnivores à tendance végétarienne peuvent assimiler une partie des fibres qui peuvent donc constituer une source d'énergie ; c'est le cas en particulier de la carpe amour blanc (Van Dyke & Sutton 1977). Cette question est importante notamment parce que la farine d'*Ulva rigida* contient 25,9% de fibres totales.

4.7.4 Optimiser l'extrusion

Avec la machine utilisée, la température d'extrusion se stabilise en fonctionnement à 105°C. Il serait préférable que cette température atteigne 120°C voire 130°C pour optimiser la cuisson des ingrédients dont l'amidon en particulier. La résistance chauffante actuelle pourrait être

¹³ ENA = 100% – humidité – cendres – protéines – lipides – « fibres »

changée pour un modèle plus puissante. Sinon, les mélanges d'ingrédients pourraient être préchauffés à 40°C et cela pourrait peut-être convenir.

4.7.5 Stock de poissons

Nous avons été limités par le nombre de poissons disponibles. Par conséquent, nous n'avons pu stocker que 17 *L. ramada* par bac lors de la 2^{ème} phase et nous n'avons pas été très sélectif sur les poids initiaux. Idéalement, pour pouvoir tester 5 types d'aliments dans 4 bacs chacun avec 35 poissons par bac, 700 poissons sont nécessaires, à majorer si possible au double (1400) pour pouvoir sélectionner seulement les *Liza ramada* de taille homogène. Ce nombre de poissons peut être collecté par la pêche dans les canaux des étangs littoraux et dans ces étangs de préférence en hiver ; les petits poissons sont abondants et le froid limite la perte des poissons lors des manipulations. Le poids moyen de ces poissons pêchés est d'environ 10 g. Ils pourraient être stockés durant 2-3 mois pour atteindre environ 25 g et être ainsi prêts pour le test d'alimentation.

D'après notre expérience, il est pratiquement impossible de collecter un nombre suffisant d'autres espèces de muges intéressantes que *L. ramada*. Environ 300 *Mugil cephalus* peuvent être collectés au maximum en quelques semaines, et encore moins de *Chelon labrosus*. Un protocole complet d'alimentation ne pourrait donc a priori pas s'appliquer à ces poissons. Quant aux muges « indéterminés », *Liza aurata* et/ou *L. saliens*, ces poissons peuvent être très abondants mais ces poissons ne semblent pas intéressants car leur croissance est lente.

4.7.6 Bacs d'expérimentation

Les bacs utilisés étaient de couleur verte relativement foncée. Il serait judicieux d'utiliser des bacs de fond clair (blanc, gris) pour faciliter l'observation des granulés non consommés restant sur le fond. Les parois des bacs pourraient rester de couleur foncée.

Les petits muges ne semblent pas avoir été affectés par la dimension des bacs. Ce n'était peut-être pas le cas pour les gros *M. cephalus* ; pour des poissons de cette taille, des bacs plus grands (en surface surtout) seraient probablement plus adaptés.

❖ Conclusion

Il est possible d'incorporer 20% de farine d'algue en remplacement de la moitié tourteau de soja sans affecter la croissance ni l'efficacité alimentaire de *Liza ramada*. L'ajout en parallèle de gluten de blé ne permet cependant pas d'être catégorique sur l'effet propre de la farine d'algue. De plus, le gluten de blé risque d'augmenter le prix de l'aliment complet. Il est néanmoins possible que cet aliment soit plus « durable » que l'aliment sans algue. Dans ce sens, une analyse du cycle de vie des deux types d'aliments serait utile.

Une farine d'algue plus riche en protéines permettrait une substitution plus simple du tourteau de soja, avec moins de gluten ajouté, voire pas du tout. La fermentation lactique est une piste intéressante pour augmenter la teneur en protéines du type d'algue utilisé. La teneur en protéines optimale pour l'aliment muge reste d'ailleurs à déterminer ; cela pourrait contribuer à optimiser l'efficacité protéique de l'aliment et la rétention des protéines. L'aliment à base de farine d'algue pourrait être davantage consommé et ainsi probablement améliorer la croissance des poissons. Améliorer la digestibilité y contribuerait, notamment en augmentant la température d'extrusion des granulés. Quant à augmenter l'appétence, cela signifierait a priori incorporer davantage de farine de poissons ce qui ne serait pas très « durable ».

Plusieurs éléments du protocole pourront être améliorés, notamment au niveau de la formulation des différents aliments testés afin que leur composition proximale soit la plus précise et la plus proche possible.

Les résultats annexes obtenus avec les autres espèces de muges sont à considérer avec précaution car les traitements n'ont pas été répliqués avec ces poissons. Néanmoins, dans nos conditions, il semble que *L. ramada* soit l'espèce la plus performante. *Mugil cephalus* est un peu moins bon mais ses résultats se sont améliorés durant la 2^{ème} phase du test ; cette espèce mériterait donc un protocole de test complet. En revanche, les performances des muges d'espèces indéterminées, a priori *Liza aurata* et/ou *L. saliens*, paraissent médiocres.

Cette étude a contribué à la connaissance du potentiel aquacole de *L. ramada* en conditions intensives, en bacs et avec des granulés complets. Le potentiel de cette espèce et d'autres muges mériterait d'être évalué dans d'autres conditions : en élevage semi-intensif en étang ou en lagune (recyclage des rejets par le réseau trophique) et en aquaculture intégrée pour la « bioremédiation » des rejets solides de l'élevage intensif marin (ex : daurade) et pourquoi pas aussi en eau douce (truite).

Enfin, la valorisation de l'ulve, comme a priori toute autre macroalgue marine, serait à envisager pour l'alimentation de la saupe (*Sarpa salpa*). Il s'agit d'une espèce de daurade (Sparidé) méditerranéenne naturellement « herbivore » et sans arête intramusculaires. Ce poisson peut consommer et digérer correctement l'ulve fraîche, sans qu'il soit nécessaire de la transformer en farine pour l'incorporer dans un granulé sec. Et la qualité de la chair des poissons ainsi nourris pendant plusieurs mois est bonne (observations de l'auteur).

❖ Epilogue

A ce jour, l'élevage des muges se poursuit dans les mêmes conditions. Les 10 plus gros spécimens de *Liza ramada* de chaque bac suivent une phase de grossissement jusque fin mars 2020. Les poissons seront ensuite abattus et leur qualité évaluée au niveau du rendement de filetage et des propriétés organoleptiques ; des tests de préparations culinaires pourront aussi être réalisées. Ce type d'étude avait déjà été fait avec *L. ramada* suite au précédent test d'alimentation avec la farine de pain rassis. La composition proximale de la chair des poissons sera également analysée.

Le présent document fera donc l'objet d'une mise à jours avec ces éléments. La partie discussion gagnerait également à être complétée en y ajoutant la comparaison avec d'autres travaux publiés. Ces derniers concerneraient diverses espèces de poissons nourris avec diverses farine d'algues, en ciblant les poissons omnivores et l'ulve. Il sera également utile de mettre à jour les résultats existants sur l'alimentation des muges en général.

❖ Annexes

Annexe Tableau 1 : Référence de rejet azoté pour l'élevage de porc (Rey & Lobry 2017).

Annexe : Références de rejets

Fiche 1a - AZOTE		
Références d'excrétion et de rejet épanachable d'azote des porcs selon l'alimentation et le mode de gestion des effluents		

Excrétion	Standard	Biphase
Truie reproductrice ⁽¹⁾ , kg/an	24,6	20,3
Post-Sevrage (8-31 kg), kg/porcelet	0,62	0,55
Engraissement (31-118 kg), kg/porc <i>par kg de différence de poids d'abattage</i>	4,49 0,052	3,68 0,042

Lisier conventionnel	Standard	Biphase
Truie reproductrice ⁽¹⁾ , kg/an	17,4	14,3
Post-Sevrage (8-31 kg), kg/porcelet	0,44	0,39
Engraissement (31-118 kg), kg/porc <i>par kg de différence de poids d'abattage</i>	3,17 0,036	2,60 0,030

Biphase : teneurs maximales en protéines des aliments	
Truies:	Gestation : 14,0% - Lactation : 16,5%
Post-sevrage :	1 ^{er} âge : 20,0% - 2 ^{ème} âge : 18,0%
Engraissement:	Croissance : 16,0% - Finition : 15,0% (60% d'aliment de finition)

⁽¹⁾ pour les truies non productrices le rejet par an est estimé à 3 fois celui du porc à l'engraissement

⁽²⁾ pour un logement sur paille pendant la gestation et sur caillebotis pendant la lactation

Évaluation des rejets d'azote, phosphore, potassium, cuivre et zinc des porcs

Influence de l'alimentation, du mode de logement et de la gestion des effluents

Références françaises d'excrétion et de quantités épanachables de N, P, K, Cu et Zn dans les effluents porcins

Source : Réseau Mixte Technologique (RMT) "élevages et environnement"

http://www.rmtlevagesenvironnement.org/presentation_du_RMT

Annexe Tableau 2 : Quantité d'azote exporté par les cultures (Rey & Lobry 2017).

Occupation	Rendement/ha	Exportation des cultures (en kg) N	
		Coefficient (*)	Total
Blé tendre	80	2,5	200
orge	70	2,1	147
Maïs grain	120	2,2	264
Tournesol	30	1,9	57
Maïs ensilage	20	12,5	250
Prairie foin pleine épiaison	6	15	90
Sorgho fourrager	20	12,5	250
Prairie permanente foin	5	15	75

(*) références CORPEN (Cf. annexe « exportation par les productions végétales »).

EFICO Cromis 832F
TILAPIA
Flottant

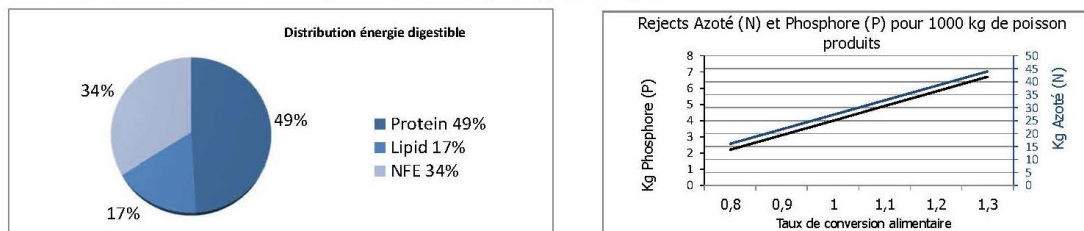
Declaration		3 mm	4,5 mm	6,5 mm	9 mm
Protéines brutes	%	37	35	31	31
Lipides bruts	%	9	6	6	6
Extrait non azoté (ENA)	%	33,0	38,0	39,6	39,6
Cellulose brute	%	4,2	5,4	6,9	6,9
Cendres	%	7,8	7,0	6,2	6,2
Phosphore total	%	1,0	0,9	1,0	1,0
Protéines Digestibles/Energie Digestible	g/MJ	21,1	20,8	19,3	19,3
Energie digestible BioMar*	MJ/kg	15,2	14,2	13,5	13,5
Energie digestible classique**	MJ/kg	16,1	15,2	14,2	14,2
Energie brute	MJ/kg	18,8	18,3	17,7	17,8
Vitamine C - ajoutée	mg/kg	300	300	100	100
Vitamine E - ajoutée	mg/kg	250	250	200	200
Nombre indicatif de granulés par kg		46000	15800	5600	4000

* Energie digestible BioMar calculée sur protéines, lipides et amidon

**Energie digestible classique calculée sur protéines, lipides et tout l'extrait non azoté

Distribution énergie digestible & Déclaration écologique

Les informations sur la distribution de l'énergie et les valeurs de rejets s'applique au 4,5 mm



En fonction de l'usine de production et des variations naturelles dans les matières premières, les informations de la fiche technique peuvent varier. Voir l'étiquette pour plus d'information et la composition exacte. L'étiquette se trouve sur le produit comme le stipule la réglementation de l'Union Européenne.

Table de nourrissage indicative (kg aliment par jour pour 100 kg de poisson)

Taille des poissons	Granulés	Temperature (°C)									
gram	mm	17 °C	19 °C	21 °C	23 °C	25 °C	27 °C	29 °C	31 °C	33 °C	
25 - 35	3,0	1,23	1,86	2,46	3,08	3,25	5,53	4,98	2,53	1,11	
35 - 60	3,0	1,04	1,61	2,09	2,60	2,82	4,31	3,89	2,14	0,94	
60 - 100	4,5	1,02	1,54	2,05	2,56	2,75	3,02	2,66	2,11	0,93	
100 - 160	4,5	0,88	1,31	1,76	2,20	2,36	2,42	2,28	1,81	0,80	
160 - 300	4,5	0,75	1,12	1,50	1,87	2,01	2,06	1,94	1,54	0,67	
300 - 400	4,5	0,63	0,95	1,27	1,58	1,70	1,74	1,64	1,30	0,57	
500 - 700	6,5	0,60	0,90	1,20	1,50	1,61	1,65	1,55	1,23	0,54	
900 - 1200	9,0	0,51	0,76	1,01	1,26	1,36	1,39	1,31	1,04	0,46	

Le taux de distribution doit être adapté à la stratégie de production ainsi qu'aux conditions d'élevage. Les données sont calculées pour atteindre le taux de conversion minimum. Elles ne prennent pas en compte les pertes possibles d'aliment dues à la configuration de la ferme. Pour obtenir la croissance maximale, des quantités supérieures peuvent être distribuées. Contactez le Support Technique BioMar pour plus de détails.

Conserver dans un endroit frais et sec, à l'abri du soleil, des intempéries et des nuisibles.

A utiliser de préférence avant le: Voir étiquette

BioMar SAS France . www.biomar.fr & www.biomar.it - contact: tel.: +33 545 90 35 00 . biomar@biomar.fr

BioMar Iberia Spain . www.biomariberia.com - Tel: +34 979 76 14 04 . biomariberia@biomar.com

Annexe Figure 1 : Caractéristiques de l'aliment industriel Biomar utilisé.

ADDITIFS AU kg DE PRODUIT

1a-CONSERVATEURS

Acide citrique (E330)

1b-ANTIOXYGENES*

Gallate de propyle (E310)

4 mg

2b-SUBSTANCES AROMATIQUES

Mélange de substances aromatiques

3a-VITAMINES

Vitamine A (3a672a)

600 000 UI

Vitamine D3 (3a671)

100 000 UI

Vitamine E (3a700)

3 750 UI

Vitamine B1 (3a821)

300 mg

Vitamine K3 (3a711)

50 mg

Vitamine C (3a312)

5 000 mg

Chlorure de Choline (3a890)

1 950 mg

Vitamine B2 (3a825i/3a825ii)

D-pantothénate de calcium (3a841)

Vitamine B6 (Chlorhydrate de Pyridoxine) (3a831)

Vitamine B12 (Cyanocobalamine)

Vitamine PP (Niacine (3a314)/Niacinamide (3a315))

Biotine (3a880)

Acide Folique (3a316)

3b-OLIGO-ELEMENTS

Cuivre (Sulfate de cuivre (II) pentahydraté) (3b405)

250 mg

Fer (Sulfate de fer (II) monohydraté) (3b103)

2 500 mg

Manganèse (Sulfate manganeux monohydraté) (3b503)

250 mg

Zinc (Sulfate de zinc monohydraté) (3b605)

500 mg

Iode (Iodure de potassium) (3b201)

200 mg

Sélénium (Sélénométhionine) (3b8.12)

10.0 mg

3c-ACIDES AMINES

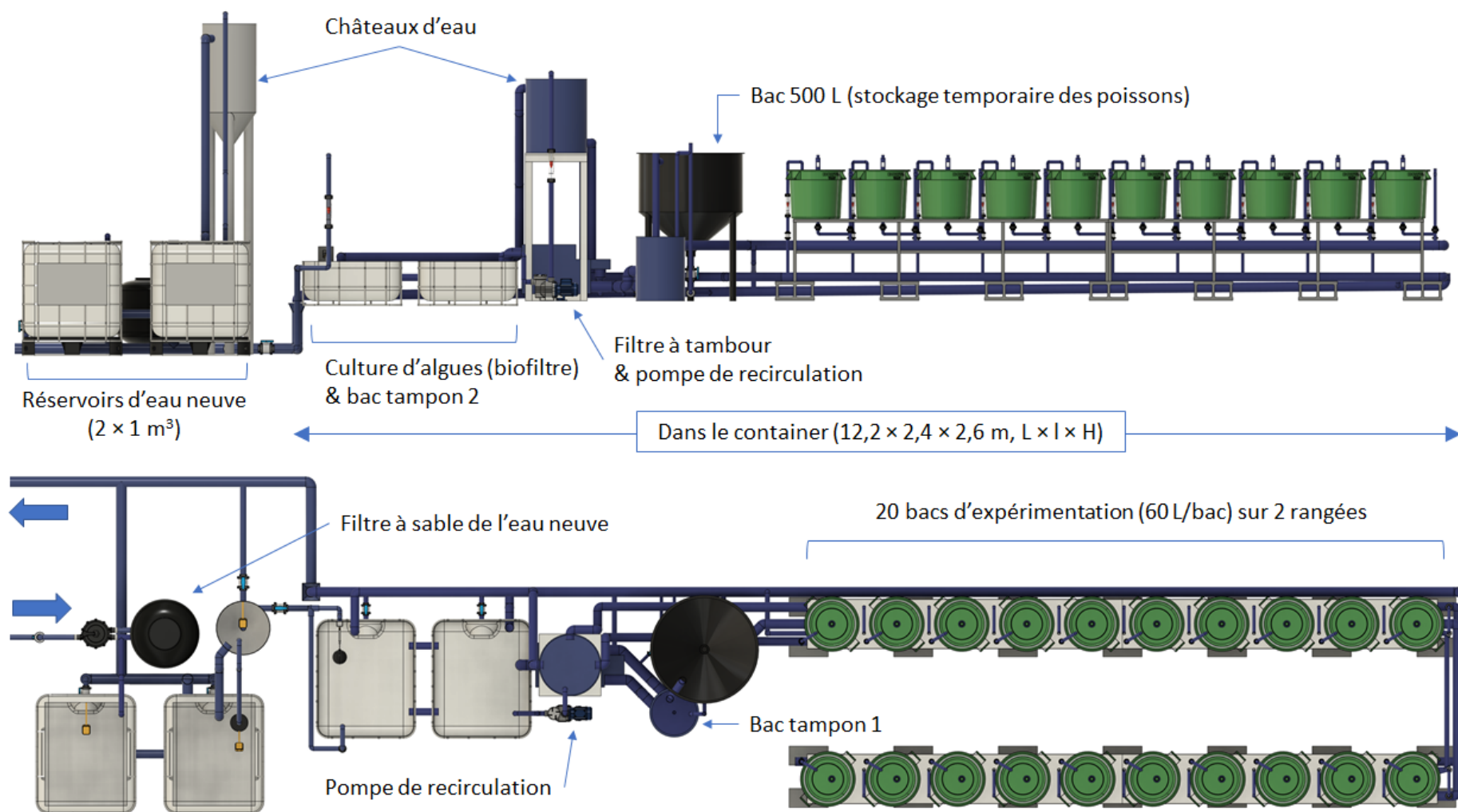
DL-méthionine, techniquement pure (3c301)

16.5 %

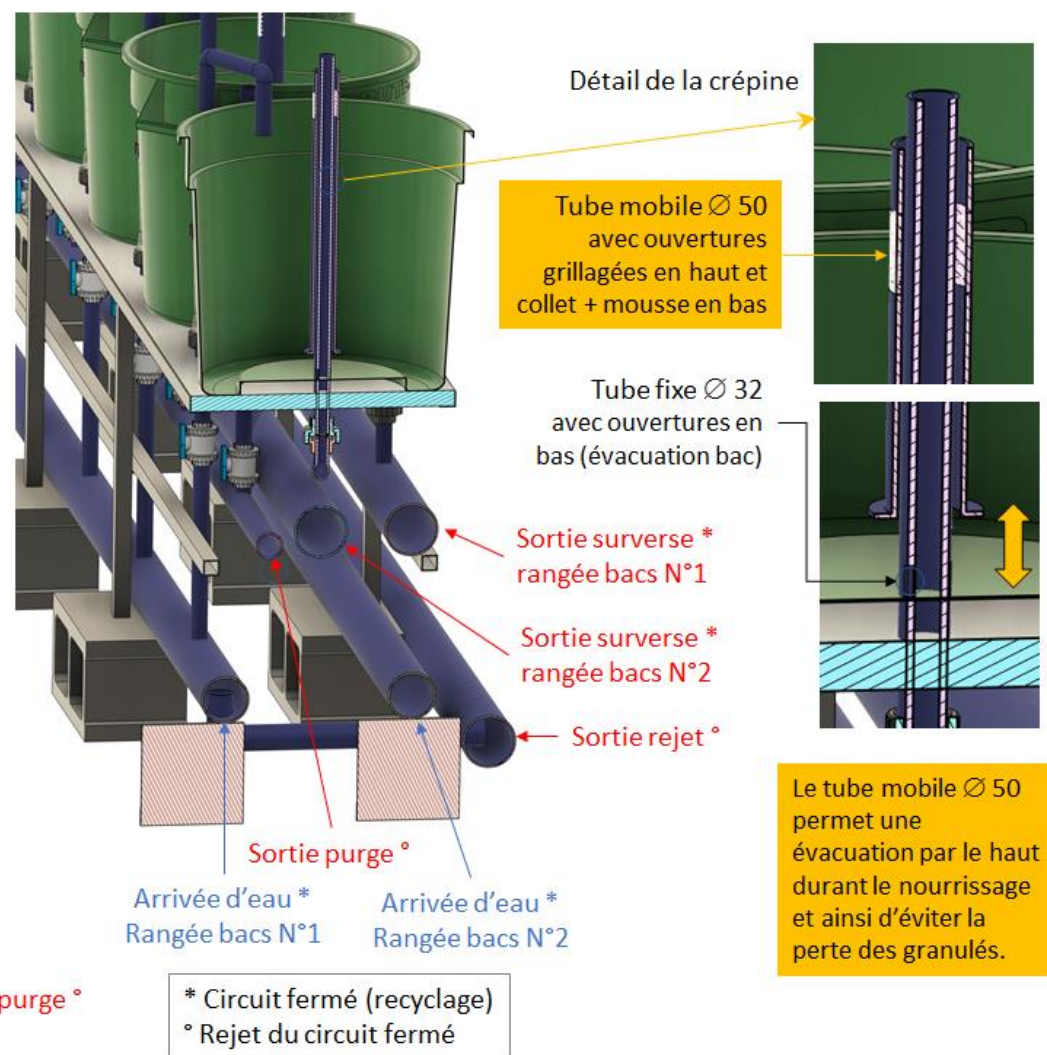
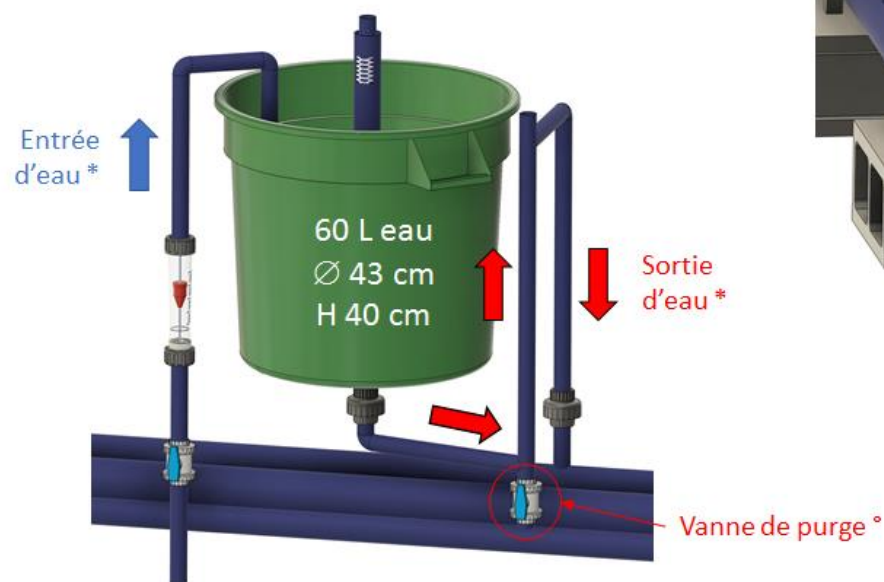
Monochlorhydrate de L-Lysine (3.2.3)

33.5 %

Annexe Tableau 3 : Composition du prémix utilisé pour la formulation des granulés expérimentaux (référence : FHT036NE ; fabricant : Techna France Nutrition).



Annexe Figure 2 : Vues détaillées du circuit d'élevage utilisé pour le test d'alimentation.



Annexe Figure 3 : Vues détaillées des bacs d'élevage utilisés pour le test d'alimentation.



SELARL du Dr Alain Le Breton
Cabinet vétérinaire aquacole
Immatriculation à l'ordre des vétérinaires n° 503094

1289 rue des Pyrénées – ZA EcoSud – BP 50031
31330 Grenade sur Garonne – FRANCE

Tel : +33 (0)5 62 790 780 – E-mail : contact@veteau.com

Dr Alain Le Breton (n°10160)
Dr Robin Carpentier (n°32435)
Dr Reda Kheyi (n°28611)

RAPPORT D'ANALYSE DE CYCLE

Réf. rapport : LPDS 190807 Projet Muges(2)

Réf. labo : 219F

CONCLUSIONS

Les muges « petits » prélevés au hasard le 06/08/2019 et reçus pour analyse au laboratoire, ne présentent pas de signes cliniques de pathologie particulière, ni de pathogène spécifique.

Certains alevins sont porteurs de souches bactériennes, identifiées comme appartenant au genre *Vibrio splendidus* et *Photobacterium damsela subsp. damsela*. Les bactéries appartenant au groupe des *Vibrio splendidus* sont des pathogènes des coquillages. *Photobacterium damsela subsp. Damsela* est un pathogène de la daurade. Les deux bactéries présentent une sensibilité à l'ensemble des antibiotiques testés sauf à l'amoxicilline.

Les observations post-mortem et analyses complémentaires effectuées sur les alevins reçus n'ont pas permis la mise en évidence des pathogènes ou pathologies suivants :

Infections parasitaires externes ou internes :

monogènes, protozoaires ciliés dont *Trichodina*, de myxosporidiose, microsporidiose ou coccidiose intestinales.

Infections bactériennes :

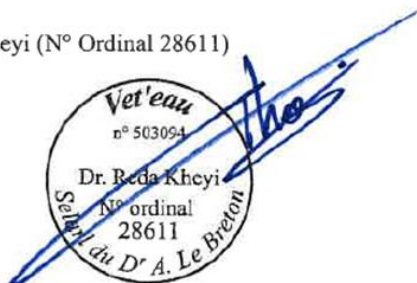
Vibriose due à *Vibrio anguillarum* sérotype I & II - *Vibrio alginolyticus* - *Vibrio harveyi*, Pasteurellose due à *Photobacterium damsela subsp. piscicida*, Furonculose à *Aeromonas salmonicida salmonicida*, Flexibactériose à *Tenacibaculum sp*, bactéries filamenteuses segmentées

Infections virales :

Nodavirus RGNNV / SJNNV et RG/SJ recombinant

Date: 4 septembre 2019

Dr Reda Kheyi (N° Ordinal 28611)



Annexe Figure 4 : Rapport d'analyse vétérinaire du stock de muges utilisés (petits poissons).



Réf. labo : 220F



56

Annexe Tableau 4 : Protocoles de mesure des sels nutritifs dissous avec le spectromètre HACH modèle DR1900.

Sels nutritifs	Réactifs	Vol. échantillon (ml)	Délai (mn)	Programme spectro. No	Longueur d'onde (nm)
NH ₃ (0-2,5mg/L)	1 ml sel de Rochelle 3 gouttes stabilisateur minéral 3 gouttes agent dispersant 1 ml réactif de Nessler	10	1	380	425
NO ₂ (0-0,3mg/L)	Réactif Nitriver (poudre)	10	15	371	507
NO ₃ (0-30mg/L)	Réactif Nitriver (poudre)	10	5	353	500
PO ₄ (0-2,5mg/L)	Réactif Phosphaver (poudre)	10	2	490	710
PO ₄ (0-30 mg/L)	Réactif Amino (gouttes) : 1 ml solution de réactif de Molybdate 1 ml solution de réactif d'Amino acide	25	10	485	530

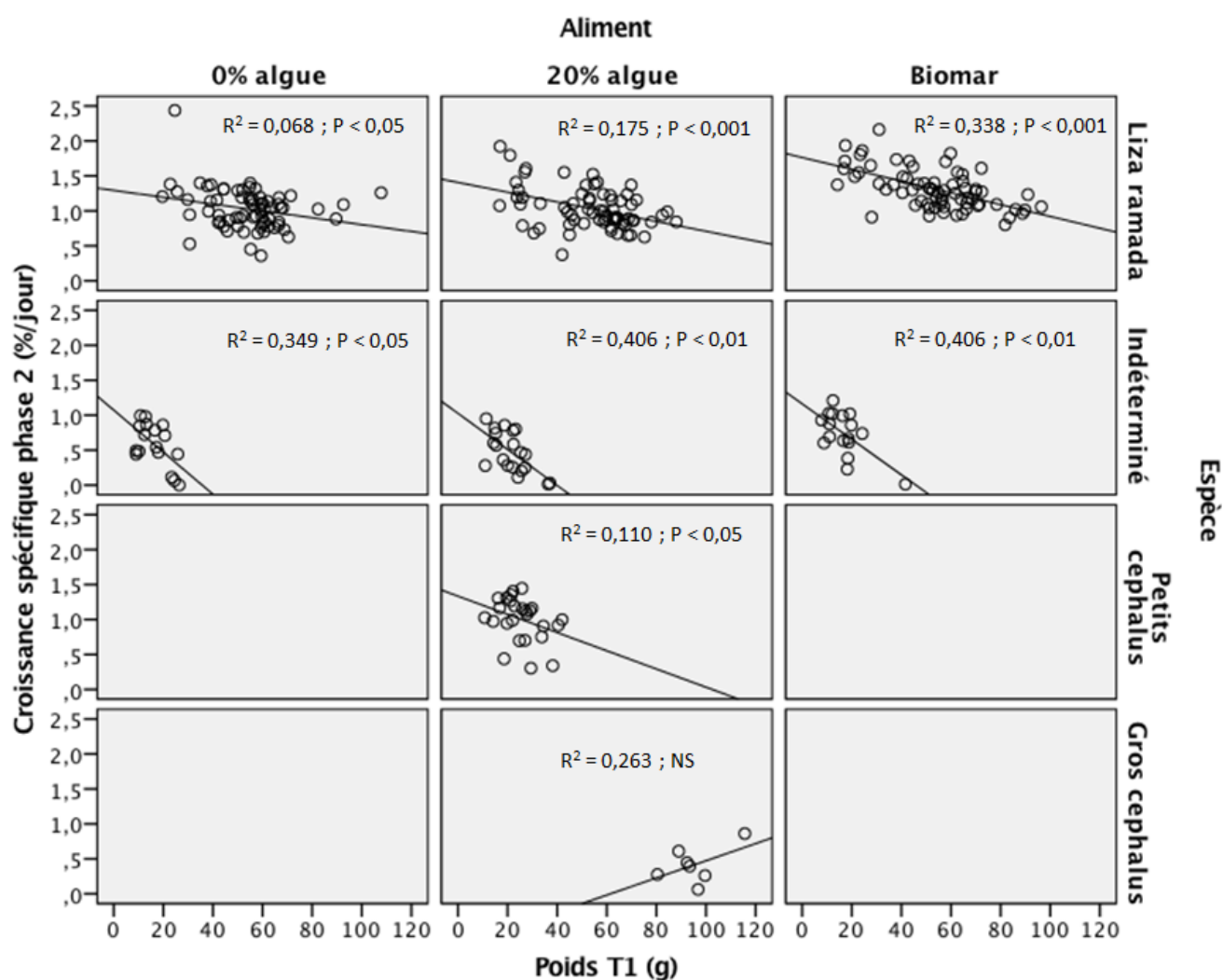
Annexe Tableau 5 : Résultats détaillés obtenus avec *Liza ramada* durant la 2^{ème} phase du test.

	Granulés expérimentaux		Granulé Biomar
	0% algue	20% algue	
Données initiales			
Poids (g)	54,5 ± 1,9 (28,9)	53,5 ± 2,1 (32,9)	53,4 ± 2,3 (36,3)
Longueur (cm)	16,3 ± 0,2 (9,5 ^{b/**})	16,1 ± 0,2 (12,2 ^{ab})	16,2 ± 0,3 (13,1 ^a)
Coefficient de condition	1,22 ± 0,01 (6,0)	1,22 ± 0,02 (9,0)	1,23 ± 0,01 (6,0)
Données finales			
Poids (g)	^{ooo} 79,4 ± 2,8 (28,5)	^{ooo} 77,6 ± 2,9 (30,9 ^{oo})	^{ooo} 86 ± 3,3 (32,2 ^{ooo})
Longueur (cm)	^{ooo} 18,4 ± 0,2 (8,9)	^{ooo} 18,2 ± 0,2 (10,8 ^{oo})	^{ooo} 18,6 ± 0,3 (11,5 ^{oo})
Coefficient de condition	^{ooo/**} b 1,25 ± 0,01 (6,1 ^{ooo})	^{ooo} b 1,25 ± 0,01 (6,4)	^{ooo} a 1,29 ± 0,01 (5,1 ^{ooo})
Croissance relative (% poids initial)	^{***} b 47,0 ± 2,1 (34,5)	^{***} b 47,4 ± 2,0 (32,4)	^a 63,2 ± 2,1 (24,5)
Gain moyen quotidien (g)	^{***} b 0,67 ± 0,03 (36,9)	^{***} b 0,65 ± 0,03 (33,9)	^a 0,86 ± 0,03 (30,1)
Croissance spécifique (%/jour)	^{***} b 1,03 ± 0,04 (27,6)	^{***} b 1,03 ± 0,03 (26,1)	^a 1,31 ± 0,03 (19,1)
Taux d'alimentation journalier (%)	^{**} b 1,85 ± 0,05	^{**} b 1,83 ± 0,08	^a 2,46 ± 0,11
Indice de conversion alimentaire	1,85 ± 0,02	1,92 ± 0,1	1,99 ± 0,03
Coefficient d'efficacité protéique	^{***} a 1,81 ± 0,03	^{**} b 1,61 ± 0,06	^c 1,39 ± 0,02

Moyenne ± erreur standard (coefficient de variation) ; coefficient de variation = 100 × écart-type / moyenne,

Différences significatives :

- Entre poids final et poids initial pour chaque type d'aliment : ^{ooo} (P < 0,001), test T,
- Entre les 3 types d'aliments, indiquées par des lettres différentes : a, b (P < 0,05) ; test de Duncan,
- Entre les aliments 0% et 20% algues, d'une part, et l'aliment Biomar, d'autre part :
^{**} (P < 0,01), ^{***} (P < 0,001) ; test de Bonferroni.



Annexe Figure 6 : Relation entre la croissance des poissons et leur poids initial durant la 2^{ème} phase.

Annexe Tableau 6 : Résultats détaillés obtenus avec *Liza ramada* et les espèces indéterminées ensemble dans les mêmes bacs durant la 1^{ère} phase.

	Granulés expérimentaux		
	0% algue	20% algue	Granulé Biomar
Données initiales			
Poids (g)	29,4 ± 0,1 (40,3 ^b)	29,5 ± 0,2 (38,8 ^{ab})	29,3 ± 0,2 (44,9 ^a)
Longueur (cm)	13,3 ± 0,1 (14,9 ^b)	13,4 ± 0,0 (13,5 ^{ab})	13,2 ± 0,1 (16,7 ^a)
Coefficient de condition	1,19 ± 0,01 (7,7)	1,17 ± 0,01 (6,0)	1,21 ± 2,08 (14,3)
Données finales			
Poids (g)	°°°46,9 ± 0,7 (44,8)	°°°46,3 ± 1,2 (45,0°)	°°°46,6 ± 0,2 (49,6)
Longueur (cm)	°°°15,3 ± 0,1 (17,1°)	°°°15,3 ± 0,1 (16,4°°)	°°°15,2 ± 0,1 (18,3°)
Coefficient de condition	1,21 ± 0,01 (6,2)	°1,21 ± 0,02 (8,7)	1,20 ± 0,05 (7,2)
Croissance relative (% poids initial)	56,3 ± 1,1 (52,6)	52,92 ± 4,1 (48,4)	55,34 ± 7,4 (58,1)
Gain moyen quotidien (g)	0,43 ± 0,02 (62,2)	0,41 ± 0,03 (62,6)	0,42 ± 0,01 (69,1)
Croissance spécifique (%/jour)	1,04 ± 0,02 (46,2)	1,00 ± 0,06 (42,7)	1,02 ± 0,03 (51,2)
Taux d'alimentation journalier (%)	2,41 ± 0,09	2,23 ± 0,07	2,42 ± 0,15
Indice de conversion	2,15 ± 0,04	2,08 ± 0,09	2,22 ± 0,10
Coefficient d'efficacité protéique	** ^a 1,56 ± 0,03	** ^a 1,49 ± 0,06	^b 1,20 ± 0,05

Moyenne ± erreur standard (coefficient de variation) ; coefficient de variation = 100 × écart-type / moyenne,

Différences significatives :

- entre données finales et initiales pour chaque type d'aliment :
° (P < 0,05), °° (P < 0,01), °°° (P < 0,001), test T.
- entre les 3 types d'aliments, indiquées par des lettres différentes : a, b (P < 0,05), test de Duncan,
- entre les aliments 0% et 20% algues, d'une part, et l'aliment Biomar, d'autre part :
** (P < 0,01), test de Bonferroni.

Annexe Tableau 7 : Résultats détaillés obtenus avec les espèces indéterminées durant la 2^{ème} phase.

	Granulés expérimentaux		
	0% algue	20% algue	Granulé Biomar
Données initiales			
Poids (g)	16,8 ± 1,9 (46,7)	^a 21,6 ± 1,6 (33,2)	16,5 ± 1,5 (36,8)
Longueur (cm)	11,3 ± 0,4 (13,2)	^a 12,2 ± 0,3 (10,6)	11,1 ± 0,3 (11,7)
Coefficient de condition	^{**} ^a 1,16 ± 0,02 (6,1)	^a 1,15 ± 0,01 (5,1)	^b 1,11 ± 0,02 (5,7)
Données finales			
Poids (g)	^{ooo} ^b 21,5 ± 1,9 (36,23)	^{ooo} ^a 25,3 ± 1,5 (26,6)	^{ooo} ^{ab} 20,1 ± 1,5 (30,7)
Longueur (cm)	^b 12,0 ± 0,3 (11,6°)	^a 12,6 ± 0,3 (9,7°)	^{ab} 11,6 ± 0,3 (10,7°)
Coefficient de condition	^{ooo} [*] ^a 1,24 ± 0,03 (8,7)	^{ooo} ^a 1,22 ± 0,01 (4,8)	^{ooo} ^b 1,20 ± 0,02 (5,6)
Croissance relative (% poids initial)	^{ab} 32,1 ± 3,6 (45,8)	^{**} ^b 19,6 ± 2,9 (65,5)	^a 24,6 ± 3,4 (56,5)
Gain moyen quotidien (g)	0,13 ± 0,02 (50,1)	0,10 ± 0,01 (62)	0,10 ± 0,01 (59,2)
Croissance spécifique (%/jour)	^{ab} 0,74 ± 0,08 (42,5)	^{**} ^b 0,47 ± 0,06 (61,8)	^a 0,58 ± 0,07 (53,6)
Taux d'alimentation journalier (%)	2,11	1,73	1,17
Indice de conversion alimentaire	3,16	4,06	3,23
Coefficient d'efficacité protéique	1,06	0,76	0,86

Moyenne ± erreur standard (coefficient de variation) ; coefficient de variation = 100 × écart-type / moyenne,

Différences significatives :

- Entre données finales et initiales pour chaque type d'aliment : ° (P < 0,05), ^{ooo} (P < 0,001), test T,
- Entre les 3 types d'aliments, indiquées par des lettres différentes : a, b (P < 0,05), test de Duncan,
- Entre les aliments 0% et 20% algues, d'une part, et l'aliment Biomar, d'autre part :
^{*} (P < 0,05), ^{**} (P < 0,01), ^{***} (P < 0,001) ; test de Bonferroni.

Annexe Tableau 8 : Résultats détaillés obtenus avec les petits *Mugil cephalus* nourris avec l'aliment 20% algue.

Paramètre	14/10/19	06/11/19	06/12/19	10/01/20
Poids (g)	15,6 ± 1,1 (37,5)	°°° 22,1 ± 1,6 (37,0)	°°° 25,1 ± 1,5 (31,6)	°°° 34,9 ± 2,0 (28,8)
Longueur (cm)	10,5 ± 0,3 (12,7)	°°° 11,6 ± 0,2 (10,7)	°°° 12,1 ± 0,2 (10,4)	°°° 13,5 ± 0,3 (9,5)
Coefficient de condition	1,32 ± 0,01 (14,9)	1,35 ± 0,04 (4,9)	1,37 ± 0,01 (5,0)	1,38 ± 0,01 (50,4)

	Phase 1 (21 jours)	Phase 2 (27 jours)	Phase 3 (32 jours)	Durée totale (80 jours)
Paramètre	14/10 – 06/11/19	06/11 – 06/12/19	06/12/19 – 10/01/20	14/10/19 – 10/01/20
Croissance relative (% poids initial)	41,9 ± 3,9 (48,0)	° 18,6 ± 5,7 (159,1)	°° 38,5 ± 2,6 (34,3)	130,2 ± 8,7 (34,2)
Gain moyen quotidien (g)	0,30 ± 0,03 (90,6)	°°° 0,11 ± 0,02 (39,1)	°°° 0,30 ± 0,02 (39,1)	0,24 ± 0,02 (34,3)
Croissance spécifique (%/jour)	1,61 ± 0,16 (50,4)	°° 0,56 ± 1,14 (126,6)	°° 1,00 ± 0,06 (30,9)	1,02 ± 0,05 (50,3)
Taux d'alimentation journalier (%)	5,39	2,30	2,23	2,89
Indice de conversion alimentaire	3,3	4,96	2,46	3,18
Coefficient d'efficacité protéique	0,94	0,62	1,25	0,97

Moyenne ± erreur standard (coefficient de variation) ; coefficient de variation = $100 \times \text{écart-type} / \text{moyenne}$,

Différences significatives entre la phase P et la phase P+1 : ° (P < 0,05), °° (P < 0,001), °°° (P < 0,001), test T,

Phases 1 et 2 assimilées dans les autres résultats du document à la phase 1 de *Liza ramada* et des muges d'espèces indéterminées, et la phase 3 assimilée à la phase 2.

Annexe Tableau 9 : Résultats détaillés obtenus avec les grands *Mugil cephalus* nourris avec l'aliment 20% algue.

Paramètre	06/11/19	06/12/19	10/01/20
Poids (g)	54,8 ± 12,0 (40,3)	°° 60,1 ± 12,9 (37,11)	°° 73 ± 15,4 (35,18)
Longueur (cm)	14,7 ± 1,8 (74,4)	°° 15,4 ± 1,7 (73,2)	° 16,4 ± 1,7 (35,42)
Coefficient de condition	1,33 ± 0,14 (7,5)	1,17 ± 0,03 (73,1)	1,23 ± 0,03 (73,1)

	Phase 1 (28 jours)	Phase 2 (33 jours)	Durée totale (61 jours)
Paramètre	06/11 – 06/12/19	06/12/19 – 10/01/20	6/11/19 – 10/01/20
Croissance relative (% poids initial)	12,8 ± 2,9 (75,8)	° 30,5 ± 4,9 (56,0)	45,04 ± 6,1 (44,9)
Gain moyen quotidien (g)	0,29 ± 0,09 (96,3)	0,39 ± 0,10 (75,8)	0,33 ± 0,09 (56,0)
Croissance spécifique (%/jour)	0,49 ± 0,09 (40,0)	0,42 ± 0,08 (110,9)	0,59 ± 0,07 (93,4)
Taux d'alimentation journalier (%)	2,20	1,51	1,60
Indice de conversion alimentaire	4,01	2,72	3,28
Coefficient d'efficacité protéique	0,77	1,13	0,94

Moyenne ± erreur standard (coefficient de variation) ; coefficient de variation = 100 × écart-type / moyenne,

Différences significatives entre la phase P et la phase P+1 : ° (P < 0,05), °° (P < 0,001), test T.

Annexe Tableau 10 : Estimation des performances globales et moyennes de *Liza ramada*.

	0% algue	20% algue	Granulé Biomar
Phase 1 (41 jours)			
poids initial (g)	29,4	29,5	29,3
protéines poissons (% MT)	14,70	14,70	14,70
protéines poissons (g)	4,32	4,34	4,31
croissance relative (% poids initial)	56,3	52,92	55,34
gain de poids (g)	16,6	15,6	16,2
poids final (g)	46,0	45,1	45,5
indice de conversion alimentaire	2,15	2,08	2,22
aliment consommé (g)	35,6	32,5	36,0
protéines aliment (% MT)	29,9	32,4	37,7
protéines consommées (g)	10,6	10,5	13,6
Phase 2 (37 jours)			
poids initial (g)	46,0	45,1	45,5
croissance relative (% poids initial)	47	47,4	63,2
gain de poids (g)	21,6	21,4	28,8
poids final (g)	67,5	66,5	74,3
protéines poissons (% MT)	16,60	17,30	17,00
qté protéines poissons (g)	11,21	11,50	12,63
indice de conversion alimentaire	1,85	1,92	1,99
aliment consommé (g)	40,0	41,1	57,2
protéines aliment (% MT)	29,9	32,4	36,1
protéines consommées (g)	11,9	13,3	20,7
Phase 1 + 2 (78 jours)			
rétention des protéines (g)	6,89	7,17	8,32
protéines consommées (g)	22,6	23,8	34,2
rétention de protéines (%)	30,5%	30,1%	24,3%
gain de poids (g)	38,1	37,0	45,0
coefficient d'efficacité protéique	1,69	1,55	1,31
croissance relative (% poids initial)	129,8	125,4	153,5
Gain moyen quotidien (g)	0,49	0,47	0,58
croissance spécifique (%/jour)	1,07	1,04	1,19
aliment consommé (g)	75,5	73,5	93,2
aliment consommé/jour (g)	1,0	0,9	1,2
poids moyen (g)	48,5	48,0	51,8
taux d'alimentation journalier (%)	2,00%	1,96%	2,31%
indice de conversion alimentaire	1,98	1,99	2,07
perte d'azote (g) *	2,51	2,66	4,15
perte d'azote / kg produit (g)	65,8	72,0	92,2

* Perte d'azote = (protéines consommées – rétention de protéines) / 6,25

Les chiffres en jaune sont fixés, les autres chiffres sont des calculs.

Annexe Tableau 11 : Qualité de l'eau durant le test d'alimentation.

Paramètre	Phase 1				Phase 2				Phases 1 et 2			
	Moyenne	Min	Max	N	Moyenne	Min	Max	N	Moyenne	Min	Max	N
Température (°C)	23,0 ± 0,3	19,1	27,9	45	°°° 26,6 ± 0,5	20,1	31	37	24,6 ± 0,3	19,1	31	82
pH	7,45 ± 0,02	7,24	7,83	44	7,50 ± 0,04	7,2	7,91	34	7,47 ± 0,02	7,2	7,91	78
O ₂ (% saturation)	131 ± 1	95	227	609	135 ± 1	59	220	492	133 ± 1	59	227	1101
CO ₂ (mg/L)	-	-	-	-	2,42 ± 1,31	1	5	12	-	-	-	-
N-(NH ₃ + NH ₄) (mg/L)	0,66 ± 0,05	0,24	1,76	32	°°° 0,21 ± 0,02	0,02	0,47	32	0,44 ± 0,04	0,02	1,76	64
N-NO ₂ (mg/L)	0,23 ± 0,07	0,01	1,80	32	0,17 ± 0,02	0	0,47	32	0,20 ± 0,04	0	1,8	64
N-NO ₃ (mg/L)	1,00 ± 0,10	0	2	31	°° 1,66 ± 0,15	0	3,2	31	1,33 ± 0,10	0	3,20	62
N total (mg/L)	1,91 ± 0,12	0,42	2,89	31	2,03 ± 0,18	0,04	4,09	31	1,97 ± 0,11	0,04	4,09	62
P-PO ₄ (mg/L)	0,67 ± 0,05	0,07	1,55	32	0,81 ± 0,08	0,09	1,74	33	0,74 ± 0,05	0,07	1,74	65

Moyenne ± erreur standard

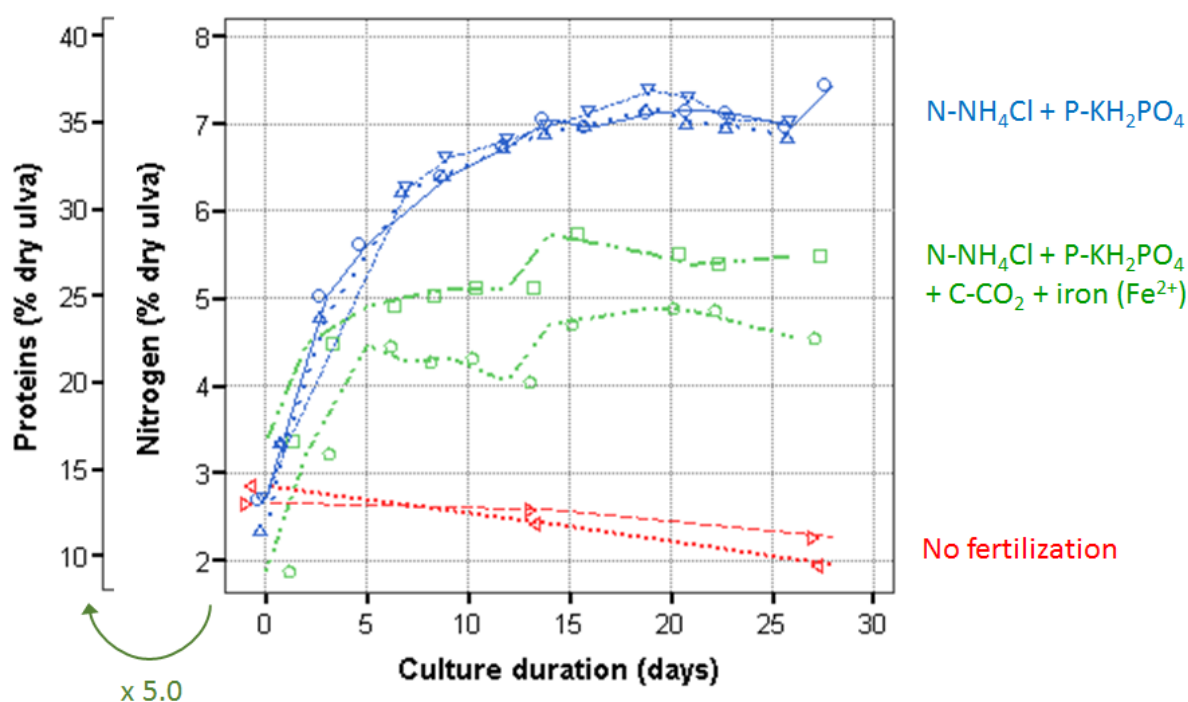
Différences significatives entre les 2 phases : °° (P < 0,01, °°° (P < 0,001), test T.

Annexe Tableau 12 : Estimation du prix des matières premières des aliments (prix de détail).

Matière première	Composition (%) ^a		Prix/kg (€) ^b	Prix/100 kg granulé (€)	
	0% farine algue	20% farine algue		0% farine algue	20% farine algue
Farine d'algue	-	20,15	?	-	-10,55
Tourteau de soja	40,24	20,19	0,79	31,85	15,98
Farine de maïs	15,18	14,58	0,42	6,33	6,08
Farine de pain	12,60	10,98	0,38	4,85	4,22
Farine de poisson	4,80	4,82	3,66	17,54	17,62
Gluten de blé	1,20	8,20	6,27	7,53	51,43
Huile de poisson	1,64	1,64	8,42	13,81	13,81
Levure de bière	1,96	1,97	8,48	16,63	16,71
Farine de lupin	16,57	11,15	3,38	56,06	37,72
Huile de soja	3,00	3,50	2,94	8,81	10,28
Prémix	1,85	1,86	11,92	22,05	22,11
CaPO ₄	0,96	0,97	7,52	7,22	7,26
			Total	192,68	203,23 + farine algue

^a En % de matière totale (humidité incluse),

^b Prix de détail auxquels ont été achetées les matières pour ce test d'alimentation.



Annexe Figure 7 : Evolution de la teneur en azote et en protéines de l'ulve (*Ulva rigida*) en fonction de la fertilisation minérale du milieu de culture (résultat non publié Philippe Cacot).

Note : Le coefficient multiplicateur de 5 entre l'azote et les protéines est assez « conservateur » (mais néanmoins proche de la réalité pour l'ulve). Il est en général et par convention fixé à 6,25 pour toutes les matières premières alimentaires, algues comprises ; appliqué ici, il majorerait sensiblement la teneur en protéines.

❖ Références

- Abreu M.H., Pereira R., Yarish C., Buschmann A.H. & Sousa-Pinto I. (2011) IMTA with *Gracilaria vermiculophylla*: Productivity and nutrient removal performance of the seaweed in a land-based pilot scale system. *Aquaculture* **312**, 77-87.
- Agrimer F. (2016) Pêche et aquaculture, Données et bilans, Consommation des produits de la pêche et de l'aquaculture 2015. 125 p www.franceagrimer.fr.
- Ben-Ari T., Neori A., Ben-Ezra D., Shauli L., Odintsov V. & Shpigel M. (2014) Management of *Ulva lactuca* as a biofilter of mariculture effluents in IMTA system. *Aquaculture* **434**, 493-498.
- Cacot P. (2016) Exploitation des macroalgues dans les systèmes intégrés multi-trophiques. Journée du SFAM (Syndicat Français des Aquaculteurs Marins) 17/03/2016. Présentation orale.
- Cacot P. (2019) Recyclage alimentaire en aquaculture : Test du remplacement de la farine de maïs par de la farine de pain dans un aliment pour muge (*Liza ramada*). Rapport d'activité CIRAD ISEM UMR116. Projet d'aquaculture durable coordonné par le CPIE du Bassin de Thau. 48 p.
- Felix N. & Brindo R.A. (2014) Evaluation of raw and fermented seaweed, *Ulva lactuca* as feed ingredient in giant freshwater prawn *Macrobrachium rosenbergii*. *International Journal of Fisheries and Aquatic Studies* 2014; 1(3): 199-204.
- Hussenot J. & Richard M. (2010) Des systèmes intégrés multi-trophiques pour une aquaculture durable. <http://archimer.ifremer.fr/doc/00001/11222/>.
- Maciel-Leite W. (2016) Mise en place d'un circuit fermé expérimental de pisciculture dans lequel les macroalgues ulves (*Ulva rigida*) sont utilisées comme unique biofiltre. In: *Biologie Aquatique et Environnement Méditerranéen et Tropical (BAEMT)*. Université de Montpellier, pp. 19.
- Maciel-Leite W. (2017) Utilisation des macroalgues comme unique filtre biologique en circuit fermé : optimisation des systèmes avec l'algue verte filamenteuse *Ulva intestinalis*. In: *Biologie Aquatique et Environnement Méditerranéen et Tropical (BAEMT)*. Université de Montpellier, pp. 31.
- Neori A., Chopin T., Troell M., Buschmann A.H., Kraemer G.P., Halling C., Shpigel M. & Yarish C. (2004) Integrated aquaculture: rationale, evolution and state of the art emphasizing seaweed biofiltration in modern mariculture. *Aquaculture* **231**, 361-391.
- Rey M. & Lobry T. (2017) Plan d'épandage du GAEC de Saintou. Chambre d'Agriculture du Tarn-et-Garonne - Service Pôle Elevage. 23 p http://www.tarn-et-garonne.gouv.fr/content/download/13701/88748/file/Plan_Epandage_Vf.pdf.
- Shpigel M., Ari T.B., Shauli L., Odintsov V. & Ben-Ezra D. (2016) Nutrient recovery and sludge management in seabream and grey mullet co-culture in Integrated Multi-Trophic Aquaculture (IMTA). *Aquaculture* **464**, 316-322.
- Soto D. (2009) Integrated mariculture: a global review. F A O Fisheries and Aquaculture Technical Paper. N o. 529. Rome, FAO. 183p.
- Tacon A.G.J., Metian M. & Hasan M.R. (2009) Feed ingredients and fertilizers for farmed aquatic animals: sources and composition. FAO Fisheries and Aquaculture Technical Paper. No. 540. Rome, FAO. 209p.
- Van Dyke J.M. & Sutton D.L. (1977) Digestion of duckweed (*Lemna* spp.) by the grass carp (*Ctenopharyngodon idella*). *Journal of Fish Biology* **11**, 273-278.



BASSIN DE THAU

Entre Terre et Lagune



60 boulevard Victor Hugo, 34 110 Frontignan



a.rumpler@cpiebassindethau.fr



04.67.24.07.55



www.cpiebassindethau.fr

Suivez-nous sur :

