

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
التعليم

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

تهينة الوطنية العليا



École Nationale Supérieure des Sciences de la Mer et de l'Aménagement du Littoral

THESE DE DOCTORAT

Domaine : Sciences de la nature et de la vie

Filière : Hydrobiologie marine et continentale

Spécialité : Exploitation des ressources ichthyologiques

Option : Aquaculture et Biotechnologie marine

**Effet de l'élevage en système biofloc sur les performances
zootecniques et physiologiques du Tilapia « *Oreochromis
niloticus* » : étude de la nutrition, des paramètres de la
croissance et de la reproduction**

Par

Ammar DILMI

Soutenu devant le jury composé de :

KACHER Mohamed	Professeur	ENSSMAL	Président
BOUFERSAOUI Samira	MCA	ENSSMAL	Examinatrice
BOUDJENAH Mustapha	MRA	CNRDPA	Examineur
KOURDALI Sidali	MRA	CNRDPA	Examineur
REFES Wahid	Professeur	ENSSMAL	Directeur de thèse
LOURGIOUI Hichem	MCB	ENSSMAL	Invité

2022 / 2023

، تطوير تربية المائيات القارية بصفة مستدامة يعتمد على التسيير الرشيد للموارد المائية المتوفرة. تقنية البيوفلوك التي تعتبر تقنية حديثة لإنتاج الأحياء المائية البيئة حيث تحتاج الى نسبة ضئيلة لتجديد المياه في الأحواض، يمكنها بديلاً للتنمية الجزائر. تهدف هذه تحسين آليات عمل تقنية البيوفلوك وتفاعلاته "Oreochromis niloticus" لهذا الغرض قمنا بدراسة تأثير وسط البيوفلوك على المتغيرات البيئية لمياه الأحواض والعوامل المتعلقة بالنمو والمتغيرات الفيزيولوجية لأسماك البلطي، وذلك بتطبيق نيتروجين . إمكانية البيوفلوك وتربية يرقات البلطي، تابعة التأثيرات البيوض واليرقات. تظهر هذه أنه يمكن النيتروجينية تقنية البيوفلوك طريقة تجديد المياه. يرتبط تقنية البيوفلوك التدريجي القلوية . أظهرت تأثير مستويات الكربون/ نيتروجين البيوفلوك تطبيق نسب بين 12 14 كافية الفيزيوكيميائية للمياه مستويات لتربية .

تظهر التقبلة الحيوانية والفيزيولوجية أي إيجابية البيوفلوك ومعامل التحويل الغذ الإنزيمات الهاضمة البلطي في مرحلة التسمين. من ناحية أخرى، لوحظ التحويل الغذائي ليرقات تربيتها 20 يوما تقنية البيوفلوك، الى تحفيز نشاط انزيمي الأميلاز هذه إمكانية تطبيق البيوفلوك البلطي النيلي، في أحواض تحضير الأمهات، سلبية البيوض واليرقات.

يساهم هذا توسيع تقنية البيوفلوك كنظام جديد السمكي، كما يظهر أهمية تطبيق هذه التكنولوجيا تربية تجريبي .

المفتاحية: تربية الأحياء المائية، البيوفلوك، كربون/ نيتروجين، النيلي الإنزيمات الهاضمة،

Abstract

In Algeria, the sustainable development of inland aquaculture requires rational management of available water resources. Biofloc technology (BFT), an environmentally friendly aquaculture method that operate with low water exchange rates, could serve as an alternative for the development of aquaculture activity in Algeria. The objective of this thesis is to gain a deeper understanding of the rearing process using biofloc technology and its interactions with the tilapia "*Oreochromis niloticus*" at various stages of development. For this purpose, we studied the effect of different carbon/nitrogen ratios within the biofloc system on water quality, zootechnical performances and physiological parameters of tilapia. Additionally, we explored the viability of employing the biofloc technology during the reproduction and larval rearing phases of tilapia, while assessing its effects on reproductive performance and offspring quality.

The results of this study indicate that nitrogenous substances in BFT system can be effectively controlled through the addition of external carbon sources, without the need for water renewal. The functioning of the BFT system is associated with a gradual accumulation of suspended solids in the water and a decrease in alkalinity and pH. This study shows maintaining C/N ratios between 12 and 14 in the BFT system is sufficient to maintain water quality parameters at acceptable levels for tilapia development. Furthermore, the investigation into zootechnical and physiological parameters revealed no positive effects of the BFT system on growth, feed utilization, and digestive and antioxidant enzymes activity in juvenile tilapia. Improved growth and feed utilization were observed for tilapia post-larvae reared for 20 days in the BFT system, which was associated with the stimulation of alpha-amylase and catalase activities. This study provides evidence of the feasibility of implementing the biofloc technology in tilapia hatcheries for broodstock storage and reproduction, without any detrimental effects on reproductive performance and offspring quality.

Overall, this work contributes to the expansion of knowledge on this novel production system and demonstrates the interest in promoting this emerging technology in pilot-scale tilapia breeding farms in Algeria.

Keywords: Aquaculture, biofloc, C/N ratio, Nile tilapia, digestive enzymes, antioxidant.

Résumé

En Algérie, le développement d'une aquaculture continentale durable requiert une gestion rationnelle des ressources hydriques disponibles. La technologie biofloc (BFT) est un nouveau système de production aquacole respectueux de l'environnement qui implique un faible renouvellement d'eau et pourrait constituer une alternative pour le développement de l'activité aquacole en Algérie. Cette thèse a pour objectif d'améliorer les connaissances sur le fonctionnement de ce système d'élevage et ses interactions avec le tilapia « *Oreochromis niloticus* » à différents stades de développement. Dans cette optique, nous avons étudié l'effet du milieu biofloc à différents ratios Carbone / Azote, sur les paramètres du milieu et les performances zootechniques et physiologiques du tilapia. Nous avons également examiné la possibilité d'utiliser le système BFT dans les phases de reproduction et d'élevage larvaire du tilapia, en évaluant ses effets sur les performances de reproduction et la qualité des progénitures.

Les résultats de cette étude montrent que les substances azotées peuvent être contrôlées dans le système BFT grâce à l'addition de sources de carbone dans le milieu d'élevage, sans avoir recours au renouvellement d'eau. Le fonctionnement de ce système est caractérisé par une accumulation progressive de matières en suspension dans l'eau et une diminution de l'alcalinité et du pH. L'étude de l'effet du ratio C/N en système BFT a montré que des ratios compris entre 12 et 14 sont suffisants pour maintenir les paramètres du milieu à des niveaux acceptables pour le développement du tilapia. Cependant, l'étude des paramètres zootechniques et physiologiques n'a pas démontré d'effets positifs du système BFT sur la croissance, l'efficacité alimentaire, l'activité des enzymes digestives et des enzymes antioxydants chez les juvéniles du tilapia. Par ailleurs, une amélioration de la croissance et de l'utilisation alimentaire a été observée chez les post-larves de tilapia élevées pendant 20 jours dans le système BFT, ce qui a été associée à une stimulation de l'activité de l'alpha-amylase et la catalase.

Cette étude montre la possibilité d'appliquer le système BFT dans les écloséries du tilapia pour le stockage et la reproduction des géniteurs, sans entraîner d'effets négatifs sur les performances de reproduction et la qualité des pontes.

Dans l'ensemble, ce travail contribue à l'élargissement des connaissances sur ce nouveau système de production et souligne l'intérêt de promouvoir cette technologie novatrice dans les fermes d'élevage du tilapia à l'échelle pilote en Algérie.

Mots clés : Aquaculture, biofloc, ratio C/N, tilapia du Nil, enzymes digestives, antioxydants.

A mon père et ma mère

A mon épouse

A mes frères et sœurs

A mes enfants Anis, Assil et Éline



A la mémoire de mon frère Fouad

et ma sœur Fatma zohra

Remerciements

En tout premier lieu, je remercie le bon Dieu « Allah » tout puissant de m'avoir donné le courage, la force et la patience d'achever ce modeste travail.

J'adresse tout particulièrement ma profonde reconnaissance à M. REFES Wahid, Professeur à l'ENSSMAL, d'avoir bien voulu accepté de diriger cette thèse et pour l'obligeance qu'il m'a toujours témoignée et ses précieuses directives. Je le remercie chaleureusement pour son soutien, sa compréhension, sa confiance et ses encouragements. La confiance qu'il m'a accordée a assuré le bon déroulement de cette recherche.

J'exprime ma sincère gratitude à Monsieur KACHER Mohamed, professeur à l'Ecole Nationale Supérieure des Sciences de la Mer et de l'Aménagement du Littoral (ENSSMAL) pour m'avoir honoré en acceptant de présider le jury de cette thèse.

Je tiens à exprimer mes sincères remerciements à Madame BOUFERSAOUI Samira, enseignante à l'ENSSMAL pour l'honneur qu'elle m'a fait en acceptant d'être membre du jury de cette thèse.

Mes remerciements vont également à Monsieur BOUDJENAH Mustapha, chercheur au Centre National de Recherche et du Développement de la Pêche et de l'Aquaculture (CNRDPA) pour avoir accepté de participer à l'évaluation de ce travail.

J'adresse également mes respectueux remerciements à Monsieur KOURDALI Sidali, chercheur au CNRDPA d'avoir accepté de faire partie de ce jury.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude envers le Centre National de Recherche et de Développement de la Pêche et de l'Aquaculture pour m'avoir accordé l'opportunité de réaliser la partie pratique de ma thèse au sein de cette institution.

J'exprime toute ma gratitude à Madame FERHANE Djamila, directrice de la station expérimentale de pisciculture marine de CNRDPA, pour m'avoir accordé l'opportunité de réaliser mes expériences au niveau de la station.

Je tiens à remercier également Monsieur MEKNACHI Abdellah, chercheur au niveau de CNRDPA, pour son soutien et ces orientations durant la réalisation des analyses biochimiques.

Je tiens à remercier l'équipe de la station expérimentale de pisciculture marine de Bousmail, pour leurs soutiens dans la partie pratique de ce travail.

Mes remerciements s'adressent également à l'équipe du laboratoire de la division des écosystèmes aquatiques de CNRDPA, pour leurs soutiens dans la réalisation des analyses physico-chimiques.

J'adresse également mes respectueux remerciements à Monsieur LOURGIOUI Hichem, enseignant à l'ENSSMAL, pour ces orientations et encouragements.

Je tiens à remercier tous ceux qui de près ou de loin ont contribué à la réalisation de ce travail, que ce soit par leur aide, leurs encouragements ou tout simplement leur amitié.

Liste des figures

	Page
Figure 1. Evolution de la Production mondiale de la pêche et de l'aquaculture des animaux aquatiques entre 1950 et 2020 (FAO, 2022).....	5
Figure 2. Evolution de la production aquacole mondiale par filière entre 1991 et 2020.....	6
Figure 3. Production halieutique de l'Algérie 2010-2019(ONS, 2022 ; MPPH).....	8
Figure 4. Production aquacole de l'Algérie 2010-2020 (ONS, 2022; MPPH)	8
Figure 5. Schéma du tilapia du Nil (source : www.fao.org).....	10
Figure 6. Répartition géographique d'Oreochromis niloticus (www.discoverlife.org).....	10
Figure 7. Différences morphologiques entre mâles () et femelles () du tilapia du Nil.....	12
Figure 8. Incubation buccale chez Oreochromis niloticus.....	13
Figure 9. Aperçu des stades du développement embryonnaire, larvaire et juvénile d'Oreochromis niloticus jusqu'à 20-25 jours post-fécondation.....	14
Figure 10. Eléments constitutifs de l'appareil digestif du tilapia : (E) Œsophage, (L) foie, (S) estomac, (GB) vésicule biliaire, (PH) segment hépatique de l'intestin, (Cp) intestin spirale, (GL) segment gastrique, (T) segment terminal, (Sp) Rate (Smith et al., 2000).	16
Figure 11. Le système de défense antioxydant des poissons (Hoseinifar et al., 2021)	22
Figure 12. Structure de biofloc (Castro-Nieto et al., 2012).....	25
Figure 13. Schéma du fonctionnement du BFT dans un bassin piscicole (Crab et al., 2012)....	26
Figure 14. Chambre de décantation pour le contrôle de MES (Avnimelech, 2012).....	28
Figure 15. Système d'aération dans un bassin du tilapia en BFT (Avnimelech, 2011).....	29
Figure 16. Bassins d'élevage en système BFT de la ferme de crevetticulture de Ouargla (source : CNRDPA).....	32
Figure 17. Plan global de la SEPM, montrant les lieux de déroulement des expériences.....	34
Figure 18. Schéma de calcul pour déterminer la quantité de source de carbone nécessaire pour neutraliser l'azote inorganique généré par 1 kg d'aliment à 30 % de protéines, en système BFT (Avnimelech, 2012; Crab et al., 2012).....	35
Figure 19. Schéma de calcul pour déterminer la quantité de source de carbone nécessaire, selon la teneur en AAT dans le bassin d'élevage (Emerenciano et al., 2017)	36

Figure 20. Schéma de calcul pour déterminer la quantité de source de carbone nécessaire pour neutraliser l'azote inorganique généré par 1 kg d'aliment à 30% de protéines (Duy & Van Khanh, 2018; Xu et al., 2016).....	37
Figure 21. Courbe d'étalonnage de glucose.....	38
Figure 22. Courbe d'étalonnage de l'ammonium.....	40
Figure 23. Courbe d'étalonnage des nitrites.....	41
Figure 24. Mesure du volume de floc avec le cône Imhoff.....	42
Figure 25. Evolution des paramètres du milieu dans les 3 bacs d'élevage au cours de la période de l'expérience : (a) Ammonium (b) Nitrites (c) Alcalinité (d) Volume du floc	46
Figure 26. Bacs d'élevage des juvéniles du tilapia en système BFT et en circuit ouvert.....	52
Figure 27. Schéma de fonctionnement des bacs expérimentaux.....	53
Figure 28. Système de décantation du floc.....	54
Figure 29. Collecte des poissons à la fin de l'expérience.....	55
Figure 30. Opération de dissection et conservation des échantillons.....	56
Figure 31. Courbe d'étalonnage de tyrosine.....	57
Figure 32. Courbe d'étalonnage de maltose.....	59
Figure 33. Courbe d'étalonnage des protéines.....	62
Figure 34. Echantillons d'eau prélevés des bacs BFT.....	64
Figure 35. Biofloc sous-microscope.....	64
Figure 36. Évolution des concentrations moyennes \pm déviations standards des substances azotées dans les 03 groupes BFT à différents ratios C/N et dans le groupe contrôle au cours de l'expérience : (a) NH_4^+ , (b) NO_2^- , (c) NO_3^-	67
Figure 37. Évolution des concentrations moyennes \pm déviations standards des paramètres du milieu dans les 03 groupes BFT à différents ratio C/N et dans le groupe contrôle durant la période de l'expérience : (d) ALC (e) MES, (f) VF.....	68
Figure 38. Activité spécifique des protéases (moyennes \pm déviations standards) dans le tube digestif (a) et le foie (b) des juvéniles de tilapia élevés dans les 04 groupes expérimentaux.....	71
Figure 39. Activité spécifique de l'alpha-amylase (moyennes \pm déviations standards) dans le tube digestif (c) et le foie (d) des juvéniles de tilapia élevés dans les 04 groupes expérimentaux.....	72

Figure 40. Activité spécifique (moyennes \pm déviations standards) de la catalase (a) et de la superoxyde dismutase (b) dans le foie des juvéniles de tilapia issus des 04 groupes expérimentaux.....	73
Figure 41. Schéma de l'unité expérimentale du stockage des géniteurs.....	83
Figure 42. Unité de reproduction du tilapia.....	85
Figure 43. Collecte et désinfection des œufs.....	87
Figure 44. Comptage des œufs du tilapia.....	87
Figure 45. Unité d'incubation en circuit fermé.....	88
Figure 46. Unité d'incubation en circuit ouvert.....	89
Figure 47. Biométrie des œufs du tilapia.....	90
Figure 48. Biométrie des larves du tilapia à J0 (a) et à J5 (b) post-éclosion.....	90
Figure 49. test d'exposition à l'air.....	91
Figure 50. Évolution des concentrations moyennes \pm déviations standards des substances azotées dans les bacs de stockage des géniteurs des groupes BFT et C : (a) NH_4^+ , (b) NO_2^- , (c) NO_3^-	94
Figure 51. Évolution des concentrations moyennes \pm déviations standards de l'alcalinité (d) et du volume du floc (e) dans les bacs de stockage des géniteurs des groupes BFT et C.....	95
Figure 52. Floc issu des bacs de pontes au début de l'expérience (a) et à la fin de l'expérience (b)	96
Figure 53. Biométrie des œufs du tilapia issues des géniteurs des groupes BFT et C (moyennes \pm déviations standards) : (a) diamètre en mm, (b) volume en mm^3	99
Figure 54. Longueurs moyennes \pm déviations standards des larves du tilapia issues des géniteurs des groupes BFT et C, à J0 (a) et à J5 (b) post-éclosion.....	100
Figure 55. Taux de survie (moyennes \pm déviations standards) des larves du tilapia après le test de salinité (a) et d'exposition à l'air (b).....	101
Figure 56. Unité d'élevage des post-larves du tilapia.....	110
Figure 57. Schéma du circuit de recirculation des aquariums du groupe contrôle.....	111
Figure 58. Homogénéisation des échantillons de post-larves.....	113
Figure 59. Évolution des concentrations moyennes \pm déviations standards de l'ammonium (a), les nitrites (b), les nitrates NO_3^- (c), l'alcalinité (d) et le volume du floc (e) dans les aquariums des groupes BFT et C.....	115

Figure 60. Activité de l'alpha-amylase (A) et des protéases (B) chez les larves du tilapia après 20 jours et 43 jours d'élevage dans les 2 traitements BFT et C (moyennes \pm déviations standards)..... 117

Figure 61. Activité de la Catalase (A) et de la SOD (B) chez les larves du tilapia après 20 jours et 43 jours d'élevage dans les 2 groupes BFT et C (moyennes \pm déviations standards)..... 118

Liste des tableaux

	Page
Tableau 1. Production des 10 premières espèces de la pisciculture mondiale en 2020 (FAO, 2022).	06
Tableau 2. Statistiques de production du tilapia en Algérie entre 2017-2021 (source : MPPH).....	09
Tableau 3. Taxonomie d' <i>Oreochromis niloticus</i>	09
Tableau 4. Limites et optimums des paramètres du milieu pour le tilapia du Nil.....	11
Tableau 5. Besoins en acides aminés essentielles pour le tilapia du Nile, exprimés en pourcentage des protéines (Santiago & Lovell, 1988).....	18
Tableau 6. Techniques de production d' <i>O. niloticus</i> monosexes utilisés en aquaculture (Mair et al., 1997 ; El-Sayed, 2006 ; Baroiller et al., 2009; Fuentes-Silva et al., 2013).....	24
Tableau 7. Principaux paramètres à contrôler en système BFT et leurs optimales et / ou normales gammes (Emerenciano et al., 2017).....	30
Tableau 8. Mise en charge des bacs d'élevage.....	35
Tableau 9. Valeurs moyennes \pm déviations standards des paramètres physico-chimiques dans les bacs d'élevage du tilapia en système BFT, à trois densités de stockage.....	44
Tableau 10. Performances zootechniques des tilapias élevés à 3 densités d'élevage en système BFT.....	47
Tableau 11. Valeurs moyennes \pm déviations standards des paramètres de la qualité de l'eau obtenues dans les bacs d'élevage pour les quatre traitements expérimentaux.....	65
Tableau 12. Valeurs moyennes \pm déviations standards des paramètres zootechniques des juvéniles du tilapia après 30 jours d'élevage dans les quatre groupe expérimentaux.....	69
Tableau 13. Valeurs moyennes \pm déviations standards des paramètres zootechniques des juvéniles de tilapia après 62 jours d'élevage dans les quatre groupe expérimentaux.....	70
Tableau 14. Mise en charge initiale des bacs d'élevage.....	84
Tableau 15. Valeurs moyennes \pm déviations standards des paramètres physico-chimiques dans les bacs de stockage des géniteurs	93
Tableau 16. Les valeurs moyennes des paramètres physico-chimiques dans les bacs de ponte...	96
Tableau 17. Performances de croissance pendant la phase de stockage des géniteurs en tenant compte les bacs des mâles et des femelles (moyennes \pm déviations standards)	97
Tableau 18. Performances de croissance pendant la phase de stockage des géniteurs en tenant compte des bacs des femelles seulement (moyennes \pm déviations standards).....	97
Tableau 19. Performances de reproduction chez les géniteurs du tilapia élevés en système BFT et en eau claire (moyennes \pm déviations standards).	98

Tableau 20. Valeurs moyennes \pm déviations standards des paramètres physicochimiques dans les aquariums des groupes BFT et C.....	114
Tableau 21. Performances de croissance et de l'utilisation de l'aliment des post-larves du tilapia après 20 jours d'élevage dans les deux groupes expérimentaux BFT et C (moyennes \pm déviations standards).....	116
Tableau 22. Performances de croissance et de l'utilisation de l'aliment des post-larves du tilapia après 43 jours d'élevage dans les deux groupes expérimentaux BFT et C (moyennes \pm déviations standards).....	116
Tableau 23. Tableau synthétique des objectifs et des paramètres étudiés relatifs aux expériences réalisées dans le cadre de cette thèse.....	128

Liste des abréviations

- °C : Degrés Celsius
- AAT : Azote ammoniacal total
- ADN : Adénosine triphosphate
- AGPI : Acides gras polyinsaturé
- ALC : Alcalinité
- ANOVA : Analysis of Variance
- BFT : Biofloc technology
- ASB : Albumine de sérum bovin
- C/N : ratio carbone/azote
- CAT : Catalase
- CNRDPA : Centre National de Recherche et du Développement de la Pêche et de l'aquaculture
- COVID : Coronavirus disease
- CV : Coefficient de variation
- DHA : Acide docosahexaénoïque
- DNS : Acide dinitrosalicylique
- DO : Oxygène dissous
- DS : Déviation standard
- EPA : Acide eicosapentaénoïque
- ERO : Eléments réactifs de l'oxygène
- FAO : Food and Agriculture Organization
- FD : Facteur de dilution
- Fig. : Figure
- FSD : Densité finale de stockage
- GB : Gain de biomasse
- GMQ : Gain du poids moyen quotidien
- GPx : Glutathion peroxydase
- GR : Glutathion réductase
- GTH : Glutathion
- H : Heure
- H₂O₂ : Eau oxygénée
- ha : Hectare
- IC : Indice de conversion alimentaire

- IMTA : Integrated Multi-Trophic Aquaculture
- k : Coefficient de condition
- L : Litre
 - ml : Millilitre
- m : Masse
- MES : Matières en suspension
- min : Minute
- MPPH : Ministère de la Pêche et des Productions Halieutiques
- Mt : Millions de tonnes
- NADPH : Nicotinamide adénine dinucléotide phosphate
- NH₃: Ammoniac
- NH₄⁺: Ammonium
- nm: Nanomètre
- NO₂⁻ : Nitrites
- NO₃⁻ : Nitrates
- ONS : Office National des Statistiques
- PM : Poids moyen individuel
- PNA : Polysaccharides non amylacés
- PP : Polypropylène
- PVC : Polyvinyle chloride
- R² : Coefficient de détermination
- RAS : Recirculating aquaculture system
- S (%) : Taux de survie
- SEPM : Station expérimentale de pisciculture marine
- SOD : Superoxyde dismutase
- TCA : Acide trichloroacétique
- TCR : Taux de croissance relatif
- TCS : Taux de croissance spécifique
- tr/mn : Tours par minute
- USD : Dollars américain
- V : Volume
- VF : Volume du floc
- W : Watt

Sommaire

Introduction.....	1
Chapitre I : Synthèse bibliographique	
1. Contexte de l'aquaculture.....	5
1.1. Situation de l'aquaculture mondiale.....	6
1.2. Situation de la tilapiculture mondiale.....	7
1.3. Situation de l'aquaculture en Algérie.....	9
2. Le modèle biologique : Tilapia du Nil « <i>Oreochromis niloticus</i> »	9
2.1. Systématique et morphologie.....	9
2.2. Origine et répartition géographique.....	10
2.3. Exigences écologiques.....	10
2.4. Croissance.....	11
2.5. Reproduction et production d'alevins.....	12
2.5.1. Dimorphisme sexuel et maturité.....	12
2.5.2. Mode de reproduction.....	13
2.6. Nutrition.....	15
2.6.1. Régime alimentaire.....	15
2.6.2. Anatomie et fonctionnement de l'appareil digestif.....	15
2.6.3. Enzymes digestives.....	16
2.6.3.1. Les enzymes protéolytiques.....	16
2.6.3.2. Les enzymes glycolytiques.....	17
2.6.3.3. Les enzymes lipolytiques.....	17
2.6.4. Besoins nutritionnels.....	17
2.6.4.1. Protéines.....	17
2.6.4.2. Lipides.....	18
2.6.4.3. Carbohydrates.....	19
2.6.4.4. Vitamines et minéraux.....	19
2.7. Stress oxydatif et système de défense antioxydant.....	20
2.8. Systèmes de production du tilapia.....	22
2.8.1. Elevage du tilapia en système semi-intensif.....	22
2.8.2. Elevage du tilapia en système intensif.....	23
2.9. Production d'alevins monosexes.....	24
3. Le système biofloc.....	25
3.1. Principe de fonctionnement.....	25
3.2. Rôle des microorganismes en système BFT.....	26
3.3. Type de biofloc et voie d'élimination de l'ammonium.....	26
3.4. Espèces adaptées à l'élevage en système BFT.....	27
3.5. Principaux paramètres contrôlés en système BFT.....	27
3.5.1. Ratio C/N.....	27
3.5.2. Matières en suspension.....	28
3.5.3. Agitation et aération.....	29
3.5.4. Alcalinité.....	29
3.6. Biofloc comme source d'alimentation.....	29
3.7. Biofloc et biosécurité.....	31
3.8. Biofloc en Aquaculture Multi-trophique Intégrée.....	31
3.9. Système BFT en Algérie.....	32
Chapitre II : Evolution des paramètres physico-chimiques durant le développement initial du biofloc « start-up »	
1. Matériel et méthodes.....	34
1.1. Lieu et origine des poissons.....	34

1.2. Dispositif expérimental.....	34
1.3. Calcul de la quantité de source de carbone nécessaire.....	35
1.4. Dosage des glucides.....	37
1.5. Suivi des paramètres du milieu.....	37
1.5.1. Température, oxygène dissous et pH.....	39
1.5.2. Ammonium.....	39
1.5.3. Nitrites.....	40
1.5.4. Alcalinité.....	41
1.5.5. Volume de floc.....	42
1.6. Collecte des poissons et détermination des paramètres de croissance.....	43
1.7. Analyse des données.....	43
2. Résultats.....	44
2.1. Teneurs en glucides.....	44
2.2. Evolution des paramètres du milieu.....	44
2.3. Paramètres de croissance.....	46
3. Discussions.....	47
3.1. Paramètres du milieu.....	47
3.2. Performances de croissance.....	49

Chapitre III : Effets du ratio C/N sur les performances d'élevage des juvéniles du tilapia en système biofloc

1. Matériel et méthodes.....	51
1.1. Lieu et période.....	51
1.2. Dispositif expérimental.....	51
1.3. Mise en charge et protocole d'élevage.....	52
1.4. Suivi des paramètres du milieu.....	53
1.5. Paramètres zootechniques.....	55
1.6. Echantillonnage et dissection.....	55
1.7. Préparation des homogénats.....	56
1.8. Dosage de l'activité des enzymes digestives.....	56
1.8.1. Protéases.....	56
1.8.2. Alpha-amylase.....	58
1.9. Dosage des enzymes antioxydants.....	60
1.9.1. Catalase.....	60
1.9.2. Superoxyde dismutase.....	61
1.10. Dosage des protéines.....	62
1.11. Analyses statistiques.....	63
2. Résultats.....	64
2.1. Paramètres du milieu.....	64
2.2. Paramètres zootechniques.....	69
2.3. Activité des enzymes digestives.....	70
2.4. Activité des enzymes antioxydants.....	72
3. Discussions.....	73
3.1. Paramètres du milieu.....	73
3.2. Performances zootechniques.....	76
3.3. Activité enzymatique.....	78

Chapitre IV : Effets du système biofloc sur les performances de reproduction du tilapia et la qualité des progénitures

1. Matériel et méthodes.....	82
1.1. Phase de stockage des géniteurs.....	82
1.1.1. Dispositif expérimental et mise en charge.....	82
1.1.2. Suivi des paramètres du milieu.....	84

1.1.3. Paramètres zootechniques.....	84
1.1.4. Analyses statistiques.....	85
1.2. Reproduction et élevage larvaire.....	85
1.2.1. Dispositif expérimental.....	85
1.2.2. Collecte des œufs.....	86
1.2.3. Incubation et élevage larvaire.....	87
1.2.4. Echantillonnages et biométrie.....	89
1.2.5. Tests de résistance des larves.....	91
1.2.5.1. Test au choc osmotique.....	91
1.2.5.2. Test d'exposition à l'air.....	91
1.2.6. Analyses statistiques.....	92
2. Résultats.....	92
2.1. Paramètres du milieu.....	92
2.2. Performances de croissance en phase de stockage.....	96
2.3. Performances de reproduction.....	98
2.4. Biométrie des œufs.....	99
2.5. Biométrie des larves.....	99
2.6. Résistance des larves.....	100
3. Discussions.....	101
3.1. Paramètres du milieu.....	101
3.1.1. Bacs de stockage de géniteurs.....	101
3.1.2. Bacs de ponte.....	103
3.2. Performances de croissance en phase de stockage des géniteurs.....	103
3.3. Performance de reproduction et qualité des pontes.....	105

Chapitre V : Influence du système biofloc sur les performances d'élevage des premiers stades du développement du tilapia

1. Matériel et méthodes.....	110
1.1. Dispositif expérimental.....	110
1.2. Suivi des paramètres du milieu.....	112
1.3. Performances zootechniques.....	112
1.4. Echantillonnage et dosages enzymatiques.....	112
1.5. Analyses statistiques.....	113
2. Résultats.....	113
2.1. Paramètres du milieu.....	113
2.2. Performances de croissance.....	115
2.3. Activité des enzymes digestives.....	117
2.4. Activité des enzymes antioxydants.....	117
3. Discussions.....	118
3.1. Paramètres du milieu.....	118
3.2. Performances zootechniques.....	119
3.3. Activité enzymatique.....	121
Discussion générale.....	123
Conclusion générale et perspectives.....	129
Références bibliographiques.....	133
Annexes.....	153

Introduction

La production mondiale de la pêche a connu une stagnation depuis 2 décennies (FAO, 2022), à cause de la limite des stocks halieutiques dans le milieu naturel. L'aquaculture qui représente une alternative pour l'approvisionnement de la population mondiale croissante, elle a connu une croissance continue, avec un taux annuel moyen de croissance de 5 % entre 1994 et 2015. La production aquacole mondiale d'espèces animales a progressé de 2,7 % en 2020 par rapport à 2019 (FAO, 2022).

En Algérie, la production aquacole reste relativement faible, représentant seulement 5.2% de la production halieutique en 2021, malgré l'augmentation de la production au cours de ces dernières années, atteignant 5367 tonnes en 2020 (ONS, 2022). Le ministère de la pêche a élaboré un plan ambitieux visant à promouvoir le développement de l'aquaculture. Ce programme met l'accent sur la promotion de la pisciculture marine en cages flottante, la pêche continentale et la pisciculture intégrée à l'agriculture (MPRH, 2014). Le tilapia, un poisson des eaux chaudes introduite en Algérie depuis 2002 (Seridi, 2011), représente un excellent candidat pour l'aquaculture continentale par sa croissance rapide, son adaptation à l'élevage à haute densité, sa résistance aux pathologies, son régime alimentaire omnivore et son faible coût de production (Prabu et al., 2019).

Les régions du sud de l'Algérie ont un climat favorable à l'élevage des espèces des eaux chaudes, et ces zones disposent d'importantes ressources en eaux souterraines qui peuvent être valorisées en aquaculture. Cependant, une grande partie de cette ressource est constituée d'aquifères fossiles non renouvelables (Saker & Bouhoun, 2007), et son exploitation nécessite une gestion rationnelle et judicieuse pour un développement durable de l'aquaculture.

Les fermes aquacoles traditionnelles fonctionnant en systèmes ouverts requièrent un renouvellement important de l'eau et génèrent de grandes quantités de déchets qui sont rejetées directement dans l'environnement extérieur, ce qui est encore amplifiée par la tendance mondiale à l'intensification de la production aquacole (Edwards, 2015). Les rejets piscicoles sont constitués de rejets particuliers (aliments non consommés et matières fécales) et les déchets solubles (ammoniac, nitrites, nitrates et phosphore) (Miller & Semmens, 2002).

La gestion conventionnelle des déchets dans les systèmes de production aquacoles est basée sur le traitement des effluents en aval de l'unité d'élevage, en utilisant des bassins de décantation ou des systèmes de filtration mécanique et/ou biologique (Tucker et al., 2008). Cependant, ces

techniques génèrent des coûts de production supplémentaires et nécessitent un entretien fréquent (Crab et al., 2012).

La technologie biofloc (BFT) est une « eco-friendly » méthode d'aquaculture, basée sur le traitement des déchets au sein de l'unité d'élevage, permettant ainsi de limiter le renouvellement de l'eau à 0,5 - 1% par jour (Hargreaves, 2013; Singh et al., 2020).

Le principe de fonctionnement du BFT est basé sur l'addition d'une source de carbone externe dans le milieu d'élevage combiné à une forte aération pour favoriser le développement d'agrégats microbiens en suspension, qui comportent un mélange de bactéries, de microalgues, de zooplancton et de particules organiques (Cardona, 2015; Dauda, 2020). Les populations bactériennes jouent un rôle clé dans le contrôle de la qualité de l'eau en éliminant les substances azotées. En outre, le biofloc peut être utilisé comme source de nourriture pour les espèces aquacoles telles que les crevettes et le tilapia (Khanjani & Sharifinia, 2020) et peut contribuer à l'amélioration des mesures de biosécurité dans les systèmes de production aquacoles (Ahmad et al., 2017). La manipulation du ratio C/N dans le milieu par l'addition de quantités appropriées de source de carbone représente un élément clé dans le contrôle des paramètres du milieu dans le système BFT.

L'implémentation du système BFT en Algérie pourrait favoriser le développement de l'aquaculture, en particulier dans les régions où les ressources hydriques sont limitées. L'application de cette nouvelle technique d'élevage dans les fermes aquacoles commerciales nécessite une phase d'expérimentation et de tests pilotes afin d'optimiser les différents paramètres du système, ainsi que d'évaluer les performances et les risques associés.

Notre travail se focalise sur les essais d'élevage d'une espèce largement répandue dans l'aquaculture en Algérie « le tilapia du Nil » en système BFT, à différents stades de développement, avec optimisation de ratio C/N et du suivi de l'influence sur les performances zootechniques et physiologiques de cette espèce.

La démarche de cette étude consiste à :

- Effectuer une synthèse bibliographique sur l'état des connaissances actuelle concernant l'élevage de l'espèce « *Oreochromis niloticus* » et le système BFT (chapitre I).
- Suivre des paramètres du milieu pendant la phase de démarrage du biofloc « start-up phase », qui représente la période de maturation du floc et la stabilisation des populations microbiennes (chapitre II).

- Etudier l'effet de la variation de ratio C/N sur les paramètres du milieu, les performances zootechniques et les variables physiologiques des différents stades de développement du tilapia (juvéniles et adultes) (chapitre III et IV).
- Evaluer l'utilisation du système BFT dans les écloséries du tilapia, avec étude de l'effet de stockage des géniteurs en milieu BFT sur les performances de reproduction et la qualité des progénitures (chapitre IV).
- Etudier de l'effet de l'élevage en système BFT sur les performances des premiers stades de développement du tilapia (phase larvaire), avec suivi des paramètres du milieu et des performances zootechniques et physiologiques (chapitre V).

Chapitre I

Synthèse bibliographique

1. Contexte de l'aquaculture

1.1. Situation de l'aquaculture mondiale

Selon le rapport de la FAO (2022), la production mondiale de la pêche et de l'aquaculture a atteint 214 millions de tonnes (Mt) en 2020, dont 178 Mt d'animaux aquatiques et 36 millions de tonnes d'algues. Dans la part de la production totale d'animaux aquatiques (178 Mt pour une valeur de 406 milliards USD), la pêche de capture a contribué de 90 Mt (51%) pour une valeur de 141 milliards USD et l'aquaculture à hauteur de 88 Mt (49%) pour une valeur de 265 milliards USD.

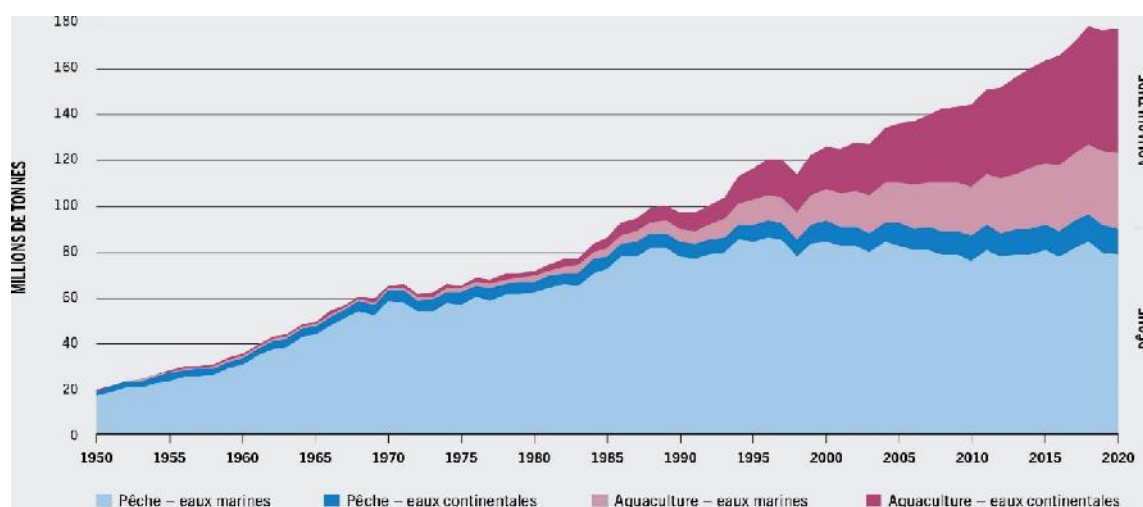


Figure 1. Evolution de la Production mondiale de la pêche et de l'aquaculture des animaux aquatiques entre 1950 et 2020 (FAO, 2022)

Au cours des trois dernières décennies, la production mondiale de la pêche demeure stable autour de 90 Mt, comme le montre la figure 1. Un pic de 96 Mt a été enregistré en 2018, suivi par une baisse de 4.5% en 2019 et de 2.1% en 2020 (FAO, 2022). Ces diminutions sont dues aux fluctuations des captures de petits pélagiques ainsi qu'aux répercussions de la pandémie de COVID19.

Par ailleurs, la production aquacole, qui est le principal moteur de la croissance de la production totale, a continué de progresser au cours des deux dernières années, bien que à un rythme plus lent (3,3 % en 2018-2019 et 2,6 % en 2019-2020) par rapport à une moyenne de 4,6% par an sur la période 2010-2018 (FAO, 2022). Cette diminution de la croissance est principalement due aux répercussions de la pandémie de COVID19.

La production de pisciculture s'élève à 57,5 millions de tonnes et représente la part la plus importante de la production aquacole (fig.2). De cette production, 85% provient de la pisciculture continentale et 15% de la mariculture (FAO, 2022).

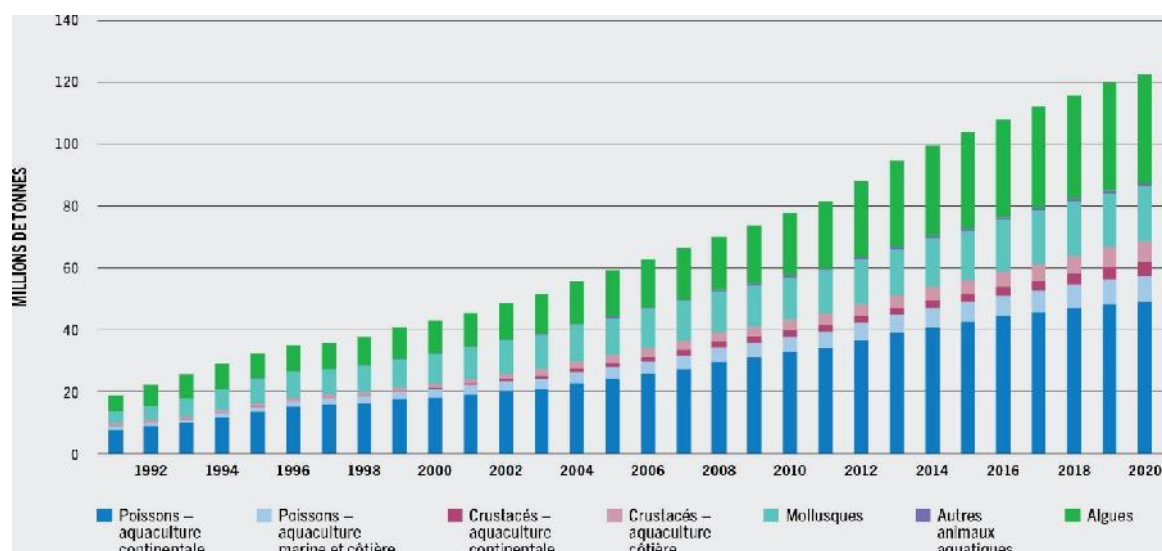


Figure 2. Evolution de la production aquacole mondiale par filière entre 1991 et 2020 (FAO, 2022)

1.2. Situation de la tilapiculture mondiale

Le tilapia du Nil occupe le 3^{ème} rang dans le top 10 des principales espèces de poissons produites dans le monde, derrière la carpe herbivore et la carpe argentée (tableau1), avec une production totale dépassant les 4.4 Mt. A cela, s'ajoute la production des autres espèces du tilapia qui a dépassée 1 Mt (FAO, 2022). La Chine est le principal pays producteur des tilapias, avec une production qui a dépassé les 1.6 Mt en 2015, suivi par l’Egypte avec une production autour de 800000 tonnes (Prabu et al., 2019).

Tableau1. Production des 10 premières espèces de la pisciculture mondiale en 2020 (FAO, 2022).

	Espèce	Production en Mt	Part de la production piscicole mondiale
1	Carpe herbivore (<i>Ctenopharyngodon idellus</i>)	5.79	10.1 %
2	Carpe argentée (<i>Hypophthalmichthys molitrix</i>)	4.9	8.5 %
3	Tilapia du Nil (<i>Oreochromis niloticus</i>)	4.41	7.7 %
4	Carpe commune (<i>Cyprinus carpio</i>)	4.24	7.4 %
5	Catla (<i>Catla catla</i>)	3.54	6.2 %
6	Carpe à grosse tête (<i>Hypophthalmichthys nobilis</i>)	3.19	5.5 %
7	Carassin (<i>Carassius spp.</i>)	2.75	4.8 %
8	Saumon de l’Atlantique (<i>Salmo salar</i>)	2.72	4.7 %
9	Silure requin (<i>Pangasianodon hypophthalmus</i>)	2.52	4.4 %
10	Labéo Roho (<i>Labeo rohita</i>)	2.48	4.3 %
	Total	36,54	63.5 %

1.3. Situation de l'aquaculture en Algérie

La production halieutique totale de l'Algérie (pêche et aquaculture) a atteint les 91400 tonnes en 2021. Cette production est issue principalement de la pêche des poissons pélagiques (> 70 % des productions durant ces dernières années) (ONS, 2021).

A l'instar de la production halieutique mondiale, la pêche en Algérie a connu une stagnation de la production depuis plus d'une décennie autour de 100 milles tonnes/an (fig.3), avec un pic de 120000 t enregistré en 2018. Le déficit de la production est partiellement comblé par l'importation des produits aquatiques, qui ont atteints 35000 t en 2019, pour une valeur de 117 millions USD (ONS, 2021).

L'aquaculture qui représente une alternative pour pallier au manque des produits de la pêche, a connu une évolution très lente entre 2010 et 2016 (fig.4), avec des productions annuelles comprises entre 2000 et 3000 t. A partir de 2017, la production aquacole a connu une augmentation pour dépasser les 5000 t en 2018 (ONS, 2022). Cette augmentation est liée à la mise en production de plusieurs projets de pisciculture marine en cages flottantes et au développement de la pisciculture intégrée dans les régions de l'intérieur du pays. La production aquacole en 2021 a atteint 4788 t, dont 54.6% provient de l'aquaculture marine (pisciculture en cages et conchyliculture) et 45.4% de l'aquaculture continentale (pêche continentale et pisciculture en eau douce) (ONS, 2022).

Depuis 2018, la wilaya de Chlef (leader de la pisciculture marine en cages) est devenue le premier producteur de l'aquaculture en Algérie avec une production de 1519 t en 2018 et 1184 en 2019, suivie par la Wilaya de Ain Defla avec 621 t en 2018 et 1033 t en 2019 (ONS, 2021).

Contrairement à la tendance mondiale de l'évolution de l'aquaculture, la production aquacole en Algérie reste relativement faible par rapport à la pêche maritime (seulement 5.2% de la production halieutique totale en 2021).

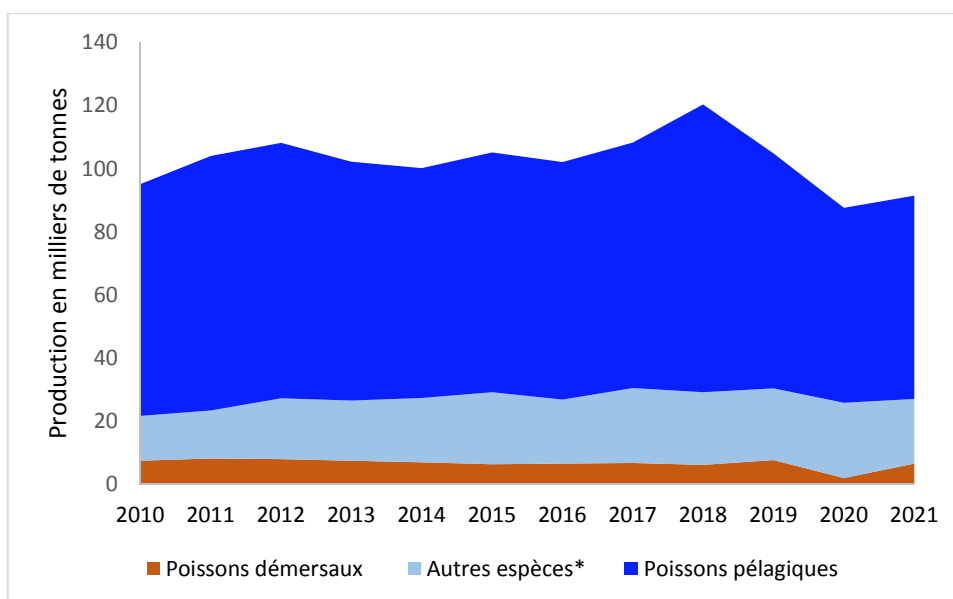


Figure 3. Production halieutique de l'Algérie 2010-2019, sources : (ONS, 2022 ; MPPH)
* mollusques, crustacés, raies et squales, pêche de plaisance, campagne de thon rouge et aquaculture

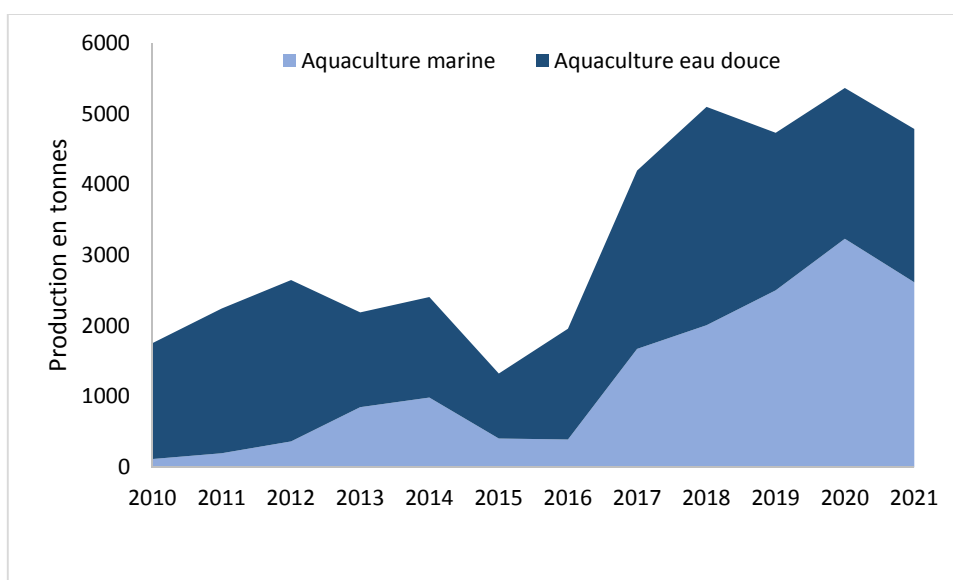


Figure 4. Production aquacole de l'Algérie 2010-2020, sources : (ONS, 2022; MPPH)

Les statistiques de production du tilapia en Algérie durant ces dernières années (tableau 2) ont montré de grands écarts dans les résultats de la production d'une année à l'autre. Un pic de production du tilapia est enregistré en 2017 pour 464 tonnes, suivi par une chute de production à 10 t en 2018 (source : services du MPPH). La production du tilapia en Algérie reste relativement faible, malgré l'entrée de production de plusieurs projets d'investissement, pour atteindre 14 projets en 2021.

Tableau 2. Statistiques de production du tilapia en Algérie entre 2017-2021 (source : MPPH)

Année	2017	2018	2019	2020	2021
Production aquacole continentale en t	2526	3087	2523	908	2172
Production du tilapia en t	464	10	377	421	100
Part du tilapia dans la production d'aquaculture continentale	18,4%	0,3%	14,9%	46,4%	4,6%
Nombre de projet du tilapia en production	5	6	7	7	14

2. Le modèle biologique : Tilapia du Nil « *Oreochromis niloticus* »

2.1. Systématique et morphologie

Le tilapia du Nil est une espèce appartenant à la famille des cichlidés, qui comprend plus de 1700 espèces (www.fishbase.org). Les Cichlidés font partie de l'ordre des Perciformes et se distinguent principalement par la présence d'une seule paire de narines, d'une nageoire dorsale continue entre les rayons épineux et mous, d'une ligne latérale interrompue ainsi que par la présence de mâchoires pharyngiennes évoluées à partir des premiers arcs branchiaux (Bezault, 1999).

Tableau 3. Taxonomie d'*Oreochromis niloticus* (www.inpn.mnhn.fr)

Règne	Animalia
Phylum	Chordata
Infra-phylum	Vertebrata
Super-classe	Gnathostomata
Classe	Actinopterygii
Ordre	Perciformes
Sous-ordre	Labroidei
Famille	Cichlidae
Genre	Oreochromis
Espèce	<i>Oreochromis niloticus</i> (Linnaeus 1758)

Le tilapia du Nil (fig.5) a une coloration grisâtre avec des nuances rosâtres sur la poitrine et les flancs, ainsi qu'une alternance de bandes verticales claires et noires nettement visibles, notamment sur la nageoire caudale et la partie postérieure de la nageoire dorsale. Le premier arc branchial comporte entre 18 et 28 branchiospines sur sa partie supérieure et entre 4 et 7 sur

sa partie inférieure. La nageoire dorsale est longue avec une partie antérieure épineuse (17-18 épines) et une partie postérieure molle (12-14 rayons). La nageoire caudale comporte 7 à 12 lignes noires bien visibles (Kestemont et al., 1989).

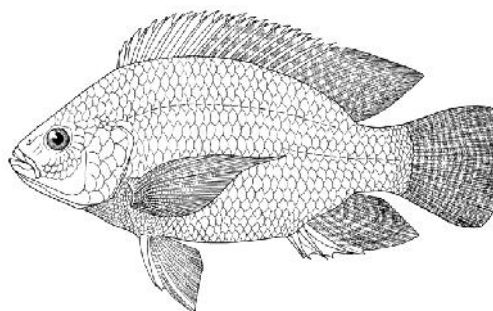


Figure 5. Schéma du tilapia du Nil (source : www.fao.org)

2.2. Origine et répartition géographique

L'espèce a une répartition originelle strictement africaine, couvrant dans l'Est de l'Afrique, les bassins du Nil, du Tchad, du Niger, de la Volta jusqu'au lac Tanganyika. En Afrique de l'Ouest, sa distribution s'étend aux bassins du Sénégal, de la Gambie, de la Volta, du Niger, de la Bénoué et du Tchad (Amoussou et al., 2016). Suite aux opérations d'introduction pour l'aquaculture, le tilapia du Nil est devenu une espèce largement répandue dans le monde (fig. 6).

Le tilapia du Nil a été introduit en Algérie en 2002 par l'importation de 3700 alevins à partir de l'Egypte (Seridi, 2011).

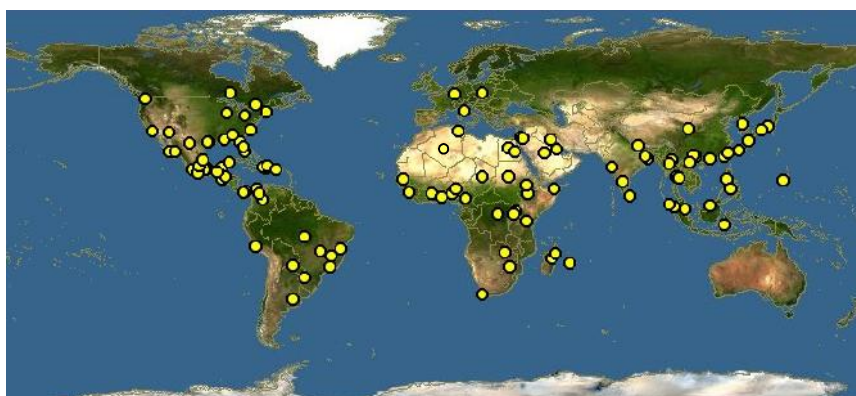


Figure 6. Répartition géographique d'*Oreochromis niloticus* (www.discoverlife.org)

2.3. Exigences écologiques

Le tilapia du Nil est une espèce relativement euryèce et eurytope adaptée à de larges variations des facteurs écologiques du milieu aquatique et colonisant des milieux extrêmement variés (Kestemont et al., 1989). Les normes strictes de la qualité de l'eau en élevage du tilapia sont

difficiles à définir à cause de l'interaction complexe entre les différents paramètres du milieu. Des facteurs tels que la température, le pH, la salinité, l'état sanitaire des poissons, le statut nutritionnel et les facteurs de stress peuvent influencer la détermination du seuil léthal d'un paramètre particulier (DeLong et al., 2009). Par exemple, la toxicité de l'azote ammoniacale est étroitement corrélée au pH de l'eau qui influence la balance entre la forme ionisée et la forme non ionisée qui est plus toxique (Popma & Lovshin, 1996).

Les valeurs recommandées des paramètres du milieu pour le tilapia, basées sur les informations publiées par différents auteurs, sont résumés dans le tableau 4.

Tableau 4. Limites et optimums des paramètres du milieu pour le tilapia du Nil

Paramètre	Seuils de tolérance	Gamme optimale	référence
Température °C	10 – 42	27 – 30	(DeLong et al., 2009; El-Sayed, 2006)
Oxygène dissous mg/L	> 0.8	> 5	
pH	5 - 11	6 - 9	
Salinité g/L	0 – 36	5 – 10	
Alcalinité mg/L	-	100 – 250	
AAT (mg/L)	-	<1	(El-Hack et al., 2022; El-Sayed, 2006; Emerenciano et al., 2017; Monsees et al., 2017; Popma & Masser, 1999)
Ammoniac (NH ₃) mg/L	>0.53	<0.05	
Nitrites (NO ₂ ⁻) mg/L	<27	< 1	
Nitrates (NO ₃ ⁻) mg/L	-	<500	
MES (mg/L)	-	<500	

2.4. Croissance

Oreochromis niloticus est connu pour sa croissance rapide par rapport aux autres espèces de tilapia. En milieu naturel, sa vitesse de croissance varie extrêmement selon les régions : 34 cm à 4 ans (lac Albert), 26 cm à 4 ans (lac Tchad), 24 cm à 4 ans (lac Mariout), avec le plus grand spécimen capturé dans le lac Turkana (64 cm) (Kestemont et al., 1989). Ces variations sont dépendantes des conditions environnementales et d'éventuelles différences génétiques.

Le tilapia du Nil présente un dimorphisme sexuel de croissance en faveur des mâles. Des différences significatives de la croissance entre les deux sexes apparaissent à partir de 35 g, même avant la maturité sexuelle (Bhujel, 2013). L'élevage du tilapia repose principalement sur

la production de populations monosexes mâles qui ont une croissance 50% supérieure par rapport aux femelles (Gennotte, 2014).

En milieu contrôlé, la croissance dépend de plusieurs facteurs tels que la densité de mise en charge, l'état physiologique, la souche du tilapia, les paramètres du milieu, l'état nutritionnel, etc. En système intensif, les populations mono-sexes du tilapia peuvent atteindre des poids autour de 500 g après 4-6 mois d'élevage et dépasser 1 kg après 8-10 mois d'élevage (Bhujel, 2013; Menaga & Fitzsimmons, 2017).

2.5. Reproduction et production d'alevins

2.5.1. Dimorphisme sexuel et maturité

Dans les conditions favorables en milieu naturel, le tilapia du Nil atteint la maturité sexuelle à une taille de 20-30 cm (150-250 g). Cependant, la taille de la première maturité peut être atteinte à des tailles plus petites, ce qui est un indicateur des conditions environnementales stressantes et/ou de la surexploitation du stock (El-Sayed, 2006). Dans les conditions d'aquaculture, cette espèce peut atteindre la maturité sexuelle à des poids de 30g (El-Sayed et al., 2003).

A la maturité, les mâles et les femelles peuvent être facilement séparés par l'observation de l'orifice génital. La papille génitale du mâle est allongée (gonopode) alors que celle de la femelle est courte et présente en son milieu une fente transversale (l'oviducte) (fig.6).

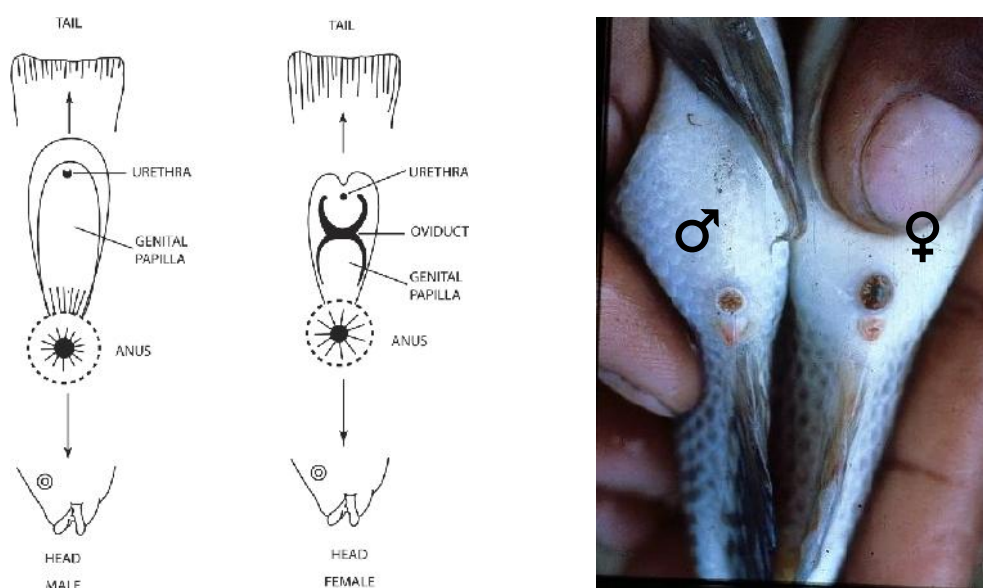


Figure 7. Différences morphologiques entre mâles (♂) et femelles (♀) du tilapia du Nil.
(source : www.aquanet.com/sexing-tilapia)

2.5.2. Mode de reproduction

Le tilapia du Nil fait partie des incubateurs buccaux uniparentaux maternelles (Fig.8). Lorsque les conditions environnementales deviennent favorables, les mâles migrent vers les zones peu profondes pour creuser des nids sur les substrats meubles. Après une parade nuptiale de quelques heures, la femelle dépose un lot d'ovules que le mâle féconde immédiatement et que la femelle reprend en bouche pour les incuber. Après plusieurs opérations successives, la femelle quitte l'arène pour incuber ses œufs fécondés (Kestemont et al., 1989).

Les femelles incubatrices sont reconnues par l'abaissement du plancher de la bouche, des opercules légèrement écartés et la mâchoire inférieure légèrement proéminente. L'éclosion des œufs débute après 100 heures de la fécondation et se poursuit pendant 24 heures (Morrison et al., 2001). Après résorption complète du sac vitellin (± 10 jours), les larves sont encore gardées par la femelle pendant plusieurs jours. A la taille d'environ 10 mm, les alevins quittent définitivement les femelles et vivent en petits bancs dans les eaux littorales peu profondes. Les principaux stades du développement embryonnaire et larvaires sont présentés dans la figure 9.



Figure 8. Incubation buccale chez *Oreochromis niloticus*. (Source : www.flickr.com/photos/theworldfishcenter)

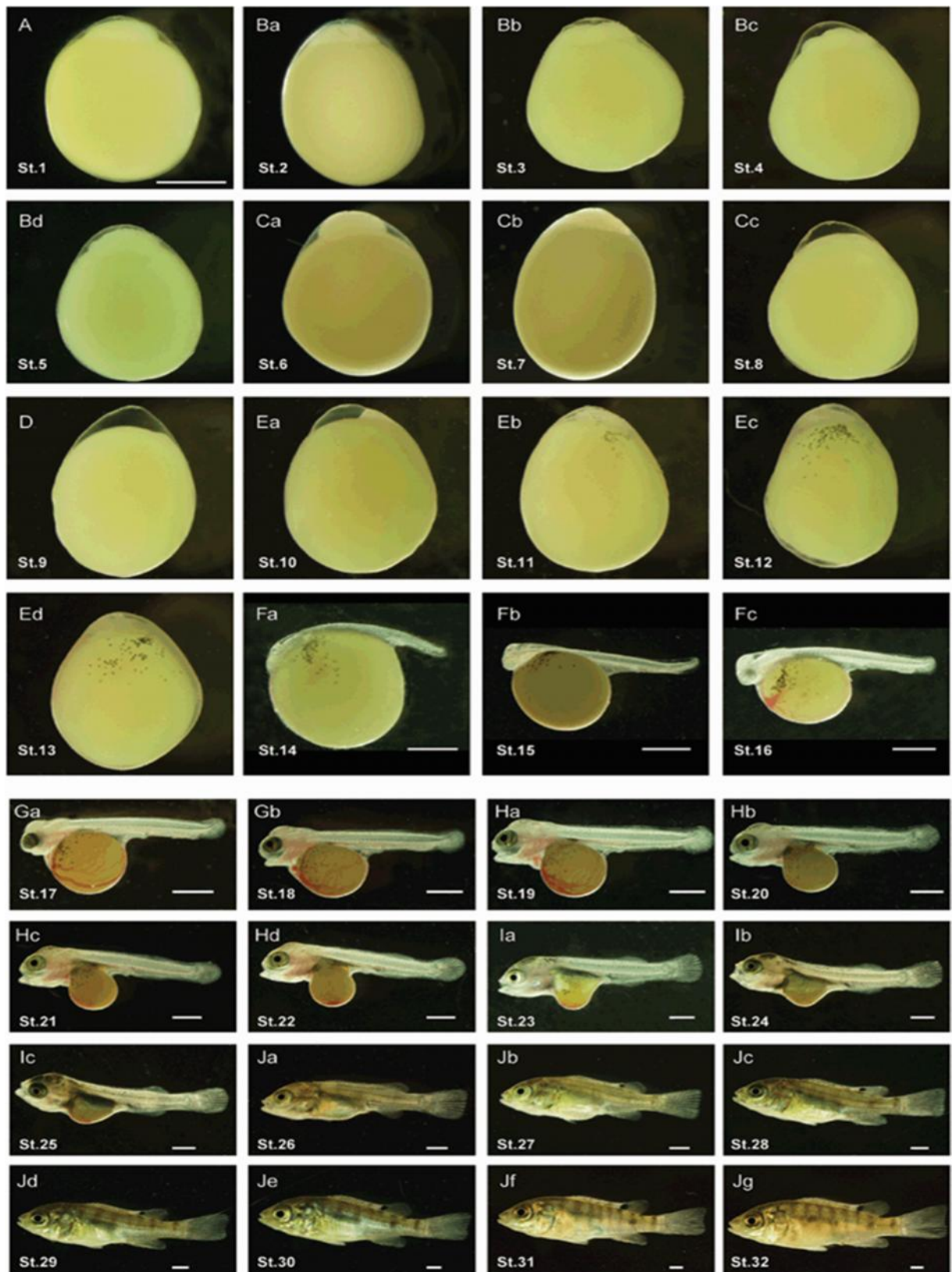


Figure 9. Aperçu des stades du développement embryonnaire, larvaire et juvénile d'*Oreochromis niloticus* jusqu'à 20-25 jours post-fécondation (Fujimura & Okada, 2007)

2.6. Nutrition

2.6.1. Régime alimentaire

Les préférences alimentaires du tilapia dépendent de multiples facteurs tel que l'âge, la saison, la photopériode, la profondeur de l'eau et la localisation géographique (El-Sayed, 2006). En milieu naturel, cette espèce est essentiellement planctophage et consomme une variété d'espèces de cyanophycées, chlorophycées et de diatomées (Getachew & Fernando, 1989; Mukankomeje et al., 2009; Teferi et al., 2000). Le tilapia consomme également du zooplancton, détritiques benthiques, insectes, etc. (Njiru et al., 2004; Shalloof & Khalifa, 2009). Selon Tesfahun and Temesgen (2018), les jeunes stades du tilapia (<11.5 cm) préfèrent les proies animales tel que le zooplancton, les insectes et les nématodes, tandis que les plus grands poissons préfèrent le phytoplancton, les détritiques et les macrophytes.

2.6.2. Anatomie et fonctionnement de l'appareil digestif

Chez les poissons, l'appareil digestif se développe au cours de l'ontogenèse des larves. A l'éclosion, le tractus digestif est un tube droit fermé à la bouche et histologiquement indifférencié sur toute sa longueur. Il reste pratiquement inchangé entre l'ouverture de la bouche et la fin de l'absorption du sac vitellin, puis se segmente en un buccopharynx, un intestin antérieur, un intestin moyen et un intestin postérieur. La période larvaire se termine par le développement d'un estomac avec des glandes gastriques et des cæca pyloriques. Le foie et le pancréas sont formés à l'éclosion et sont fonctionnels lors de la première alimentation (Kolkovski, 2001).

Le tilapia adulte possède des dents maxillaires et des dents pharyngiennes. Le tube digestif est caractérisé par un œsophage très court relié à un petit estomac en forme de sac dépourvu de cæcum pylorique, et un intestin très long et enroulé (El-Sayed, 2006). Le foie est de grande taille, et divisé en deux lobes (fig.10), avec un tissu pancréatique diffus dans le parenchyme hépatique (Vicentini et al., 2005). La vésicule biliaire est bien développée et a une forme arrondie. L'intestin du tilapia adulte représente 2.5 fois la longueur totale du corps, ce qui est comparable à celle des poissons à régime herbivores (0.8 à 15 fois la longueur totale). Cette longueur de l'intestin offre une surface suffisante pour la digestion des aliments d'origine végétale (Smith et al., 2000). Chez les poissons, le foie est un organe métabolique important qui contribue à la digestion par la sécrétion de la bile qui servira à l'émulsification des lipides dans l'intestin. Le foie est également un organe de stockage pour les lipides et le glycogène (Borlongan et al., 2002).



Figure 10. Eléments constitutifs de l'appareil digestif du tilapia : (E) Œsophage, (L) foie, (S) estomac, (GB) vésicule biliaire, (PH) segment hépatique de l'intestin, (Cp) intestin spirale, (GL) segment gastrique, (T) segment terminal, (Sp) Rate (Smith et al., 2000).

2.6.3. Enzymes digestives

La bouche des poissons est dépourvue de glandes salivaires, la digestion de l'aliment commence dans l'estomac par la sécrétion de suc acide (chez la plus part des poissons pourvus d'estomac) (Moriarty, 1973). L'absence d'estomac chez de nombreux poissons est compensée par la présence de dents pharyngiennes ou de gésiers pour broyer la nourriture, et l'intestin antérieur remplit la fonction de stockage temporaire des aliments ingérés (Ray & Ringo, 2014).

Chez le tilapia, le pH de l'estomac peut atteindre des valeurs inférieures à 2 après l'ingestion d'aliments (Moriarty, 1973). La digestion se poursuit au long du transit digestif, avec intervention des différentes enzymes pour faciliter l'absorption des nutriments au niveau de l'épithélium intestinal. Lors de la première alimentation des larves, leur système digestif n'est pas encore complètement fonctionnel. En l'absence d'estomac, la digestion des aliments ingérés a lieu dans l'intestin de la larve où la trypsine est responsable de l'activité protéolytique. L'activité des enzymes pancréatiques et intestinales est généralement faible à la phase de première alimentation (Kolkovski, 2001).

2.6.3.1. Les enzymes protéolytiques

Plusieurs enzymes participent à la digestion des protéines telles que la pepsine, la trypsine et la chymotrypsine, qui sont des endopeptidases hydrolysant les liaisons peptidiques spécifiques à l'intérieur des molécules protéiques. Les carboxypeptidases, les aminopeptidases et les dipeptidases sont des exopeptidases hydrolysant les liaisons peptidiques terminales en libérant les acides aminés (Moreau, 1988).

2.6.3.2. Les enzymes glycolytiques

La principale enzyme est l'amylase, responsable de l'hydrolyse de la liaison α -1-4 glucosidique de l'amidon et des molécules similaires en oligosaccharides plus courts. D'autres glucosidases ont été signalés chez les poissons tels que la maltase, les cellulases et les chitinases (Guillaume et al., 1999).

2.6.3.3. Les enzymes lipolytiques

Ces enzymes facilitent l'absorption des lipides par l'hydrolyse des liaisons esters des triglycérides en séparant le glycérol des acides gras (Borlongan et al., 2002), grâce à l'action du complexe lipase-colipase en présence des sels biliaires qui jouent le rôle d'agents émulsionnants naturels (Guillaume et al., 1999).

Chez le tilapia du Nil, l'activité des protéases et des lipases est plus importante au niveau de l'intestin par rapport au foie et à l'estomac, tandis que l'activité amylase est plus élevée dans le foie (Klahan et al., 2009). Les mêmes auteurs ont trouvés que l'activité des protéases et des lipases étaient plus élevées chez les tilapias de petite taille (5.7 et 35.8 g) par rapport aux tilapias de grandes tailles (92 g), tandis que l'activité amylase était plus élevée chez les poissons de grande taille.

Plusieurs facteurs peuvent influencer l'activité des enzymes digestives chez les poissons en élevage tels que les paramètres du milieu, l'âge, la fréquence de nourrissage, la composition de l'aliment, la densité de stockage, etc.

2.6.4. Besoins nutritionnels

Les besoins nutritionnels du tilapia ont été largement étudiés, du fait de l'intérêt économique de cette espèce.

2.6.4.1. Protéines

Les besoins en protéines dépendent de l'âge des tilapias, de la source des protéines et de la valeur énergétique des aliments. Les teneurs en protéines dans les aliments destinés au tilapia sont de l'ordre de 35-45% pour les stades larvaires, 30-40% pour les juvéniles, 20-30% pour les adultes et 35-45% pour les reproducteurs (El-Sayed, 2006).

La farine de poissons qui représentait en 1995, 10% des aliments destinés au tilapia ont été réduits à 2% en 2010, avec des perspectives de baisser le taux des farines de poissons jusqu'à 1% en 2020 (Tacon et al., 2011). Généralement, l'utilisation de la farine de poissons est limitée aux jeunes stades du tilapia pour des courtes périodes, avant le passage à une alimentation

composée d'autres sources de protéines, essentiellement de la farine de Soja (Ng & Romano, 2013). Pour développer une aquaculture durable, il est important de diminuer la dépendance à l'égard des farines et des huiles de poissons dans la fabrication d'aliments destinés aux poissons d'élevage, en raison des limitations des capacités de production et de l'augmentation continue des prix de ces ingrédients sur le marché mondial (Hardy, 2010).

Le tilapia, comme les autres poissons ont besoins des 10 acides aminés essentiels qui ne peuvent pas être synthétisés par l'organisme (tableau. 5). Ces besoins en acides aminés peuvent être satisfaits par un équilibre entre les différentes sources de protéines utilisées dans la fabrication d'aliments, avec recours si nécessaire à l'incorporation d'acides aminés synthétiques (Mjoun et al., 2010).

Tableau 5. Besoins en acides aminés essentielles pour le tilapia du Nile, exprimés en pourcentage des protéines (Santiago & Lovell, 1988).

Acide aminé	Besoins en % des protéines
Lysine	5.12
Arginine	4.20
Histidine	1.72
Thréonine	3.75
Valine	2.80
Leucine	3.39
Isoleucine	3.11
Méthionine	2.68
Méthionine + Cystéine	3.21
Phénylalanine	3.75
Phénylalanine + Tyrosine	5.54
Tryptophane	1

2.6.4.2. Lipides

Dans l'alimentation des poissons d'élevage, les lipides sont utilisés comme source d'énergie hautement digestible, composants importants des membranes cellulaires, précurseurs d'hormones et aides à l'absorption des vitamines liposolubles. Pour les tilapias, les besoins minimales en lipides dans les aliments sont de l'ordre de 6%, avec des niveaux optimaux autour de 12% (Ng & Romano, 2013). Les principaux acides gras polyinsaturés (AGPI) indispensables

pour le tilapia sont l'acide alpha-linolénique (oméga-3) et l'acide linoléique (oméga-6). Le tilapia peut synthétiser les acides gras polyinsaturés à longue chaîne tel que l'acide docosahexaénoïque (DHA) et l'acide eicosapentaénoïque (EPA) à partir des AGPI (Ng & Romano, 2013; Yu et al., 2021). Traditionnellement, les huiles de poissons marins ont été utilisées comme seule source de lipides dans la fabrication d'aliments pour tilapia. La hausse des prix de ces produits a conduit à la recherche d'autres sources de lipides. Actuellement, des huiles d'origine végétales sont couramment utilisées comme alternative. Le remplacement total de l'huile de poissons par des huiles végétales tel que l'huile de soja et de colza, n'a pas influencé négativement la croissance du tilapia, bien qu'une diminution des teneurs en EPA et DHA (bénéfiques pour la santé humaine) a été constaté dans la chair des poissons (Han et al., 2013; Teoh & Ng, 2016).

2.6.4.3. Carbohydrates

À la différence des protéines et des lipides, les poissons n'ont pas de besoins spécifiques pour les glucides. Néanmoins, ils représentent une source énergétique alternative aux protéines et peu coûteuse (Ng & Romano, 2013). Les poissons utilisent les glucides moins efficacement que les animaux terrestres. Cependant, les poissons omnivores des eaux chaudes sont plus adaptés à l'utilisation des glucides par rapport aux poissons carnivores d'eaux froides (Stone, 2003). Les glucides peuvent être classés en 2 catégories (Haidar et al., 2016):

- L'amidon et les sucres de faible poids moléculaire.
- Les polysaccharides non amyliques (PNA) ou les fibres qui sont présent potentiellement dans les aliments riche en ingrédients végétales et sont moins digestibles que l'amidon.

Le tilapia, en tant que poisson herbivore, utilise plus efficacement les glucides par rapport à d'autres poissons carnivores. Selon Maas et al. (2020), les valeurs moyennes de la digestibilité des glucides est autour de 67 % chez le tilapia, avec une digestibilité moyenne des PNA d'environ 24.3%.

2.6.4.4. Vitamines et minéraux

Les vitamines et les minéraux sont des micronutriments essentiels impliqués dans les différents processus physiologiques des poissons. Chez les poissons, les minéraux jouent un rôle important dans : la composition du squelette et des éléments organiques, l'activation d'enzymes, les échanges gazeux et l'osmorégulation. La supplémentation des oligoéléments

tels que le Cr, le Zn, le Cu et le Fe dans l'alimentation améliore la croissance du tilapia en élevage (Ng & Romano, 2013).

Les vitamines jouent un rôle vital dans les processus physiologiques liés à la croissance, la nutrition, et la santé des poissons. Ils peuvent être classés en 2 catégories : les vitamines liposolubles et les vitamines hydrosolubles. En élevage intensif du tilapia, la supplémentation des vitamines dans l'alimentation est indispensable. L'incorporation de vitamines A, D, E, K, C, B1, B2, B3, B5, B6, B7, B8, choline et l'acide folique dans les aliments commerciaux destinés aux tilapias est recommandé (Kubitza, 2019).

2.7. Stress oxydatif et système de défense antioxydant

Tous les organismes aérobies sont strictement dépendants de l'oxydation phosphorylante mitochondriale pour la production d'adénosine triphosphate (ATP) et l'homéostasie énergétique. En effet, l'oxygène est utilisé comme accepteur final d'électrons et joue un rôle vital dans le fonctionnement cellulaire (Leverve, 2009). Cependant, en dépit de ses propriétés bénéfiques, il contribue à la formation indésirable d'éléments réactives de l'oxygène (ERO) telles que le superoxyde ($O_2^{\bullet-}$), le peroxyde d'hydrogène (H_2O_2) et le radical hydroxyle (OH^{\bullet}). En général, les ERO, ont des effets néfastes entraînant principalement la modification structurelle des lipides, des protéines et des acides nucléiques dans les compartiments cellulaires. La peroxydation lipidique est un exemple courant de dommages induits par les ERO, où les acides gras polyinsaturés sont susceptibles d'être attaqués par les radicaux libres, ce qui déclenche une réaction en chaîne (Chowdhury & Saikia, 2020). Dans les conditions normales, elles sont générées en faible quantité et jouent un rôle de messagers secondaires capables, notamment de réguler le phénomène de l'apoptose ou d'activer les facteurs de transcription. À l'inverse, une surproduction d'ERO ou un déficit des systèmes de défense entraîne l'apparition d'un stress qui provoque l'oxydation de manière non spécifique et irréversible de molécules biologiques (tels que l'ADN, les protéines et les lipides), conduisant à une perte de fonction (Haleng et al., 2007). Le paradoxe des ERO est qu'elles constituent des produits potentiellement toxiques du métabolisme et sont en même temps des molécules essentielles à la signalisation et à la régulation cellulaires (Migdal & Serres, 2011).

Pour prévenir les effets négatifs de la production naturelle des ERO, les organismes vivants disposent d'un système de défense antioxydant avec 2 classes distinctes : a) le système antioxydant enzymatique qui inclut différentes enzymes telles que la superoxyde dismutase (SOD), la glutathion peroxydase (GPx), la glutathion réductase (GR) et la catalase (CAT) ; b)

les antioxydants non enzymatique tels que la glutathion (GTH), vitamine C, vitamine E, carotène et flavonoïdes (Hoseinifar et al., 2021). Ces antioxydants protègent les cellules de l'organisme contre des dommages oxydatifs provoqués par les ERO. Le stress oxydant correspond à un déséquilibre entre la génération des ERO et les défenses antioxydants de l'organisme, en faveur des premières (Haleng et al., 2007).

Les SOD sont des métalloenzymes qui catalysent la réaction des anions superoxydes en peroxyde d'hydrogène (qui est également un ERO). Le peroxyde d'hydrogène résultant est ensuite éliminé par les CAT et les GPx. Les CAT permettent la conversion du peroxyde d'hydrogène en oxygène moléculaire et en eau. Les GPx facilitent la réduction d'une gamme de peroxydes en alcools (contrairement à la CAT qui n'agit que sur le peroxyde d'hydrogène) (Kroon et al., 2017).

Le système de défense antioxydant chez les poissons peut être influencé par différents facteurs intrinsèques et extrinsèque (fig.11), tels que les variations des paramètres du milieu, les polluants chimique, l'âge, le régime alimentaire, les pathologies, l'état physiologique, la densité de stockage en élevage, etc. (Birnie-Gauvin et al., 2017; Dawood et al., 2019; Hoseinifar et al., 2021). Les enzymes antioxydants sont utilisées comme des biomarqueurs du stress oxydatif dans la biosurveillance de la pollution des écosystèmes aquatiques (Pandey et al., 2003).

Le système de défense antioxydant est étroitement lié aux paramètres du système immunitaire et à l'état sanitaire des poissons. L'incorporation des additifs microbiens (probiotiques et prébiotiques) et de certaines substances bioactives dans l'alimentation permet d'améliorer les capacités de défense antioxydants des poissons, notamment par l'augmentation de l'activité des enzymes antioxydants, avec des effets positifs sur l'état sanitaire et la résistance aux pathologies (Hoseinifar et al., 2021).

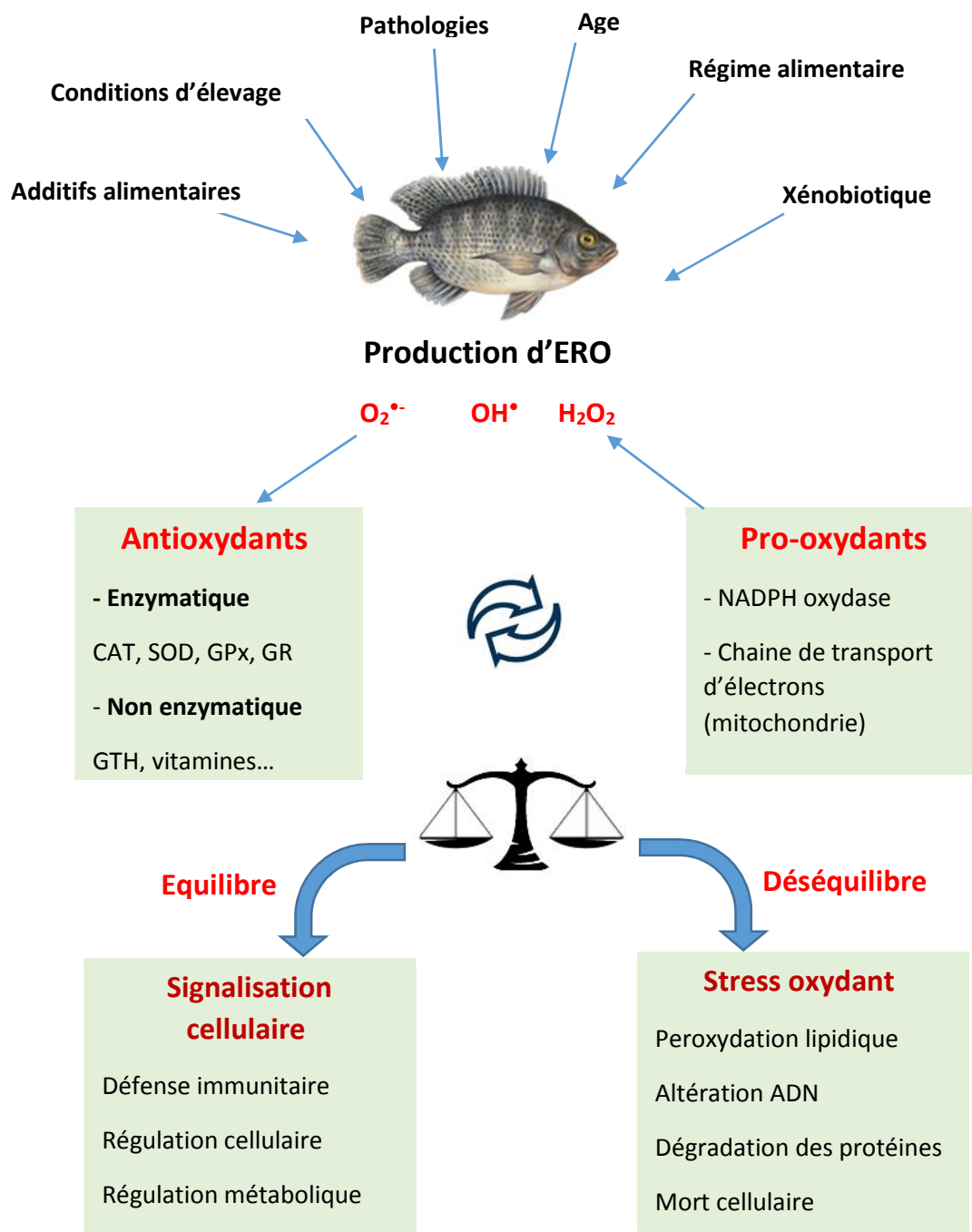


Figure 11. Le système de défense antioxydant des poissons (Hoseinifar et al., 2021)

2.8. Systèmes de production du tilapia

2.8.1. Elevage du tilapia en système semi-intensif

C'est un système de production à faible coût d'investissement (étangs en terre), avec utilisation d'alimentation naturelle favorisé par la fertilisation organique ou minérale du milieu d'élevage, et éventuellement l'utilisation d'aliments artificiels de complément. Les rendements de production varient entre 3 et 16 tonnes / ha / an (El-Sayed, 2006).

Plusieurs systèmes de production semi-intensive sont pratiqués en élevage du tilapia, tel que l'élevage dans des étangs en monoculture ou en polyculture avec d'autres espèces comme les carpes, les mullets, le poisson chat, les crevettes, etc. Il y a également l'élevage en aquaculture intégrée tel que la rizipisciculture, l'élevage associé aux animaux terrestre et l'élevage dans les systèmes d'irrigation (El-Sayed, 2006 ; Bhujel, 2014).

2.8.2. Elevage du tilapia en système intensif

La production intensive des poissons consiste à l'élevage à des hautes densités de stockage pour maximiser les rendements dans des espaces limités. Ce système est dépendant d'une alimentation totalement artificielle et des forts taux de renouvellement d'eau, et nécessite la prise en considération de certains facteurs tels que l'approvisionnement régulier en alevins, la disponibilité du personnel qualifié et de technologies, les impacts environnementaux et les coûts d'investissement. Les rendements de production peuvent atteindre 500 tonnes / ha / an (El-Sayed, 2006). L'élevage intensif du tilapia est pratiqué dans plusieurs systèmes tels que :

- **Les étangs en terre** : L'élevage intensif dans les étangs en terre est moins pratiqué par rapport aux autres systèmes de production. Les densités de stockage des étangs varient de 30000 à 300000 individus / ha selon les conditions d'élevage (installation d'aérateurs, renouvellement d'eau...), avec des rendements de production entre 10 et 120 t / ha / an (El-Sayed, 2006).

- **Les cages flottantes** : L'élevage du tilapia en cages flottante est pratiqué dans les lacs et les réservoirs d'eau dans différents régions du monde. Ce système de production a plusieurs avantages tels que les faibles coûts d'investissement, facilité de contrôle et de collecte, réduction de la pression sur le foncier...etc. Généralement, les charges d'élevage varient de 2 à 50 kg / m³ et peuvent atteindre les 120 kg / m³ dans certains systèmes super-intensifs (Garcia et al., 2013).

- **Les bassins et les raceways** : L'élevage du tilapia dans les bassins de petites dimensions est de plus en plus populaire, notamment dans les pays arides et semi-arides où les ressources hydriques sont limitées (El-Sayed, 2006). Des bassins de différentes formes (circulaires, raceways, carrés...) et matériaux (béton, fibre de verre, géo-membrane...) sont utilisés en aquaculture. Les charges d'élevage du tilapia en bacs intensifs peuvent atteindre 160 à 185 kg

/ m³ (Prabu et al., 2019). Différentes technologies sont pratiquées dans les fermes d'élevage du tilapia en bassins tels que l'élevage intensif en circuit ouvert, les systèmes de recirculation (RAS) avec mise en place d'équipements de filtration, l'élevage en eau verte, l'aquaponie et le système biofloc (El-Sayed, 2006).

2.9. Production d'alevins monosexes

L'inconvénient majeur en élevage du tilapia en sexes mélangés réside dans la difficulté du contrôler de la reproduction dans les bassins d'élevage, ainsi que les écarts de croissance importants entre les deux sexes, en faveurs des mâles. Cela a un impact négatif sur la rentabilité économique, notamment en élevage intensif. L'utilisation des populations monosexes mâles représente une alternative pour améliorer les rendements de production. Les différentes techniques de production d'alevins monosexes de tilapia du Nile sont récapitulées dans le tableau 6.

Tableau 6. Techniques de production d'*O. niloticus* monosexes utilisés en aquaculture (Mair et al., 1997 ; El-Sayed, 2006 ; Baroiller et al., 2009; Fuentes-Silva et al., 2013)

Technique	Procédure	Efficacité (% des mâles)	Inconvénients
Sexage manuel	Tri manuel des alevins par observation de l'orifice génitale	80 – 90%	- Laborieuse - Risques d'erreurs
Manipulation environnementale	Application de température supérieure à 32°C pendant 10 jours en phase larvaire	60 – 100%	- Efficacité variable selon les souches et les individus
Hybridation	Hybridation de l' <i>O. niloticus</i> avec d'autres espèces : <i>O. aureus</i> , <i>O. spilurus</i> , <i>O. hornorum</i> , <i>O. macrochir</i>	75 – 100%	- Qualité des alevins - Faible fécondité - Efficacité variable selon les souches
Inversion hormonale	Incorporation d'hormones stéroïdes dans l'alimentation des larves ou par immersion. Exemple : la 17 -methyltestosterone à 30-60 mg/kg d'aliment pendant 25-30 j	92 – 100%	- Impact environnementaux - Restrictions réglementaires
Manipulation génétique	Inversion hormonale et croisement pour plusieurs générations : Obtention de super-mâles « YY »	Moyenne de 96%	- Investissement initial Important - Savoir-faire

3. Le système biofloc

3.1. Principe de fonctionnement

La technologie biofloc (BFT) est une « eco-friendly » forme d'aquaculture, basée sur le développement d'une population diversifiée de micro-organismes dans la colonne d'eau. Cette population agit comme un filtre biologique in-situ, en dégradant la matière organique et les déchets azotés dans le milieu d'élevage (Cardona, 2015). C'est un système d'élevage qui nécessite très peu de renouvellement d'eau, une oxygénation continue et une agitation de l'eau pour la remise en suspension du floc. Les particules du floc (fig.12) sont des agrégats de bactéries, d'algues, de zooplancton et des matières organiques maintenues ensemble dans une matrice de mucus sécrétée par les bactéries et liés par les algues filamenteuse ou par les forces d'attraction électrostatique (Hargreaves, 2013). La masse volumique du floc est légèrement supérieure à 1 g/ml, ce qui permet aux agrégats de couler lentement et d'être relativement faciles à maintenir en suspension. La forte porosité du floc facilite les échanges d'oxygène, des nutriments et des déchets entre l'intérieur du floc et le milieu extérieur (Samochoa, 2019).



Figure 12. Structure de biofloc (Castro-Nieto et al., 2012)

Le système BFT est basé principalement sur l'assimilation de substances azotées par les bactéries hétérotrophes, qui est favorisé par l'élévation du ratio Carbone/ Azote (ratio C/N) dans le milieu (fig.13). Pour manipuler le ratio C/N, une source de carbone à faible coût (généralement des carbohydrates) est ajoutée dans le système BFT.

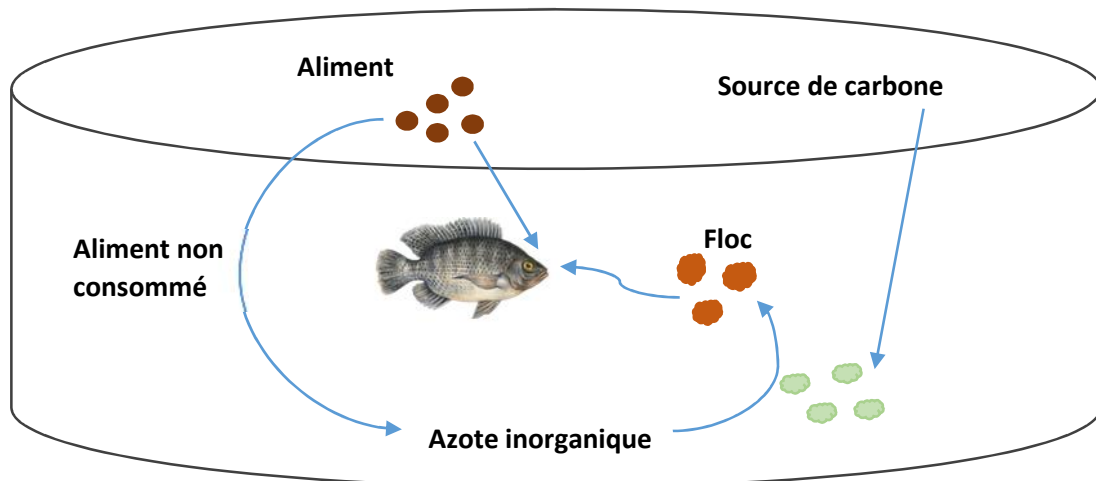


Figure 13. Schéma du fonctionnement du BFT dans un bassin piscicole (Crab et al., 2012)

3.2. Rôle des microorganismes en système BFT

La stabilité du milieu biofloc dépend de la dynamique et les interactions entre les communautés de bactéries, micro-algues, protozoaires, nématodes, champignons, rotifères, etc., qui se développent naturellement dans le milieu.

Les bactéries hétérotrophes, les bactéries nitrifiantes et le phytoplancton jouent le rôle principal dans l'élimination des rejets azotés et des matières organiques. Les ciliés, les protozoaires, les rotifères, les copépodes et les nématodes jouent un rôle complémentaire et participent également au recyclage des matières organiques (Emerenciano et al., 2017).

3.3. Type de biofloc et voie d'élimination de l'ammonium

Deux types de système biofloc sont utilisés dans les systèmes de production aquacole (Hargreaves, 2013) :

- Le système BFT exposé à la lumière naturelle : il inclut les systèmes d'élevage en étangs, bassins et raceways sous serres. Le contrôle de la qualité de l'eau est assuré grâce au développement d'une mixture de bactéries et de microalgues donnant une coloration verdâtre du milieu « green-water biofloc system ».
- Le système BFT non exposé à la lumière naturelle : Il inclut les bassins et les raceways installés à l'intérieur des bâtiments d'élevage. Le contrôle des paramètres du milieu est assuré principalement par le processus bactérien, caractérisé par une coloration marron de l'eau « Brown-water biofloc system ».

Les principales voies de transformation de l'azote ammoniacale dans le milieu BFT selon Ebeling et al. (2006) et Huang (2020) sont :

- L'absorption photoautotrophique par le phytoplancton

Dans cette voie, l'azote est utilisé pour la synthèse de la matière organique (biomasse algale). Un ratio C/N/P autour de 106/16/1 est nécessaire, ce qui implique l'addition d'une source exogène de carbone et de phosphore inorganiques.

- L'oxydation par les bactéries nitrifiantes

Cette voie inclue les bactéries oxydant l'ammonium (AOB) qui obtiennent leur énergie par le catabolisme de l'ammonium en nitrites, incluant les bactéries des genres *Nitrosomonas*, *Nitrosococcus*, *Nitrosospira*, *Nitrosolobus* et *Nitrosovibrio*, ainsi que les bactéries oxydant les nitrites (NOB) qui transforment les nitrites en nitrates et comprennent les genres *Nitrobacter*, *Nitrococcus*, *Nitrospira*, et *Nitrospina*. Le processus de nitrification est caractérisé par la diminution de l'alcalinité et de l'oxygène, avec une production des nitrates et de CO₂.

- L'assimilation par les bactéries hétérotrophes

Cette voie consiste à la conversion d'azote ammoniacale en biomasse microbienne, avec consommation d'oxygène, de carbone inorganique (alcalinité) et d'une source de carbone organique (carbohydrates).

3.4. Espèces adaptées à l'élevage en système BFT

Le système biofloc est adéquat pour les espèces qui tolèrent les fortes concentrations des matières en suspension et les variations des paramètres du milieu. Un meilleur rendement du système est obtenu avec les espèces qui peuvent utiliser le floc comme source de nutrition. Le tilapia et les crevettes sont les principales espèces utilisées dans ce système de production à l'échelle commerciale. D'autres espèces de poissons ont également montré une adaptation à l'élevage en système BFT, telles que le *Cyprinus carpio* (Adineh et al., 2019), le *Clarias gariepinus* (Romano et al., 2018) et le *Mugil cephalus* (Elhetawy et al., 2021).

3.5. Principaux paramètres contrôlés en système BFT (tableau 7)

3.5.1. Ratio C/N

Dans le système BFT, le ratio C/N est un facteur clé pour contrôler les concentrations de l'ammonium. Les aliments contenant 30 à 35% de protéines ont un faible ratio C/N d'environ 9 à 10. L'élévation du ratio C/N favorise la voie hétérotrophe de dégradation d'ammonium. Les faibles ratios C/N dans les aliments destinés aux poissons sont compensés par l'addition d'une

source externe de carbone. De nombreuses matières peuvent être utilisées comme source de carbone en système BFT, telles que les céréales, la mélasse, la bagasse de canne à sucre, l'amidon, le sucre, etc. (annexe 1).

Dans un système BFT entièrement hétérotrophe, 0,5 à 1 kg de sucre sont nécessaires pour chaque kg d'aliment (30 à 38 % de protéines). Des quantités supplémentaires de sucre sont requises pour des aliments à hautes teneurs en protéines (Hargreaves, 2013).

3.5.2. Matières en suspension

En système BFT, l'accumulation des matières en suspension (MES) dans les bassins d'élevage est favorisée par les fortes densités de poissons et l'addition de source de carbone. Des concentrations en MES entre 200 et 500 mg/L sont suffisantes pour le bon fonctionnement du floc pour la dégradation des substances azotés. Les teneurs en MES doivent être gérées dans un compromis entre le fonctionnement du floc comme biofiltre et la demande biologique en oxygène de l'eau (Hargreaves, 2013). Les niveaux excessives de MES augmentent la consommation d'oxygène dans le milieu et peuvent provoquer l'obstruction des branchies chez les poissons et les crevettes (Avnimelech, 2011).

Plusieurs systèmes sont utilisés dans les fermes d'élevage en BFT pour le contrôle des MES (fig.14), tels que le drainage par le fond des bacs, les chambres de décantation, les skimmers, etc. (Avnimelech, 2012). La consommation du floc par les poissons et les crevettes pourrait contribuer au contrôle des MES.



Figure 14. Chambre de décantation pour le contrôle de MES (Avnimelech, 2012)

3.5.3. Agitation et aération

Une intense agitation de l'eau est nécessaire pour maintenir le floc en suspension dans la colonne d'eau. L'agitation insuffisante peut provoquer le dépôt des matières organiques sous

forme de couches dans le fond du bassin. Ces zones anaérobiques peuvent libérer de substances toxiques telles que le sulfure d'hydrogène, le méthane ou l'ammoniac (Hargreaves, 2013).

La demande en oxygène dans le système BFT est plus élevée par rapport aux autres systèmes de production. La consommation d'oxygène dans le milieu BFT à dominance hétérotrophe est d'environ 6 mg/L/h (Hargreaves, 2013). Plusieurs systèmes d'aération (fig.15) sont utilisés dans les bassins et les étangs du BFT tels que les paddlewheels, les pompes airlift, les aérateurs verticaux de surface, etc.



Figure 15. Système d'aération dans un bassin du tilapia en BFT (Avnimelech, 2011)

3.5.4. Alcalinité

L'activité des bactéries nitrifiantes est la principale responsable des pertes de l'alcalinité dans les systèmes intensifs en BFT. Lorsque l'alcalinité de l'eau est épuisée, le pH de l'eau peut diminuer brutalement, ce qui peut inhiber le fonctionnement des bactéries responsables de la dégradation d'ammonium. L'alcalinité de l'eau doit être maintenue à des valeurs supérieures à 100 mg/L par l'addition de bicarbonates de sodium dans le milieu (Hargreaves, 2013).

3.6. Biofloc comme source d'alimentation

Le biofloc présente généralement un bon profil nutritionnel, ce qui en fait une source de nourriture naturelle potentiellement intéressante pour les animaux aquatiques. Le floc contient environ 20 à 40% de protéines brutes, 1 à 8% de lipides, 15 à 60% de cendres, 1 à 15% de fibres et 18 à 38% de carbohydrates (El-Sayed, 2021). La composition nutritionnelle du floc dépend de plusieurs facteurs tels que la source de carbone, le ratio C/N, la composition de l'aliment et la communauté microbienne qui le compose (Mugwanya et al., 2021).

Généralement, il y a trois voies d'utilisation de biofloc comme nourriture en aquaculture : comme aliment de complément pour les poissons et les crevettes in-situ, comme ingrédient

(farine du floc) incorporé dans l'alimentation pour remplacer les farines de poissons, ou distribué comme aliment pour remplacer partiellement les aliments artificielles (Huang, 2020).

Le tilapia, qui a un régime alimentaire omnivore, peut consommer le biofloc comme source d'alimentation naturelle. Avnimelech and Kochba (2009), en utilisant la technique de marquage par l'azote isotopique (^{15}N), ont constaté que le tilapia peut assimiler 240 mg d'azote / j / kg de poissons à partir du floc, qui est équivalent à environ 25% de protéines normalement distribuées dans l'alimentation. D'autres études ont montré la possibilité d'utiliser la farine du floc comme ingrédient dans les aliments destinés au tilapia, sans affecter les performances de croissance (Mabroke et al., 2019; Prabu et al., 2018).

Tableau 7. Principaux paramètres à contrôler en système BFT et leurs gammes optimales et / ou normales (Emerenciano et al., 2017)

Paramètres	Optimum et/ ou gamme normale	Remarques
Température	28-30°C (idéal pour les espèces tropicales)	< 20°C : peuvent affecter le développement microbien
Oxygène dissous	> 4 mg/L (idéal), minimum 60% de la saturation	Pour une bonne croissance et développement des poissons et microorganismes
pH	6.8 - 8	< 7 peut affecter le processus de nitrification
Salinité	Dépend des espèces	Possible de générer le BFT de 0 à 50 ppm
AAT	< 1 mg/ L (idéal)	Toxicité dépend du pH
Nitrites	< 1 mg/ L (idéal)	Les ions chlorure atténue la toxicité des nitrites
Nitrates	0 – 20 mg/L (idéal)	
Alcalinité	> 100 mg/L	Valeurs élevées, favorisent l'assimilation de l'ammonium par les bactéries nitrifiantes et hétérotrophes.
Matières décantables	Idéal : 5-15 mg/ L (crevettes), 5-20 (alevins tilapia), 20-50 (juvéniles, adultes de tilapia)	Valeurs excessives : consommation d'oxygène, obstruction des branchies
MES	< 500 mg/L	

3.7. Biofloc et biosécurité

L'élevage en système BFT, avec de très faibles taux de renouvellement d'eau facilite l'application des mesures de biosécurité et limite l'introduction d'agents pathogènes (Avnimelech, 2012). L'efficacité des antibiotiques dans le traitement des pathologies en aquaculture est remise en cause par le développement de résistance chez les bactéries pathogènes à cause de la mauvaise utilisation des antibiotiques (Defoirdt et al., 2011).

La technologie biofloc peut constituer une mesure alternative dans la prévention contre les bactéries pathogènes en aquaculture (Crab et al., 2012). L'élevage en milieu biofloc permet d'améliorer la gestion sanitaire au niveau des fermes aquacoles par la réduction des échanges d'eau avec le milieu extérieur, la stimulation du système immunitaire des poissons et des crevettes, le contrôle des agents pathogènes à travers le développement d'une communauté microbienne stable, la réduction de stress par l'amélioration des paramètres du milieu et par l'existence d'agents biologiques qui peuvent prévenir les maladies (Avnimelech, 2012).

De plus, le milieu biofloc peut avoir un effet probiotique dans le milieu d'élevage. Des bactéries bénéfiques peuvent se développer naturellement dans le biofloc et avoir des effets positifs sur le système immunitaire et le stress des espèces d'élevage (El-Sayed, 2021; Mugwanya et al., 2021).

3.8. Biofloc en Aquaculture Multitrophique Intégrée

L'Aquaculture Multitrophique Intégrée (IMTA) est une forme d'aquaculture durable basée sur l'association d'un certain nombre d'organismes complémentaires dans un site d'élevage pour optimiser l'utilisation des nutriments et réduire les rejets dans l'environnement (Granada et al., 2016). L'intégration de l'approche IMTA permet d'améliorer le rendement dans les systèmes BFT, notamment par le contrôle des niveaux de MES dans le milieu (Khanjani et al., 2022).

Des études récentes ont évalué l'utilisation de l'approche IMTA en système BFT, en intégrant plusieurs espèces à différents niveaux trophiques, avec des résultats encourageants, tels que l'intégration de la crevette (*Litopenaeus vannamei*), le tilapia et des plantes (Poli et al., 2019), de la crevette, du mulot et du tilapia rouge (Nguyen et al., 2023), ainsi que la culture des algues marines et des coquillages dans les effluents du biofloc (Brito et al., 2018; Pires et al., 2021).

3.9. Système BFT en Algérie

Dans le cadre de la coopération algéro-coréenne, une ferme d'élevage de crevette à pattes blanches (*Litopenaeus vannamei*) a été réalisée dans la commune de Hassi Ben Abdellah à Ouargla. Le projet dispose d'une superficie de 10 hectares avec une capacité de production de 20-30 tonnes de crevettes/an et comporte :

- Unité nurserie : 03 bacs circulaires de 25 m³ et 03 raceways de 80 m³ (fig.16).
- Unité de grossissement : 13 étangs d'une superficie totale de 3.7 ha.
- Structures annexes : Unité de fabrication d'aliments, laboratoires, chambres froides...etc.

Cette ferme, qui représente le seul projet de production en système BFT en Algérie est rattaché au Centre National de Recherche et du Développement de la Pêche et de l'Aquaculture.



Figure 16. Bassins d'élevage en système BFT de la ferme de crevetticulture de Ouargla (source : CNRDPA)

Chapitre II

**Evolution des paramètres du milieu durant la maturation
du biofloc « start-up »**

1. Matériel et méthodes

1.1. Lieu et origine des poissons

Toutes les expériences d'élevage réalisées dans le cadre de cette thèse ont été réalisées au niveau de la station expérimentale de pisciculture marine (SEPM), rattachée au Centre National de Recherche et du Développement de la Pêche et de l'aquaculture (CNRDPA) de Bousmail. Les parties de la ferme exploitées durant ce travail sont mentionnés dans la figure 17.

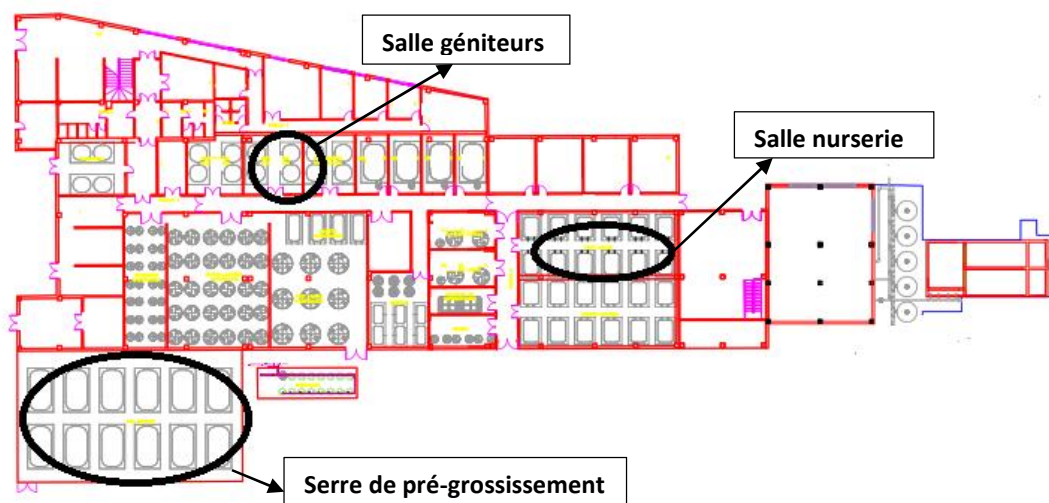


Figure 17. Plan global de la SEPM, montrant les lieux de déroulement des expériences

La première expérience relative à la phase de formation du biofloc a été effectuée dans la salle nurserie à l'intérieure de la ferme (fig.17). Les bacs ont été installés dans l'espace séparant les bassins en béton, destinés au pré-grossissement des poissons marins. Le matériel biologique (adultes d'*Oreochromis niloticus*) est issu des bassins d'élevage de la division aquaculture au niveau de CNRDPA.

1.2. Dispositif expérimental

L'unité d'élevage comporte 3 bacs cylindro-coniques en polypropylène (PP), ayant un volume utile de 350 L. Chaque bac est équipé d'un diffuseur d'air pour assurer l'aération et l'agitation du floc et d'un thermostat de 300 W pour maintenir la température autour de 25°C.

Des individus adultes du tilapia d'un poids moyen de 139.8 ± 17.4 g ont été répartis sur les bacs d'élevage, selon les densités du stockage indiquées dans le tableau 8.

Sur une période de 11 semaines (06/06/2017 au 20/08/2017), les poissons ont été nourris à satiété avec un aliment commercial de 03 mm contenant 30% de protéines. L'aliment est distribué deux fois par jour, durant 05 jours par semaine. La mélasse de sucre est distribué

quotidiennement dans les bacs pour ajuster le ratio Carbone/ Azote (C/N) à 20. Ce ratio a été fixé en se basant sur la bibliographie pour favoriser le développement rapide du floc.

Tableau 8. Mise en charge des bacs d'élevage

	Bac 1	Bac2	Bac3
Effectif	4	6	11
Poids moyen (g)	145.8±13.4	134.7±13	140.4±15.3
Biomasse (g)	583	808	1544
Densité (kg/m³)	1,67	2,31	4,41

1.3. Calcul de la quantité de source de carbone nécessaire

En se basant sur la bibliographie, trois méthodes ont été identifiées pour calculer la quantité de source de carbone nécessaire pour ajuster le ratio C/N en système BFT :

- Méthode I :

Le calcul est basé sur l'estimation théorique de la quantité d'azote excrétée par les poissons, en se basant sur la quantité d'aliment distribuée quotidiennement. La méthode de calcul pour 1 kg d'aliment distribué est schématisée dans la figure 18.

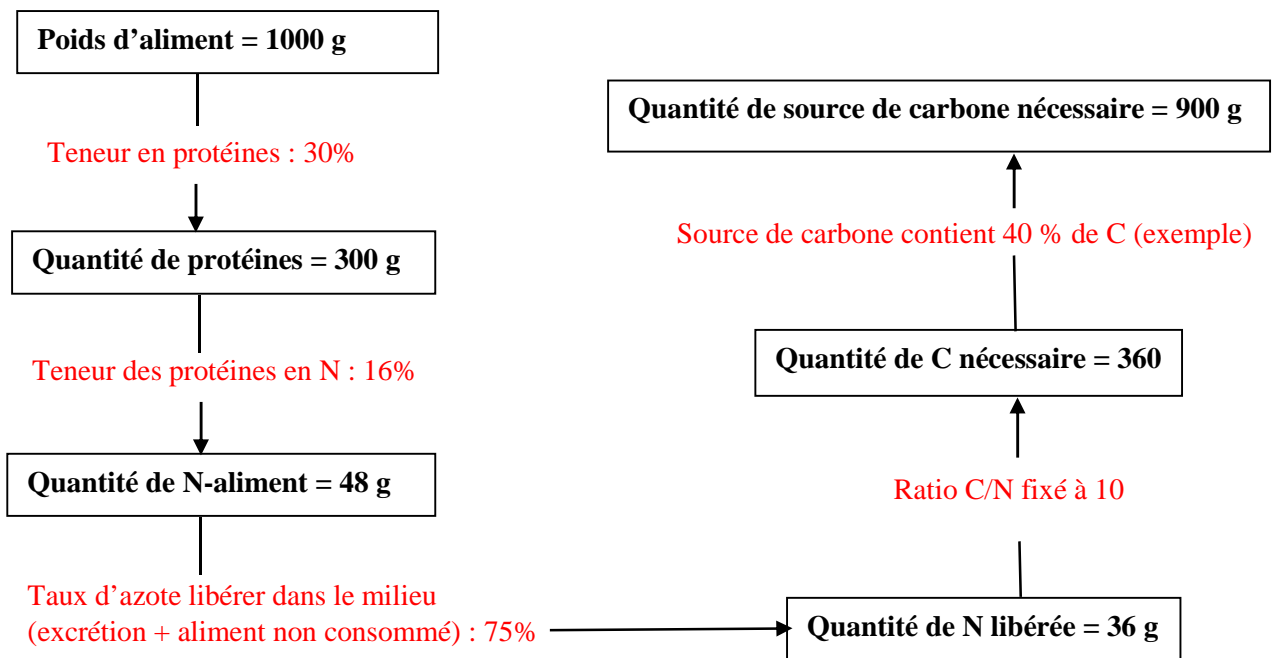


Figure 18. Schéma de calcul pour déterminer la quantité de source de carbone nécessaire pour neutraliser l'azote inorganique généré par 1 kg d'aliment à 30 % de protéines, en système BFT (Avnimelech, 2012; Crab et al., 2012)

- Méthode II :

Le calcul est basé sur la teneur en azote ammoniacal total (AAT) mesurés dans les bacs de culture. La quantité des AAT dans le bac d'élevage est multipliée par le ratio C/N fixé pour trouver la quantité de C nécessaire (fig.19).

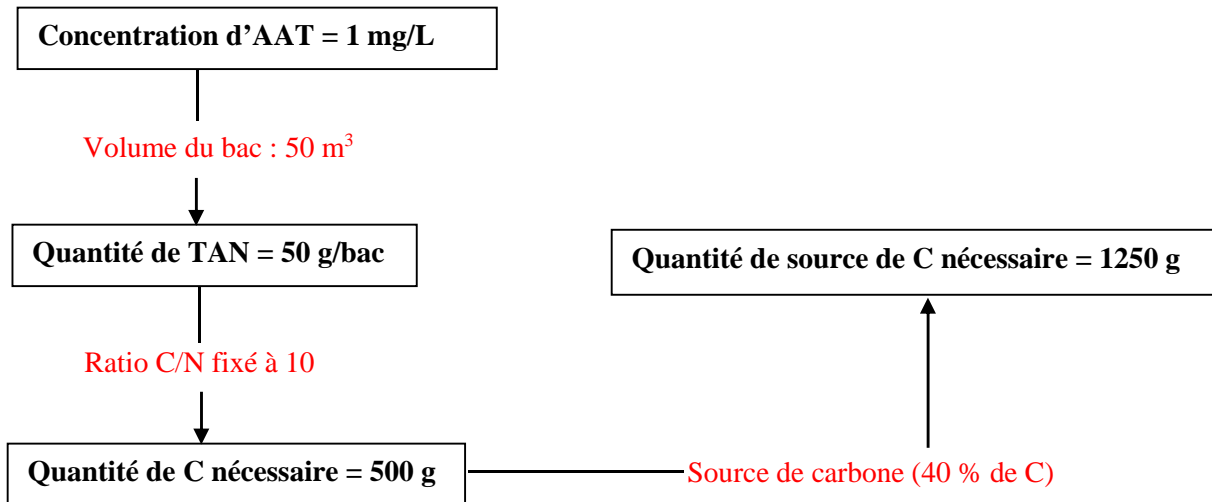


Figure 19. Schéma de calcul pour déterminer la quantité de source de carbone nécessaire, selon la teneur en azote ammoniacal total dans le bassin d'élevage (Emerenciano et al., 2017)

- Méthode III :

Le calcul est effectué en tenant compte du ratio C/N de l'aliment et de la teneur en C de la source de carbone. La méthode de calcul pour 1 kg d'aliment (à 30% de protéines) distribué quotidiennement est schématisée dans la figure 20.

Pour cette étude, la méthode III est appliquée pour déterminer la quantité de mélasse ou de sucre nécessaire selon le ratio C/N fixé pour chaque groupe expérimental. Le poids de la mélasse est converti en volume (densité de mélasse = 1.3) pour faciliter la distribution à l'aide d'un bécher gradué, sans recours à la balance.

Le calcul du poids de la source de carbone selon la méthode III est synthétisé dans la formule modifiée de Duy and Van Khanh (2018) :

$$CH = F \times [(CN \times \% PF \times \% NP \times 0.75) - (\%CF \times 0.75)] / \% CCH \dots\dots\dots (1)$$

CH : Poids de la source de carbone

F : Poids de l'aliment

CN : Ratio C/N appliqué

%PF : Teneur en protéines de l'aliment

%NP : Teneur en N des protéines (16 %)

%CF : Teneur en C de l'aliment (45%)

%CCH : Teneur en C de la source carbone utilisée

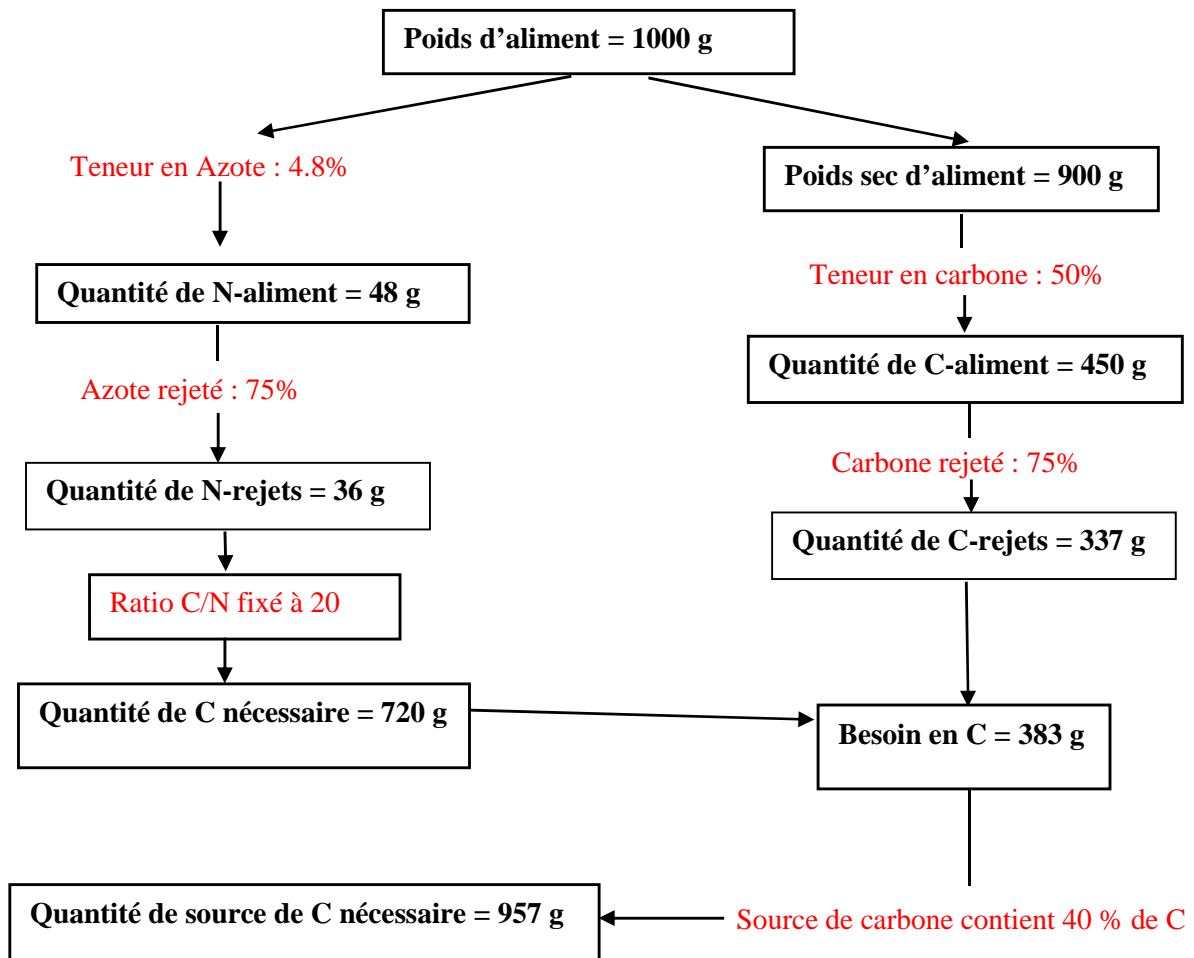


Figure 20. Schéma de calcul pour déterminer la quantité de source de carbone nécessaire pour neutraliser l'azote inorganique généré par 1 kg d'aliment à 30% de protéines (Duy & Van Khanh, 2018; Xu et al., 2016).

1.4. Dosage des glucides

Les glucides contenus dans la mélasse et le sucre sont quantifiés pour estimer leur teneur en carbone, lequel représente environ 44% de la composition des glucides (Rouwenhorst et al., 1991). L'analyse des glucides est effectuée une fois, au début de l'expérience, selon la méthode de phénol sulfurique (Dubois et al., 1956) :

- Principe : Dans cette méthode, l'acide sulfurique concentré décompose les polysaccharides, les oligosaccharides et les disaccharides en monosaccharides. Les pentoses sont ensuite déshydratés en furfural, et les hexoses en hydroxy-méthyl furfural. Ces composés réagissent ensuite avec le phénol pour donner une coloration jaune-orange (Nielsen, 2017).

- Réactifs :

- Solution de glucose (100 mg/L)

- Acide sulfurique (98%)

- Phénol (5%)

- **Courbe d'étalonnage :** Dans une série de tubes on met 0.2 – 0.4 – 0.6 – 0.8 et 1 ml de la solution mère de glucose et on complète le volume à 1 ml avec l'eau distillée (les étalons sont préparés en répliques). Ensuite, 1 ml de phénol est ajouté à chaque tube, suivi de 5 ml d'acide sulfurique. Les tubes sont placés dans un bain marie à 100°C pendant 5 min, puis refroidir à l'obscurité pendant 30 min. La densité optique de chaque solution est mesurée à 490 nm à l'aide d'un spectrophotomètre, contre un blanc préparé avec l'eau distillée.

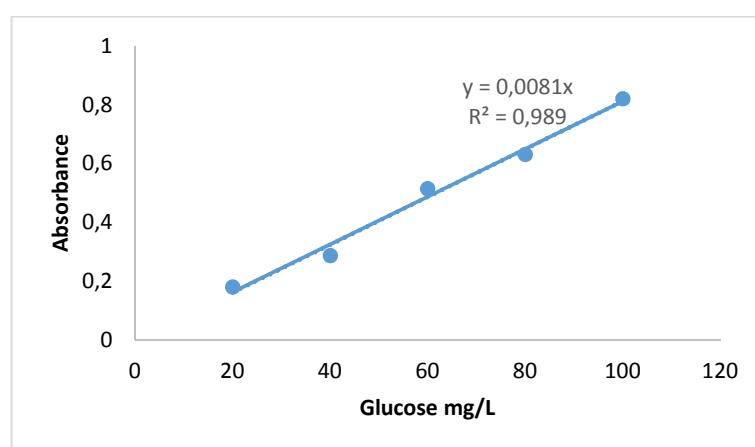


Figure 21. Courbe d'étalonnage de glucose

- Mode opératoire :

- Dans un tube à essai, on met 100 mg d'échantillon et 5 ml d'acide sulfurique 0.5 M et on place les tubes dans un bain-marie à 100°C pendant 3 heures.

- Après refroidissement, on neutralise les solutions avec les carbonates de sodium jusqu'à arrêt d'effervescence, et on complète le volume à 100 ml avec l'eau distillée.

- On prélève 0.1 et 0.2 ml de la solution dans un tube à essai et on complète le volume à 1 ml avec l'eau distillée.

- On rajoute 1 ml de phénol, 5 ml d'acide sulfurique (98%) et on place les tubes à 100°C pendant 5 minutes dans un bain-marie.

- Après refroidissement à l'obscurité pendant 30 min, l'absorbance à 490 nm est déterminée par spectrophotométrie en utilisant un blanc de référence préparé de manière similaire, en remplaçant l'échantillon par de l'eau distillée.

$$\text{Teneur en carbohydrates (\%)} = \text{mg glucose} / V \times 10 \dots\dots\dots (2)$$

mg glucose : déterminé à partir de la courbe d'étalonnage

V : volume d'échantillon dilué utilisé dans le mélange réactionnel (0.1 ml)

$$\text{Taux de carbone (\%)} = \text{teneur en carbohydrates} \times 44 \% \dots\dots\dots(3)$$

1.5. Suivi des paramètres du milieu

Les échantillons d'eau prélevés dans les bacs d'élevage sont filtrés à travers une couche de coton pour réduire la charge des matières en suspension, puis soumis à une filtration à 0.45 µm. Les flacons sont étiquetés et immédiatement conservés dans un réfrigérateur (à 4°C). Les dosages physico-chimiques sont effectués le jour même du prélèvement, au laboratoire de physico-chimie de CNRDPA.

1.5.1. Température, oxygène dissous et pH

La température de l'eau et l'oxygène dissous sont mesurés 05 fois / semaine, avec un multi-paramètre portable (YSI modèle 85). Le pH de l'eau est mesuré avec un pH-mètre portable (HANNA).

1.5.2. Ammonium

Le dosage de l'ammonium (NH₄⁺) dans les bassins d'élevage est effectué une fois par semaine selon par la méthode au bleu d'indophénol (Rodier et al., 2009).

- Principe :

En milieu alcalin et en présence de nitroprussiate (catalyseur), les ions ammonium réagissent avec les ions hypochlorite pour former une monochloramine (NH₂Cl). Ce composé réagit avec le phénol pour donner lieu à la formation du bleu d'indophénol de couleur bleue, absorbant à 630 nm.

- Réactifs :

-) Réactif 1 : hydroxyde de sodium, citrate trisodique, acide dichlorocyanurique.
-) Réactif 2 : phénol, nitroprussiate de sodium.

- Courbe d'étalonnage :

La solution mère à 1 mg/L d'ions ammonium est utilisée pour préparer 10 étalons à une gamme de concentrations allant de 0,02 à 0,8 mg/L.

Dans une série de fioles jaugées de 100 ml, on introduit 20 ml de chacune des dilutions, puis on rajoute rapidement 1 ml du réactif 1 et 1 ml du réactif 2. Les fioles sont placées ensuite à l'obscurité pendant au moins 6 heures avant la mesure de l'absorbance à 630 nm à l'aide d'un spectrophotomètre.

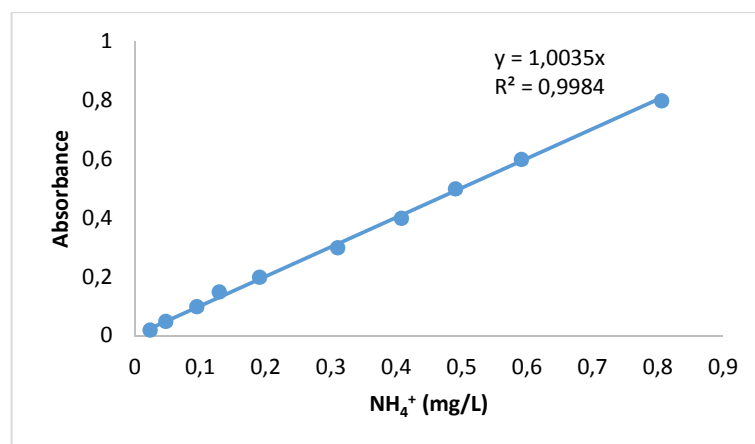


Figure 22. Courbe d'étalonnage de l'ammonium

- Mode opératoire :

Dans une fiole jaugée de 100 ml, 20 ml d'échantillon sont introduits, suivis de l'ajout rapide de 1 ml de réactif 1 et 1 ml de réactif 2. Le blanc est préparé de la même manière en utilisant de l'eau distillée. Après une période de 6 heures à l'obscurité, la lecture est effectuée à l'aide d'un spectrophotomètre (JASCO V-630) à une longueur d'onde de 630 nm. La concentration des ions ammonium est déterminée en se reportant à la courbe d'étalonnage.

1.5.3. Nitrites

L'analyse des nitrites dans les bacs d'élevage est effectuée une fois par semaine selon le protocole suivant (Rodier et al., 2009) :

- Principe :

Le principe de la méthode est basé sur la diazotation de l'amino-4-benzènesulfonamide par les nitrites en milieu acide et sa copulation avec le dichlorure de N-(naphtyl-1) diamino-1,2 éthane pour donner un complexe coloré pourpre susceptible d'un dosage spectrométrique.

- Réactifs :

Réactif de diazotation : amino-4-benzènesulfonamide (40 g), dichlorure de N-(naphtyl-1) diamino-1,2 éthane (2 g), acide orthophosphorique (100 ml), eau distillée.

- Courbe d'étalonnage :

A partir de la solution mer à 1 mg/L d'azote nitreux, 5 étalons sont préparés avec des concentrations allant de 0,02 à 0,2 mg/L.

Dans une série de fioles jaugées, 50 ml sont introduits avec 1 ml du réactif de diazotation, puis la lecture est effectuée à la longueur d'onde de 530 nm.

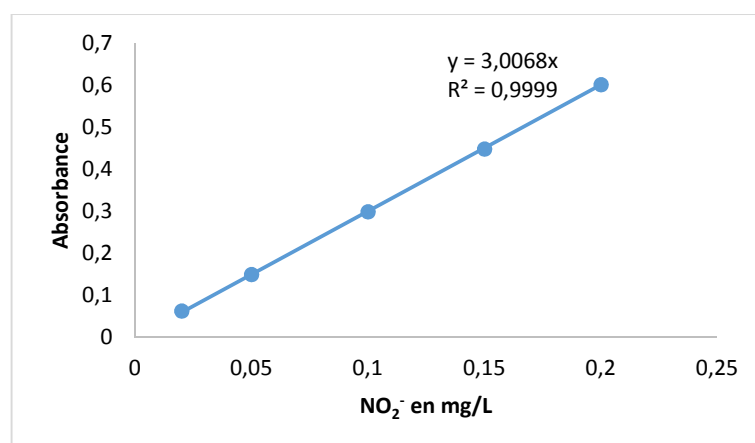


Figure 23. Courbe d'étalonnage des nitrites

- Mode opératoire :

Dans une fiole jaugée, on introduit 50 ml d'échantillon dilué et 1 ml du réactif de diazotation, puis on effectue la lecture au spectrophotomètre à une longueur d'onde de 530 nm. La concentration des nitrites est déterminée en se reportant à la courbe d'étalonnage.

1.5.4. Alcalinité

L'alcalinité de l'eau est analysée dans les bacs d'élevage à une fréquence de 1 fois/ semaine par méthode titrimétrique (Rodier et al., 2009).

- **Principe :** Le principe est basé sur la neutralisation d'un certain volume d'eau par un acide minéral dilué, en présence d'un indicateur coloré.

- Réactifs :

- Acide sulfurique (0,02 N)
- Solution de phénolphtaléine dans l'alcool à 0,5 % (m/v)
- Solution de l'indicateur coloré : vert de bromocrésol, rouge de méthyle.

- Mode opératoire :

) Détermination du titre alcalimétrique simple

Dans une fiole conique, on prélève 100 ml d'échantillon à analyser puis on rajoute 2 gouttes de la solution de phénolphthaléine. Si le pH est inférieur à 8,3, aucune coloration ne se développe

et le titre alcalimétrique simple est nul. Si le pH de l'eau est supérieur à 8,3, une coloration rose doit alors se développer. Ensuite on verse l'acide doucement à l'aide d'une burette graduée, en agitant constamment, jusqu'à décoloration complète (pH = 8,3).

Titre alcalimétrique simple (en mg de carbonate de calcium/L) = $V/10$ (04)

V : est le volume de l'acide verser en ml

J Détermination du titre alcalimétrique complet (ALC)

On rajoute 2 gouttes de l'indicateur coloré à l'échantillon traiter précédemment et on procède à la titration avec l'acide sulfurique jusqu'à disparition de la coloration bleu verdâtre et apparition de la couleur rose (pH 4.5).

ALC (en mg de carbonate de calcium/L) = $V'/10$ (05)

V' : est le volume de l'acide verser en ml

Pour cette étude, le pH de l'eau d'élevage est inférieur à 8.3, ce qui nous donne des valeurs nulles pour le titre alcalimétrique simple. Les résultats sont exprimés en titre alcalimétrique total (ALC).

1.5.5. Volume du floc (ml/ L)

Le volume du floc est déterminé 1 fois/ semaine, selon la méthode décrite par Avnimelech and Kochba (2009). On verse 1 litre d'eau à analyser dans un cône d'Imhoff en polycarbonate, maintenu en position vertical (fig.24). Le volume de matières décantées au fond du cône est déterminé après 20 minutes de sédimentation. Les résultats s'expriment en millilitres de matières décantées par litre.

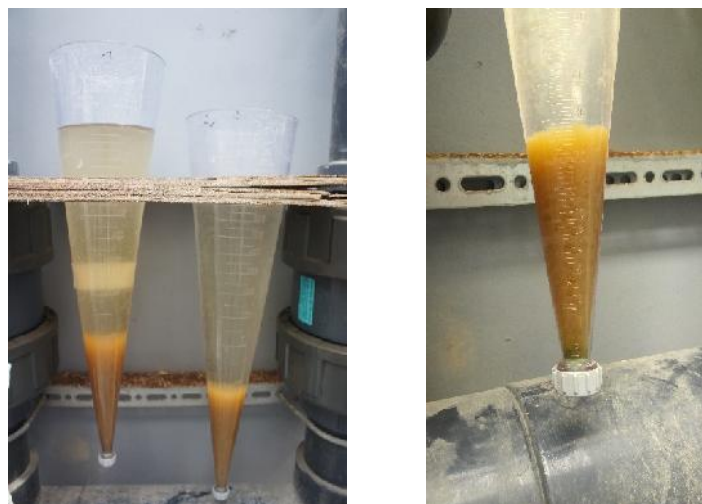


Figure 24. Mesure du volume de floc avec le cône Imhoff

1.6. Collecte des poissons et détermination des paramètres de croissance

A la fin de l'expérience, les poissons sont collectés et pesés pour estimer les performances de croissances et de l'utilisation de l'aliment selon les formules suivantes (Zhang et al., 2016):

- **Taux de survie :** $S (\%) = (N_f / N_i) \times 100 \dots \dots \dots (06)$
- **Gain de biomasse :** $GB (g) = B_f - B_i \dots \dots \dots (07)$
- **Taux de croissance spécifique :** $TCS (\% / j) = 100 \times [(\ln (PM_f) - \ln (PM_i)) / t \dots \dots \dots (08)$
- **Indice de Conversion :** $IC = \text{Poids total d'aliment distribué (kg)} / GB (kg) \dots \dots \dots (09)$

N_f : nombre final des poissons. N_i : nombre initial des poissons. PM_f : poids moyen final des poissons. PM_i : poids moyen initial des poissons. t : temps en jour. B_f : biomasse finale. B_i : biomasse initiale

Après collecte finale des poissons, l'eau d'élevage récupérée dans les 3 bacs d'élevage (milieu riche en biofloc) est inoculée dans 09 nouveaux bacs de 350 L. Le volume des bacs est complété avec l'eau. La mise en charge des bacs est réalisée avec 360 alevins du tilapia de 3.05 ± 0.12 g (40 individus/ bac). Les poissons sont nourris à une fréquence de 1 fois/ jour avec un aliment de 1.5 mm (54 % de protéines). Le sucre blanc est rajouté quotidiennement à la fin de la journée, en fonction de la quantité d'aliment distribuée pour maintenir le ratio C/N autour de 20. Les quantités de sucre utilisées sont calculées selon la formule citée dans le chapitre précédent (Duy & Van Khanh, 2018). Cette phase qui a duré 03 mois entre Septembre et Novembre 2017, avait pour objectif de maintenir un volume suffisant d'eau riche en floc, qui servira pour le lancement des expériences ultérieures.

1.7. Analyse des données

Les résultats des paramètres du milieu sont présentés sous forme de moyennes accompagnées de la déviation standard pour indiquer la variabilité des données autour de la moyenne. Cependant, comme il n'y a pas de répliques (un seul bac par traitement), les tests statistiques comparatifs n'ont pas été effectués pour les paramètres du milieu et les performances zootechniques.

2. Résultats

2.1. Teneurs en glucides

La teneur en glucides dans la mélasse est de 67.8 %, ce qui correspond à 30 % de carbone.

La teneur en glucides dans le sucre blanc est de 96.5%, ce qui correspond à 42% de carbone.

2.2. Evolution des paramètres du milieu

Les valeurs moyennes des paramètres physico-chimiques dans les 3 bacs d'élevage sont consignées dans le tableau 9.

La température de l'eau varie entre 25 et 28 °C, avec une moyenne d'environ 26.6 °C. La teneur en oxygène dissous reste supérieure à 6 mg/L dans tous les bacs d'élevage. Ces deux paramètres étaient similaires entre les 3 bacs d'élevage, grâce à l'installation de thermostats et de diffuseurs d'air.

Concernant le pH, les valeurs moyennes varient de 7.6 dans le bac 3 à 7.75 dans le bac 1. L'alcalinité de l'eau était plus faible dans le bac 3, avec une concentration moyenne de 125.6 mg/L, par rapport aux bacs 1 et 2 (131.7 et 132.8 mg/L respectivement).

Les teneurs en substances azotées étaient plus élevées dans les bacs 2 et 3 par rapport au bac 1, avec des valeurs maximales dépassant 9 mg/L pour l'ammonium et 12 mg/L pour les nitrites. Les valeurs moyennes du volume du floc augmentent avec l'accroissement de la biomasse des poissons dans les bacs d'élevage. Des concentrations maximales supérieures à 120 ml/L ont été enregistrées durant cette expérience.

Tableau 9. Valeurs moyennes \pm déviations standards des paramètres physico-chimiques dans les bacs d'élevage du tilapia en système BFT, à trois densités de stockage

Paramètre	Bac1	Bac2	Bac3
T °C	26.68 \pm 0.88	26.66 \pm 0.87	26.61 \pm 0.81
DO (mg/L)	6.89 \pm 0.46	6.80 \pm 0.42	6.79 \pm 0.46
pH	7.75 \pm 0.06	7.69 \pm 0.15	7.60 \pm 0.16
NH ₄ ⁺ (mg/L)	1.30 \pm 1.33	2.04 \pm 1.88	2.35 \pm 2.77
NO ₂ ⁻ (mg/L)	1.89 \pm 1.40	3.26 \pm 2.91	4.96 \pm 4.41
ALC (mg/L)	131.7 \pm 13.6	132.8 \pm 12.2	125.6 \pm 21.6
VF (ml/L)	42.1 \pm 38.3	37.1 \pm 32.8	47.8 \pm 35.7

La figure 25 montre l'évolution en fonction du temps des principaux paramètres du milieu influencés par le système biofloc dans les 3 bacs d'élevage.

Les concentrations d'ammonium augmentent rapidement dans le milieu au cours des quatre premières semaines, atteignant des pics dépassant 9 mg/L dans le bac3. A partir de la cinquième semaine, les niveaux des NH_4^+ diminuent progressivement pour se stabiliser à des valeurs inférieures à 0.5 mg/L à la fin de l'expérience.

Dans les bacs1 et 2, les nitrites s'accumulent au cours des 5 premières semaines, atteignant des pics supérieurs à 10 mg/L. Ensuite, les concentrations se stabilisent entre 3 et 4 mg/L de la septième à la dixième semaine, puis diminuent pour atteindre des valeurs inférieures à 2 mg/L lors de la dernière semaine de l'expérience.

L'alcalinité de l'eau présente une tendance globale de diminution en fonction du temps dans les 3 bacs d'élevage. Après six semaines d'élevage, la teneur en alcalinité diminue pour atteindre environ 100 mg/L dans le bac 3 et 120 mg/L dans le bac 2. L'augmentation de l'alcalinité à la fin de l'expérience est liée au renouvellement d'eau dans les bacs d'élevage lors de l'élimination de l'excès de floc.

Le volume du floc augmente dans les bacs d'élevage, atteignant des pics autour de 120 ml/L entre la sixième et la huitième semaine de l'expérience. Les concentrations diminuent à partir de la huitième semaine grâce à l'élimination des matières décantables par le fond des bacs, avec des renouvellements partiels d'eau.

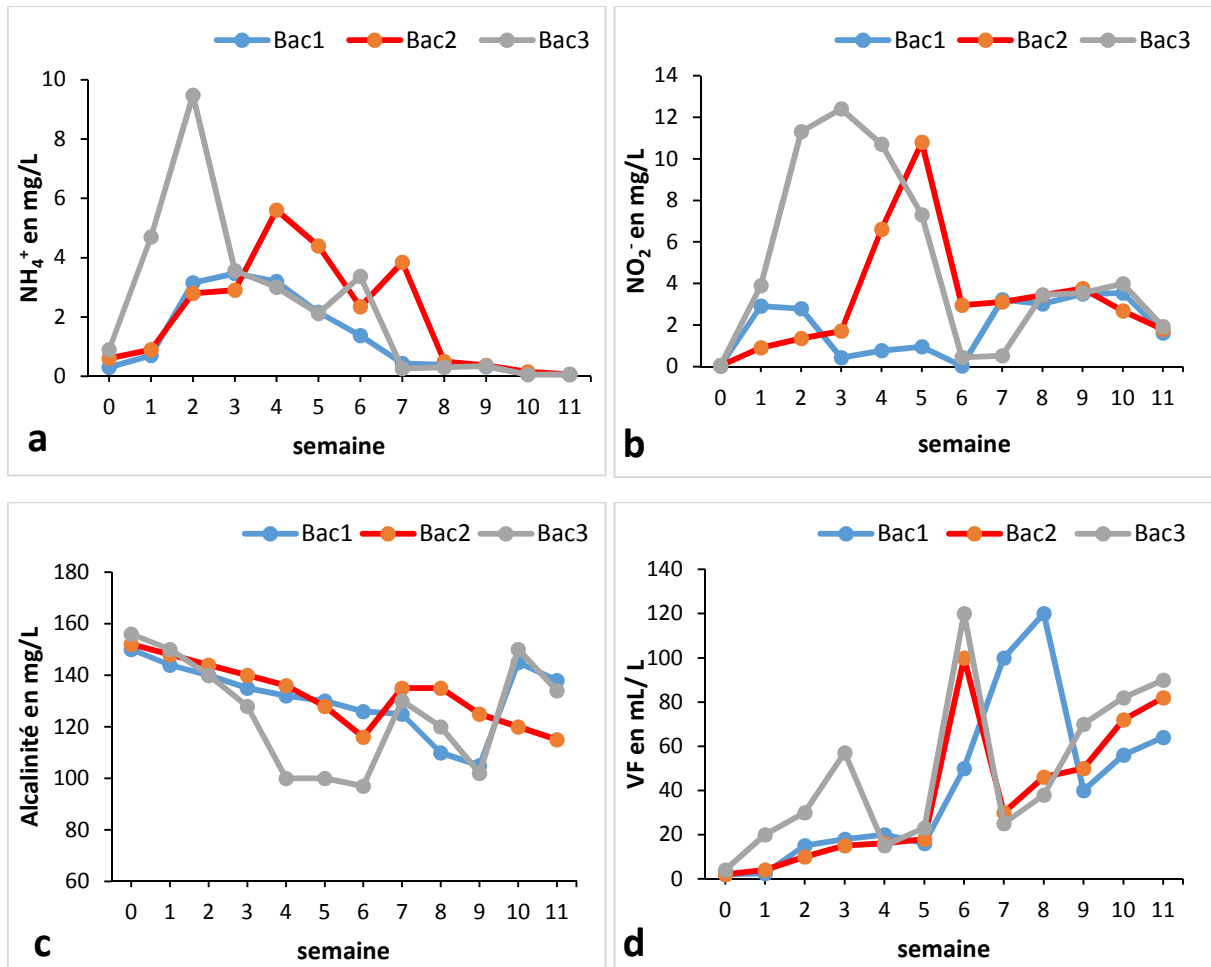


Figure 25. Evolution des paramètres du milieu dans les 3 bacs d'élevage au cours de la période de l'expérience : (a) Ammonium (b) Nitrites (c) Alcalinité (d) Volume du floc

2.3. Paramètres de croissance

Aucun cas de mortalité n'a été enregistré dans les 3 bacs d'élevage au cours de cette expérience. Le suivi des performances de croissance des poissons dans les 3 bacs d'élevage (tableau 10) montre que les poissons ont augmenté leur poids moyen initial, qui était compris entre 134,7 g et 145,8 g, pour atteindre des poids situés entre 169,2 g et 205,3 g à la fin de l'expérience. Le taux de croissance le plus élevé a été enregistré dans le bac 1 (0,46% par j) par rapport aux bacs 2 et 3 (0,34 et 0,25 % par jour, respectivement). Le meilleur indice de conversion alimentaire a été enregistré dans le bac 1 (IC = 1,8) par rapport au bac 2 (IC = 3,1) et au bac 3 (IC = 2,9).

Tableau 10. Performances zootechniques des tilapias élevés à 3 densités d'élevage en système BFT

	BAC1	BAC2	BAC3
Effectif	4	6	11
PM_i (g)	145.8 ± 13.4	134.7 ± 13	140.4 ± 15.3
B_i (g)	583	808	1544
PM_f (g)	205.3 ± 11.3	173.3 ± 10.5	169.2 ± 14.5
B_f (g)	821	1040	1861
Aliment total distribué (g)	417.2	709	923.6
Mélasse totale distribuée (ml)	795.2	1329.8	1790.3
TCS (% / j)	0.46	0.34	0.25
IC	1.8	3.1	2.9
Taux de survie (%)	100	100	100

3. Discussions

3.1. Paramètres du milieu

L'objectif de cette expérience était de suivre l'évolution des paramètres physicochimiques durant la phase de maturation du milieu biofloc « phase start-up » et de préparer un milieu d'élevage stable pour le lancement des expériences ultérieures.

Les températures de l'eau et l'oxygène dissous ont été maintenues à des niveaux acceptables pour favoriser la croissance du tilapia et le développement du floc. La plage de température considérée comme acceptable pour la croissance du tilapia se situe généralement entre 25 et 32 °C, avec un optimum de 27 à 30 °C. De plus, il est recommandé que la concentration d'oxygène dissous soit maintenue en-dessus de 5 mg/L pour assurer des conditions optimales (El-Sayed, 2006 ; DeLong et al., 2009). Selon Emerenciano et al. (2017), des températures inférieures à 20°C et des teneurs en oxygène dissous au-dessous de 4 mg/L peuvent avoir un impact négatif sur le développement microbien dans le milieu biofloc.

La diminution du pH et de l'alcalinité dans les bacs d'élevage est liée aux processus microbiens de dégradation des déchets azotés par les bactéries nitrifiantes et les bactéries hétérotrophes (Ebeling et al., 2006). L'alcalinité représente la capacité de l'eau à résister à un changement de pH lors de l'ajout d'acides ou de bases, c'est à dire son pouvoir tampon. Dans le cas du milieu biofloc, il est important de maintenir des réserves d'alcalinité dans l'eau, car lorsque cette

dernière est épuisée, le pH de l'eau peut chuter brutalement avec inhibition de fonctionnement des bactéries, notamment les bactéries nitrifiantes (Hargreaves, 2013). L'auteur recommande de maintenir l'alcalinité à des valeurs supérieures à 100 mg/L dans le système BFT, par l'addition de bicarbonates de sodium ou le renouvellement partiel de l'eau.

Au cours de cette expérience, nous avons constaté l'augmentation du volume de floc avec des pics dépassant les 120 ml/L à partir de la 6^{ème} semaine. Ces valeurs sont dépassent les niveaux optimaux recommandés en élevage du tilapia, qui se situent entre 20 et 50 ml/L (Emerenciano et al., 2017). Les valeurs moyennes du volume de floc étaient plus élevées dans le bac 3, où la biomasse des poissons est plus importante par rapport aux bacs 1 et 2. De manière générale, dans les systèmes BFT, une augmentation rapide des matières en suspension est observée dans les bassins lorsque la biomasse de poissons est élevée, ce qui entraîne une hausse de la consommation d'oxygène et peut provoquer un stress chez les poissons (Avnimelech, 2011).

L'évolution des teneurs en substances azotées montre l'accumulation des NH_4^+ et des NO_2^- dans le milieu, avec des pics de concentrations entre la deuxième et la troisième semaine, suivis d'une diminution progressive des concentrations. A partir de la 7^{ème} semaine, les teneurs en substances azotées se stabilisent dans le milieu d'élevage. Selon Hargreaves (2013), les variations des paramètres dans le milieu BFT pendant la phase de « start-up » sont similaires aux systèmes de recirculation conventionnels, qui se caractérisent par des pics de concentrations d'ammonium suivis par des pics de nitrites au fur et à mesure que les différentes populations de bactéries se développent. La durée de la phase de maturation du floc dépend de multiples facteurs tel que la température, le ratio C/N, le taux de nourrissage et la diversité des micro-organismes présentes dans le milieu (Hargreaves, 2013).

Dans cette expérience, nous avons observé une stabilisation des concentrations en substances azotés à partir de la 6^{ème} et la 7^{ème} semaine, ce qui correspond à la durée de maturation du milieu biofloc. L'ajout de la mélasse (équivalent à 30% de Carbone) à un ratio C/N de 20 a favorisé le développement initial du floc. Des tendances similaires des variations des teneurs en produits azotés sont observées dans les systèmes BFT, avec des pics de concentrations pendant les premières semaines du développement du floc, qui est suivis par une diminution progressive (Schveitzer et al., 2013; Luo et al., 2014; Ray & Lotz, 2014; Xu et al., 2020). L'utilisation de glucides simples tel que le sucre ou la mélasse pendant la phase de démarrage du système BFT permet d'accélérer le développement des bactéries hétérotrophes et le processus d'assimilation de l'azote dans le milieu (Gomes Vilani et al., 2016 ; Abakari et al.,

2021^b). Dans les systèmes BFT, le moyen le plus efficace pour éliminer les substances azotées toxiques consiste à favoriser la voie hétérotrophe d'assimilation microbienne en maintenant des rapports C/N appropriés dans le milieu d'élevage (Avnimelech, 1999). Pendant la phase initiale de formation du biofloc, l'application de ratios C/N élevés est un facteur important pour le développement et la stabilisation des communautés hétérotrophes dans les systèmes BFT (Emerenciano et al., 2017; Deng et al., 2020).

Au cours de cette expérience, des pics de concentrations plus élevées d'ammonium et de nitrites ont été observés dans le bac 2 (5.6 mg/L et 10.8 mg/L respectivement) et le bac 3 (9.4 mg/L et 12.4 mg/L respectivement), par rapport au bac 1 à faible densité de stockage (3.4 mg/L de NH_4^+ et 3.5 mg/L de NO_2^-). Les déchets azotés (ammonium, nitrites et nitrates) sont générés par la dégradation des protéines alimentaires et leurs production est proportionnelle à la biomasse des poissons dans le milieu.

3.2. Performances de croissance

Les tilapias élevés dans le bac 1 avec une faible densité de stockage ont montré de meilleurs indices de croissance et de conversion alimentaire par rapport aux bacs 2 et 3. La diminution de la croissance observée dans les bacs avec une biomasse de poissons plus élevée est liée à l'augmentation des concentrations de déchets azotés et du volume de floc, dépassant les valeurs recommandées pour l'élevage du tilapia. En général, la distribution d'une grande quantité d'aliments pendant la phase initiale de formation du biofloc entraîne une augmentation des concentrations d'ammonium et de nitrites à des niveaux toxiques pour les poissons, ce qui peut affecter leur survie, leur croissance, leur conversion alimentaire et leur résistance aux maladies (Hargreaves, 2013).

Les résultats de cette expérience indiquent que l'utilisation de faibles densités de poissons est recommandée en phase de démarrage du système BFT afin de mieux contrôler les paramètres du milieu. Le milieu BFT pouvait être développé dans les bassins d'élevage avant l'introduction des poissons, par la distribution des granulés combiné à l'ajout d'une source de carbone jusqu'à stabilisation des paramètres du milieu (Luo et al., 2017). La formation initiale du floc peut être accélérée par l'utilisation d'inoculum prélevés à partir d'un milieu BFT équilibré ou par l'utilisation d'inoculum bactérien disponibles dans le commerce (Crab et al., 2012; Emerenciano et al., 2017; Harun et al., 2019).

Chapitre III

**Effets du ratio C/N sur les performances d'élevage des juvéniles
du tilapia en système biofloc**

1. Matériel et méthodes

1.1. Lieu et période

Les expériences d'élevage ont été menées sur une période de 62 jours, entre les mois de Décembre 2017 et le Février 2018, dans une serre en feuilles de polycarbonate alvéolaires. La serre située au niveau de la station expérimental de pisciculture marine, est conçue pour le pré-grossissement des poissons marins et comporte 16 bassins en béton de 16m³ chacun. Un espace libre a été aménagé pour l'installation de notre unité expérimentale, par la réalisation de travaux d'électricité, de plomberie, d'installation de bacs, entre autres.

1.2. Dispositif expérimental

L'unité expérimentale comporte 12 bacs cylindro-coniques en PP, d'un volume unitaire de 350 litres (Fig. 26). Neuf bacs fonctionnent en système biofloc (groupes BFT), sans renouvellement d'eau sauf pour compenser les pertes par évaporation ou par élimination de l'excès des matières en suspension, et trois bacs fonctionnent selon un système ouvert de renouvellement d'eau (groupe contrôle). Les bacs du groupe contrôle (C) sont alimentés en continu en eau douce à partir d'un bassin réservoir en béton de 16 m³, qui est rempli régulièrement à partir d'un puits. Au début de l'expérience, le taux de renouvellement d'eau est de 4 fois par jour, avec un débit de 58 L/h/bac. Par la suite, ce taux est progressivement augmenté jusqu'à atteindre 8 fois par jour, avec un débit de 117 L/h/bac.

Le bassin réservoir est équipé d'une pompe immergée, qui alimente en eau les bacs d'élevage via des canalisations en PVC (20 mm), équipées de vannes de réglage de débit.

L'oxygénation de l'eau est assurée par 04 aérateurs (ATHMAN 8000 HP). Chaque bassin est doté de 2 diffuseurs cylindriques en pierre, qui servent à l'aération et à la maintenance du floc en suspension, ainsi qu'un thermostat à température réglable de 500 W pour le chauffage de l'eau. Dans les bacs fonctionnant en circuit ouvert, des tubes en PVC (50 mm) percés sont placés au niveau de l'évacuation pour empêcher la sortie des poissons.



Figure 26. Bacs d'élevage des juvéniles du tilapia en système BFT et en circuit ouvert

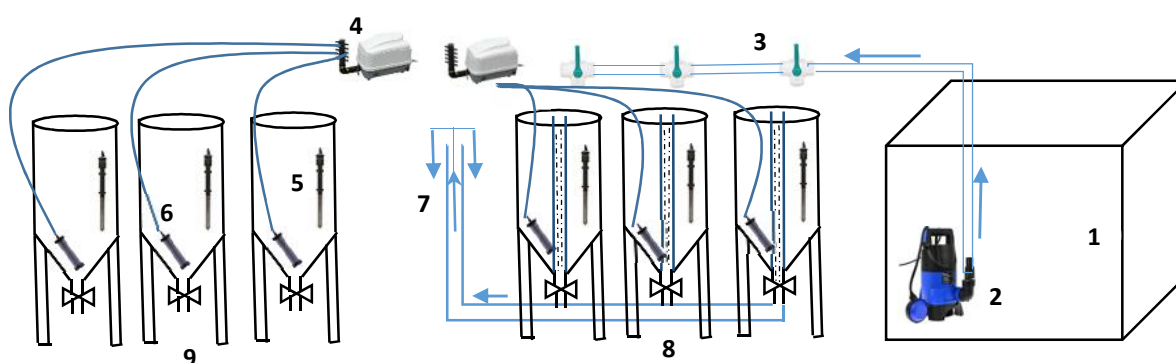
1.3. Mise en charge et protocole d'élevage

Le matériel biologique (juvéniles d'*Oreochromis niloticus*) est issu de la station expérimentale du développement de l'aquaculture saharienne de Ouargla. Le transport des poissons entre Ouargla et Bousmail a été effectué dans des sacs en plastique de 40 L remplis à un tiers d'eau et deux tiers d'oxygène.

Pour accélérer le développement initial du floc dans la nouvelle culture, les bacs du système BFT sont remplis avec l'eau riche en biofloc, comme suggéré par Krummenauer et al. (2014). L'eau riche en biofloc est pompé à partir de bassins d'élevage en système BFT, dont les paramètres du milieu sont stabilisés (0,3 mg/L d'ammonium, 0,12 mg/L de nitrites, 150 mg/L de nitrates, 455 mg/L de MES et 160 mg/L d'alcalinité).

Quatre cent vingt juvéniles du tilapia de sexes mixtes, pesant en moyenne $24,2 \pm 0,1$ g par individu, sont distribués dans les 12 bacs de 350 L (35 individus par bac). Les bacs sont recouverts de filets de pêche à maille de 06 mm pour éviter l'échappement des poissons. La température de l'eau est maintenue à environ 24°C, avec l'application de la photopériode naturelle (élevage sous serre).

L'étude consiste à tester 3 régimes en système biofloc (BFT) à trois niveaux du rapport Carbone/Azote : C/N= 14 (groupe BFT14), C/N= 17 (groupe BFT17) et C/N=20 (groupe BFT20), en comparaison à un groupe contrôle (C) en circuit ouvert. L'emplacement des bacs est aléatoire, avec quatre traitements en triplicatas (fig.27).



1 : bassin réservoir. 2 : pompe immergée. 3 : vanne. 4 : pompe à air. 5 : thermostat. 6 : diffuseur.
7 : trop-plein d'évacuation. 8 : bacs du groupe contrôle. 9 : bacs BFT

Figure 27. Schéma de fonctionnement des bacs expérimentaux

L'aliment artificiel flottant est distribué à satiété, à une fréquence de trois fois par jour (à 08H30, 12H00 et 16H00) pendant 06 jours par semaine. Les granulés sont distribués manuellement en observant le comportement alimentaire des tilapias en surface des bacs. Deux types de granulés, de marque COPPENS ont été utilisés : granulés de 02 mm durant le premier mois et de 03 mm durant le deuxième mois de l'expérience. La composition des granulés utilisés est décrite dans l'annexe 2. Les quantités d'aliments distribués sont notées quotidiennement dans les fiches de suivi. Dans les bacs des groupes BFT, la mélasse est ajoutée quotidiennement en fonction de la quantité de l'aliment distribué, afin ajuster le ratio C/N. La mélasse est préalablement diluée dans 1 litre d'eau et distribuée dans le bac d'élevage après le dernier repas. La quantité de mélasse nécessaire est calculée selon la formule modifiée de Duy & Van Khanh (2018), citée dans le chapitre précédent.

1.4. Suivi des paramètres du milieu

L'analyse des paramètres physico-chimique de l'eau a été réalisée au laboratoire de CNRDPA (laboratoire de la division des écosystèmes aquatiques). Les échantillons d'eau prélevés dans les bacs d'élevage sont filtrés à 0.45 μm et conservés immédiatement au réfrigérateur à 4°C.

Le pH, la température et la teneur en oxygène dissous sont mesurés quotidiennement avec un pH-mètre (HANNA) et un multi-paramètre (YSI modèle 85) respectivement. Les concentrations d'ammonium, de nitrites et de l'alcalinité sont mesurées deux fois par semaine par dosage colorimétrique selon Rodier et al. (2009) (voir chapitre II). Le volume du floc est déterminé deux fois/ semaine en utilisant deux Imhof cônes.

Le dosage des nitrates est effectué une fois par semaine en utilisant des kits de dosage MQuant 1100200001. Les bandelettes nitrates sont trempées dans de l'eau pendant 1 seconde, et après exactement 60 secondes, la lecture est effectuée en comparant la couleur de la bandelette à l'échelle colorimétrique fournie dans la boîte du kit.

Des échantillons du floc sont observés sous microscope équipé de caméra, au niveau du laboratoire de l'ENSSMAL, avec prise des photos.

L'analyse des matières en suspension (MES) est effectuée une fois par semaine dans les bacs des groupes BFT, en utilisant la méthode de filtration telle que décrite par Rodier et al. (2009) :

Pour effectuer l'analyse, un échantillon d'eau de 100 ml est versé sur un filtre en fibre de verre (1,2 µm), en utilisant une rampe de filtration équipée de pompe à vide. Ensuite, le filtre est séché dans une étuve à une température de 105°C. Après refroidissement dans un dessiccateur, les filtres sont pesés à l'aide d'une balance de précision.

$$\text{MES (mg/L)} = (M_1 - M_0) / V \dots\dots\dots(10)$$

M_0 : masse du filtre avant utilisation (mg), M_1 : masse du filtre après utilisation, V : volume d'eau filtré.

Pour l'élimination de l'excès de MES dans les bacs d'élevage en système BFT, nous avons mis en place un système de décantation à l'extérieur des bacs (fig.28). Ce système consiste en un bac cylindro-conique de 80 L installé à une hauteur supérieure aux bacs d'élevage. L'eau est pompée dans le bac de décantation à faible débit à l'aide d'une pompe immergée, puis elle retourne dans le bac d'élevage par le biais d'un trop-plein. Les déchets accumulés dans le fond du décanteur sont éliminés via une vanne de vidange installée dans le fond du bac.



Figure 28. Système de décantation du floc

1.5. Paramètres zootechniques

Après 30 jours d'élevage (J30) et à la fin de l'expérience (J62), tous les poissons sont collectés dans les bacs à l'aide d'épuisettes. Un pesage et un comptage sont effectués afin de déterminer les paramètres de croissance et de survie des poissons (fig. 29).

Les variables étudiés sont déterminés selon les formules suivantes : (Zhang et al., 2016 ; Kamilya et al., 2017)

- **Le taux de survie :** $S (\%) = (N_f / N_i) \times 100 \dots \dots \dots (11)$
- **Le gain moyen quotidien du poids : GMQ (g/j) = $(PM_f - PM_i) / t \dots \dots \dots (12)$**
- **Taux de croissance relatif :** $TCR (\%) = 100 \times (PM_f - PM_i) / PM_i \dots \dots \dots (13)$
- **Taux de croissance spécifique :** $TCS (\% / j) = 100 \times [Ln (PM_f) - Ln (PM_i)] / t \dots \dots \dots (14)$
- **La densité finale de stockage :** $FSD (kg/m^3) = \text{Biomasse finale (kg)} / V (m^3) \dots \dots \dots (15)$
- **Indice de Conversion :** $IC = \text{Poids d'aliment distribué} / \text{gain en biomasse} \dots \dots \dots (16)$

N_f : nombre final des poissons. N_i : nombre initial des poissons. PM_f : poids moyen final des poissons. PM_i : poids moyen initial des poissons. t : temps en jour. V : volume d'élevage



Figure 29. Collecte des poissons à la fin de l'expérience

1.6. Echantillonnage et dissection

A la fin de l'expérience (J62), quatre poissons sont prélevés de manière aléatoire dans chaque bac d'élevage (12 individus par groupe expérimental). Le nourrissage est arrêté 24 heures avant l'échantillonnage. Les individus prélevés sont euthanasiés à l'aide d'une dose létale de 2-phénoxy-éthanol à 0.2 % (van der Salm et al., 2005), puis disséqués afin de prélever le tube digestif, le foie et les branchies. Les organes sont prélevés dans des tubes Eppendorf de 5 ml préalablement étiquetés, puis immédiatement placés dans des boîtes en polyester isotherme remplies de glace écaillés (fig.29). Les tubes sont stockés dans un congélateur à -

80°C (marque LABOLOGIC) jusqu'à utilisation. Le poids individuel et le sexe des poissons prélevés sont enregistrés dans le cahier du suivi.



Figure 30. Opération de dissection et conservation des échantillons

1.7. Préparation des homogénats

Les échantillons de tube digestif et du foie sont dégelés dans un bécher, puis coupés en petits morceaux et dilués 10 fois dans une solution tampon Tris-HCl (pH 7.5), avant d'être homogénéisés à l'aide d'un mixeur électrique. Toutes les manipulations sont effectuées sur la glace (à une température de 4°C).

Les homogénats sont centrifugés à 6000 tr/mn pendant 60 minutes à 4°C, à l'aide d'une centrifugeuse réfrigérée (Centurion Scientific K3). Le surnageant de chaque échantillon est transféré dans six tubes Eppendorfs de 1.5 ml et conservés à -80°C pour effectuer les dosages enzymatiques ultérieurement.

1.8. Dosage de l'activité des enzymes digestives

1.8.1. Protéases

- Principe : Le dosage des protéases dans le tube digestif et le foie des juvéniles du tilapia a été effectué selon la méthode décrite par Cupp-Enyard (2008) et Anasori et al. (2015), en utilisant la caséine comme substrat. L'hydrolyse enzymatique de la caséine libère la tyrosine ainsi que d'autres acides aminés et des fragments de peptides. Le réactif de Folin-Ciocalteu réagit principalement avec la tyrosine libre en donnant une coloration bleue permettant un dosage colorimétrique. Les valeurs de l'absorbance sont comparées à une courbe d'étalonnage établie en utilisant une solution standard de tyrosine.

- Réactifs :

- Tampon potassium phosphate 50mM (pH 7.5) : Préparation d'une solution à 11.4 mg/ml de potassium phosphate dibasic tri-hydraté, puis ajustement du pH à 7.5 avec le HCl 1M.
- Caséine à 1% : Préparation d'une solution de 10 mg/ml de caséine de lait bovin dans le tampon potassium phosphate. La température est élevée progressivement à 80-85°C avec agitation douce jusqu'à dissolution complète, puis le pH est ajusté à 7.5 avec le NaOH.
- Acide trichloroacétique (TCA) à 5%
- Carbonate de sodium anhydre 500 mM (53 mg/ml)
- Solution de Folin-Ciocalteu 2M.
- Solution de L-tyrosine (0.1 mg/ml)

- Courbe d'étalonnage :

A partir de la solution mère de L-tyrosine, on prépare 05 dilutions avec des concentrations de 5, 10, 20, 40 et 50 µg/ml. Dans des tubes à essai de 10 ml, on met 1 ml de chacune des dilutions, 2.5 ml de Na₂CO₃ et 0.5 ml de réactif de Folin-Ciocalteu dilué 4 fois.

Après une centrifugation de 05 min à 9000 tr/mn, la lecture des densités optiques est effectuée à 660 nm contre un blanc établi avec de l'eau distillée.

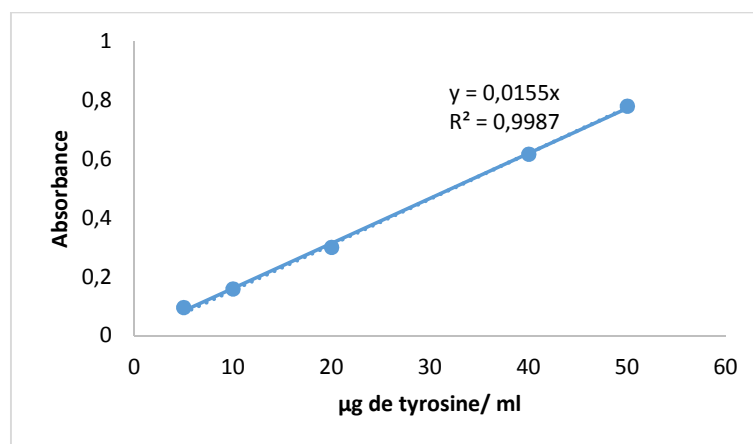


Figure 31. Courbe d'étalonnage de tyrosine

- Mode opératoire :

Dans une série de tube à essais déposés dans un bain marie à 37°C, on met 1 ml de caséine (1%), puis on rajoute 1 ml de l'échantillon dilué. Les dosages sont effectués en répliquas.

Après une incubation à 37°C pendant 10 min pour les échantillons du tube digestif et 20 min pour les échantillons du foie, la réaction est stoppée en ajoutant 4 ml de TCA. Un blanc est

préparé en ajoutant le volume d'échantillon après le TCA. Les tubes sont incubés pendant 30 minutes à 37°C, puis centrifugés à 9000 tr/mn pendant 5 min. Ensuite, 1 ml de surnageant est mélangé avec 2.5 ml de Na₂CO₃ et 0.5 ml de réactif de Folin-Ciocalteu dilué 4 fois. Les tubes sont vortexés puis maintenus à l'obscurité pendant 30 minutes avant d'être centrifugés à 9000 tr/mn pendant 5 min pour permettre la lecture de l'absorbance du surnageant à 660 nm.

L'expression des résultats :

L'activité enzymatique est exprimée en unité internationale par mg de protéines. Une unité (U) de l'activité des protéases correspond à la quantité d'enzyme nécessaire pour libérer 1 µg de tyrosine par minute (Saha et al., 2006). L'activité des protéases est déterminée selon la formule suivante (Cupp-Enyard, 2008) :

$$U / \text{ml de protéases} = \mu\text{g tyrosine} \times \text{FD} \times \text{Vt} / t \times \text{V}_1 \dots \dots \dots (17)$$

µg tyrosine : déterminé à partir de la courbe d'étalonnage

FD : facteur de dilution

Vt : volume du mélange réactionnel (6 ml)

V₁ : volume de l'échantillon (1ml)

t : temps de réaction en minute

1.8.2. Alpha-amylase

Principe : L'activité de l'alpha-amylase dans le tube digestif et le foie des juvéniles du tilapia est déterminée selon la méthode de Bernfeld (1955) en utilisant l'amidon comme substrat. Le principe est basé sur la réduction de l'acide 3,5-dinitrosalicylique (DNS) par les sucres réducteurs (maltose) libérés de l'amidon, pour donner un composé de coloration rouge susceptible d'un dosage spectrophotométrique.

Réactifs :

- Tampon phosphate (pH 6.9) : préparation d'une solution contenant 2.4 mg/ml de phosphate de sodium monobasique et 0.39 mg/ml de chlorure de sodium. Le pH est ajusté à 6.9 avec le NaOH.
- Solution d'amidon à 1% : dissolution de 1 g d'amidon dans 100 ml du tampon phosphate, avec agitation et chauffage jusqu'à ébullition pendant 15 min.
- Hydroxyde de sodium (NaOH) à 80 mg/ml

- Réactif de DNS : dissolution de 1g de DNS dans 50 ml d'eau distillée et addition de 30 g de sodium potassium tartrate trihydraté et 20 ml de NaOH (2N) et ajustement du volume à 1000 ml.
- Solution de maltose à 10 $\mu\text{mol/ml}$

- Courbe d'étalonnage :

A partir de la solution mer de maltose, dix dilutions ont été préparées avec des concentrations entre 0.3 et 6 $\mu\text{mol/ml}$. Dans une série de tubes à essai, 1 ml de chaque dilution de maltose a été ajouté à 1 ml de réactif DNS, puis l'ensemble a été incubé dans un bain-marie à 100°C pendant 5 minutes. Après incubation, 10 ml d'eau distillée ont été ajoutés à chaque tube. L'absorbance de chaque solution a été mesurée à 540 nm en utilisant un spectrophotomètre.

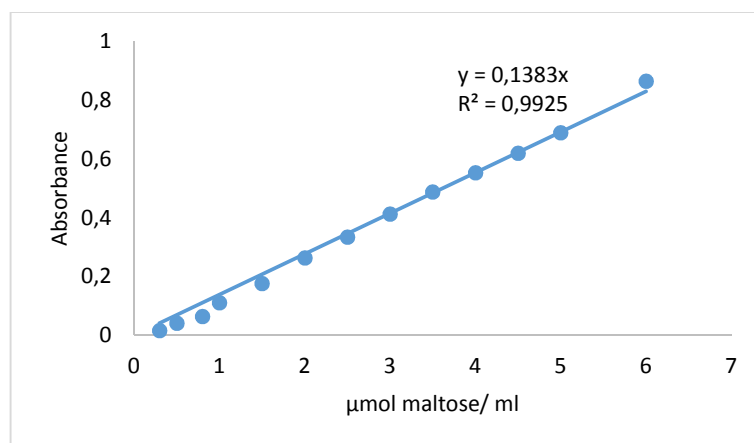


Figure 32. Courbe d'étalonnage de maltose

- Mode opératoire :

Dans une série de tubes à essai, 0,5 ml de la solution d'amidon (1%) et 0,5 ml de l'échantillon dilué ont été ajoutés, et l'ensemble a été laissé à incuber pendant 3 minutes à 25°C. La réaction a été stoppée par addition de 1 ml de réactif de DNS, suivi d'une incubation de 5 minutes dans de l'eau bouillante. Après refroidissement à la température ambiante, 10 ml d'eau distillée ont été ajoutés et la densité optique de chaque solution a été mesurée à 540 nm.

- L'expression des résultats :

Une unité de l'activité de l'alpha-amylase correspond à la quantité d'enzyme nécessaire pour libérer 1 μmol de maltose par minute à 25°C. L'activité est calculée selon la formule suivante :

$$\mathbf{U / ml \text{ d' } -amylase} = \mu\text{mol maltose} \times \text{FD} / t \times v \dots \dots \dots (18)$$

μmol maltose : déterminé à partir de la courbe d'étalonnage

FD : facteur de dilution

v : volume d'échantillon utilisé

t : temps de réaction en minutes (3 min)

1.9. Dosage des enzymes antioxydants

1.9.1. Catalase

- **Principe** : L'analyse de l'activité de la catalase (CAT) est effectuée dans le foie des juvéniles du tilapia selon la méthode décrite par Aebi (1984). La CAT est une oxydoréductase hémique qui catalyse la dismutation du peroxyde d'hydrogène (H_2O_2) en eau et en dioxygène. La disparition de H_2O_2 est suivie directement à travers la diminution de l'absorbance à 240 nm par unité de temps, qui correspond à l'activité catalase.

- Réactifs :

- Tampon phosphate 67 mM (pH = 7) : Dissolution de 3.522 g de Potassium dihydrogène phosphate (KH_2PO_4) et 7.268 g de Sodium phosphate monobasique monohydrate ($\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$) dans 900 ml d'eau distillée, puis on ajuste le pH à 7 et on complète de volume à 1000 ml.
- Peroxyde d'hydrogène à 3% (m/v).

- Mode opératoire :

Dans une série de tubes, on met 2.5 ml de tampon phosphate avec 0.1 ml de H_2O_2 et on laisse incuber à 25°C pendant quelques minutes. Ensuite, 20 μl de l'échantillon ont été ajoutés, et le mélange a été transféré dans une cuve en quartz. L'absorbance à 240 nm a été mesurée en mode cinétique pendant 1 minute, contre un blanc contenant uniquement le tampon phosphate (annexe 03).

- L'expression des résultats :

Une unité de l'activité catalase correspond à la quantité d'enzyme qui décompose 1 μmol de H_2O_2 par minute à 25°C. L'activité enzymatique est déterminée selon la formule suivante :

$$\text{U / ml de l'activité Catalase} = (| A_{240}/\text{min}| \times V_t \times \text{FD}) / (V_e \times \dots) \dots \dots \dots (19)$$

A_{240/min} : La variation de l'absorbance par minute

V_t : Volume du mélange réactionnel en ml (=2.62)

V_e : Volume d'échantillon en ml (=0.02)

FD : Facteur de dilution (= 1)

: Coefficient d'extinction molaire de H₂O₂ en cm²/μmole (= 0.0436)

1.9.2. Superoxyde dismutase

- **Principe** : L'analyse de l'activité de superoxyde dismutase (SOD) dans le foie des juvéniles du tilapia est effectué selon la méthode de Marklund & Marklund (1974). Le principe est basé sur la capacité de l'enzyme à inhiber l'autoxydation du pyrogallol, à travers la dismutation des radicaux superoxydes (O₂⁻) libres. Le taux d'autoxydation du pyrogallol est déterminé à partir de l'augmentation de l'absorbance à 325 nm.

- Réactifs :

- Tampon Tris-EDTA (pH=8.2) : Dissolution de 1.21 g de Tris et 37.2 mg de sel disodique de l'EDTA dans 100 ml d'eau distillée. Le pH est ajusté à 8.2 par le HCl.
- Solution de pyrogallol à 20 mM dans le HCL 10 mM.

- Mode opératoire :

Dans une cuve en quartz, 2.9 ml de tampon Tris-EDTA incubé à 25°C ont été ajoutés à 50 μl de la solution pyrogallol et 50 μl de l'échantillon (solution A). Un contrôle a été préparé de la même manière, en remplaçant le volume d'échantillon par de l'eau distillée (solution B). L'absorbance de chaque solution a été mesurée à 325 nm pendant une minute en utilisant un spectrophotomètre en mode cinétique (annexe 04).

- L'expression des résultats :

Une unité de l'activité SOD correspond à la quantité d'enzyme nécessaire pour l'inhibition de 50% de l'autoxydation du pyrogallol à 25°C. L'activité enzymatique est calculée par la formule suivante (source : Creative Enzymes) :

$$\text{U/ml de l'activité SOD} = \frac{(A_{325\text{ B}} - A_{325\text{ A}}) / A_{325\text{ B}} \times 100\% \times V_t}{50\% \times V} \dots\dots\dots(20)$$

A_{325 B} : La variation de l'absorbance par minute de la solution B

A_{325 A} : La variation de l'absorbance par minute de la solution A

V_t : Volume du mélange réactionnel (3 ml)

V : Volume de l'échantillon (0.05 ml)

1.10. Dosage des protéines

- **Principe :** L'analyse des protéines dans le foie et le tube digestif des juvéniles du tilapia est effectué selon la méthode de Lowry (Lowry et al., 1951). En milieu alcalin, le réactif cuivrique catalyse l'oxydation des acides aminés aromatiques, avec réduction de l'acide phosphomolybdique et tungstique (réactif Folin-Ciocalteu) pour donner lieu à la formation d'un complexe coloré bleu foncé, qui a une absorbance maximale à 660 nm.

- Réactifs :

- Solution analytique :

(a) 50 ml de sodium carbonate à 2 % avec 50 ml de NaOH 0.1 N.

(b) 10 ml de sulfate de cuivre à 1.56 % avec 10 ml de sodium potassium tartarate à 2.37 %.

La solution analytique est préparée en mélangeant 2 ml de la solution (b) avec 100 ml de la solution (a).

- Réactif de Folin-Ciocalteu 1 N : Dilution de la solution commerciale du Folin-Ciocalteu (2 N) avec le même volume d'eau distillée

- L'albumine de sérum bovin (ASB) à 1 mg/ml

- Courbe d'étalonnage

A partir de la solution mer de ASB (1 mg/ml), on prépare 07 étalons à des concentrations comprises entre 0.05 et 1 mg/ml. Dans une série de tubes à essai, on ajoute 0.2 ml de chacune des dilutions et 2 ml de la solution analytique, puis on laisse incuber pendant 10 min à température ambiante. Dans chaque tube, on rajoute 0.2 ml du réactif de Folin-Ciocalteu et on laisse incuber pendant 30 min. Les absorbances à 660 nm sont déterminées à l'aide d'un spectrophotomètre.

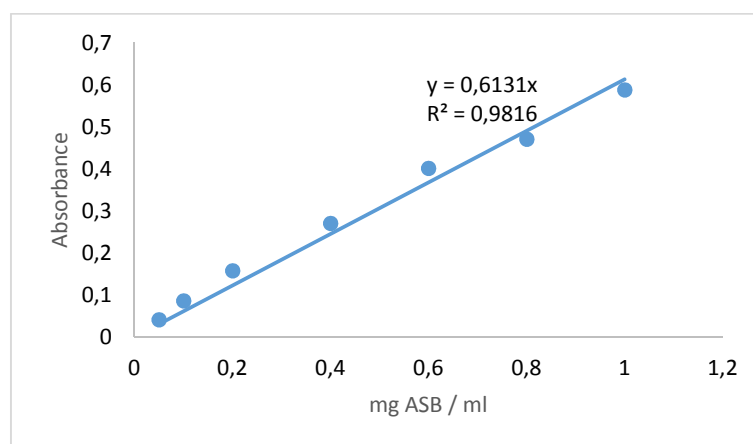


Figure 33. Courbe d'étalonnage des protéines

- Mode opératoire :

Dans une série de tubes à essai, on ajoute 0.2 ml des échantillons dilués et 2 ml de la solution analytique, puis on laisse incuber pendant 10 min à température ambiante. Ensuite, on ajoute 0.2 ml du réactif de Folin-Ciocalteu et on laisse incuber pendant 30 min, avant de mesurer les absorbances à 660 nm.

L'expression des résultats :

Les teneurs en protéines (mg/ml) sont déterminées à partir de la courbe d'étalonnage en tenant compte du facteur de dilution des échantillons.

Dans cette étude, l'activité des enzymes digestives et des antioxydants est exprimé en activité spécifique (U/mg de protéines), qui correspond au nombre d'unités enzymatiques rapporté au poids total de protéines (en mg) dans la solution enzymatique. Cela, permet de normaliser l'activité de l'enzyme en fonction de la quantité de protéine dans l'échantillon.

$$\text{L'activité spécifique (U/mg protéines)} = \text{L'activité enzymatique (U/ml)} / \text{la teneur en protéines (mg/ml)} \dots\dots\dots(21)$$

1.11. Analyses statistiques

Les analyses statistiques de ce chapitre portent sur la comparaison des résultats relatifs aux paramètres de la qualité de l'eau et les performances zootechniques et physiologiques des tilapias entre les régimes expérimentaux testés. Les résultats sont présentés sous forme de moyennes \pm déviations standards. La comparaison des moyennes deux à deux est effectuée en utilisant le test d'analyse des variances (ANOVA-1) suivi par un test Tukey de comparaison multiple, lorsque les différences sont significatives ($p < 0.05$). L'homogénéité des variances est vérifiée préalablement par le test de Bartlett, Hartley et Cochran. La normalité des variables est vérifiée par le test de Shapiro-Wilk. Le traitement des données statistique est effectué à l'aide du logiciel STATISTICA 8.0®. Les résultats du test de Tukey, utilisé pour comparer les moyennes deux à deux, sont représentés par des lettres en exposant dans les tableaux des résultats. Lorsque les valeurs dans la même ligne du tableau sont comparées, les lettres différentes indiquent des différences significatives entre ces moyennes, avec un seuil de probabilité = 0,05. Par exemple : Une moyenne X^a est différents significativement de Y^b, tandis que Z^{ab} n'est pas différent significativement de X^a ou de Y^b.

2. Résultats

2.1. Paramètres du milieu

L'eau des bacs BFT présentait une coloration marron (fig.34) qui est un indicateur du développement du floc. L'observation microscopique du floc montre des amas de matières organiques associés à une population diversifiée de micro-organismes (fig.35).



Figure 34. Echantillons d'eau prélevés des bacs BFT

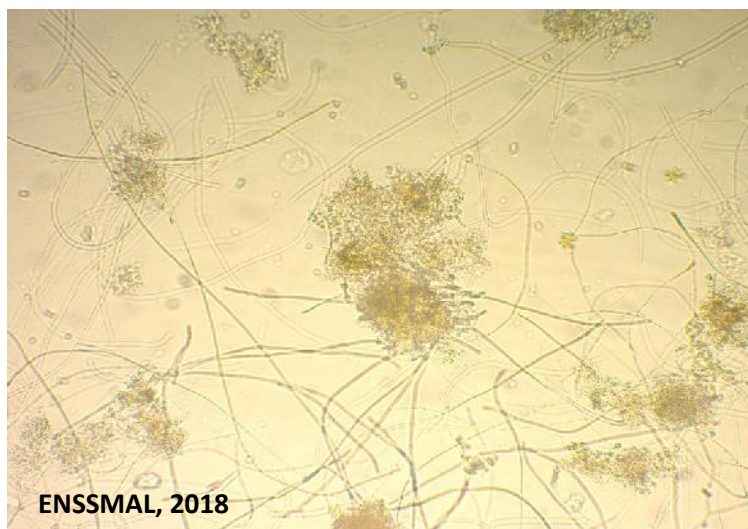


Figure 35. Biofloc sous-microscope

Les valeurs moyennes des paramètres physico-chimiques mesurées au cours de l'expérience sont présentées dans le tableau 11. Les températures de l'eau et les teneurs en oxygène dissous étaient maintenues à des niveaux relativement stables, autour de 24°C et 6 mg/L respectivement, dans les différents traitements, grâce à l'installation de thermostats et de diffuseurs d'air dans les bacs d'élevage. Les résultats indiquent que les valeurs moyennes du pH et de l'alcalinité de l'eau sont significativement plus élevées dans les bacs du groupe contrôle par rapport à ceux des groupes BFT ($p < 0.05$). Dans les bacs BFT, Les valeurs moyennes du pH et de l'alcalinité diminuent de manière significative à mesure que le ratio C/N dans le milieu diminue. La concentration moyenne du pH diminue de 7.85 dans le groupe BFT20 à 7.72 dans le groupe BFT14, tandis que l'alcalinité de l'eau diminue de 168.7 à 159.7 mg/L.

Les valeurs moyennes de l'ammonium et de nitrites diminuent à mesure que le ratio C/N augmente dans les bacs d'élevage, avec des concentrations plus élevées de manière significative dans le groupe BFT14 par rapport aux autres groupes ($p < 0.05$). Les concentrations moyennes d'ammonium augmentent de 0.11 mg/L dans le groupe contrôle à 0.25 mg/L dans le groupe BFT14, tandis que les teneurs en nitrites augmentent de 0.1 mg/L dans le groupe BFT20 à 0.29 mg/L dans le groupe BFT14. De plus, les concentrations moyennes de nitrates dans le milieu BFT diminuent significativement avec l'augmentation du ratio C/N (de 142 mg/L au ratio C/N de 14 à 44.7 mg/L au ratio de 20). Les niveaux les plus bas de nitrates sont observés dans les bacs du groupe C (7.19 mg/L).

Les teneurs moyennes des matières en suspension, mesurées seulement dans les bacs BFT, augmentent significativement avec l'augmentation du ratio C/N, avec des valeurs qui passent de 466 mg/L dans le groupe BFT14 à 750 mg/L dans le groupe BFT20. De manière similaire, une augmentation significative du volume du floc est observée, avec des valeurs moyennes passant de 42 ml/L dans le groupe BFT14 à 59 ml/L dans le groupe BFT20.

Tableau 11. Valeurs moyennes \pm déviations standards des paramètres de la qualité de l'eau obtenues dans les bacs d'élevage pour les quatre traitements expérimentaux

	C	BFT 14	BFT 17	BFT 20	Valeur-<i>p</i>
T (°C)	24.15 \pm 0.19 ^a	24.19 \pm 0.10 ^a	24.12 \pm 0.02 ^a	23.97 \pm 0.20 ^a	0.36
DO (mg/L)	6.60 \pm 0.15 ^a	6.18 \pm 0.29 ^a	6,32 \pm 0.22 ^a	6.17 \pm 0.21 ^a	0.13
pH	8.04 \pm 0.005 ^a	7.72 \pm 0.01 ^b	7.82 \pm 0.01 ^c	7.85 \pm 0.01 ^d	0.000000
NH₄⁺ (mg/L)	0.11 \pm 0.02 ^a	0.25 \pm 0.03 ^b	0.18 \pm 0.01 ^c	0.14 \pm 0.01 ^{ac}	0.000066
NO₂⁻ (mg/L)	0.12 \pm 0.03 ^a	0.29 \pm 0.02 ^b	0.18 \pm 0.02 ^c	0.10 \pm 0.02 ^a	0.000016
NO₃⁻ (mg/L)	7.19 \pm 0.64 ^a	142 \pm 8.17 ^b	77 \pm 7.48 ^c	44.76 \pm 6.72 ^d	0.000000
ALC (mg/L)	177.5 \pm 2,76 ^a	159.7 \pm 1.682 ^b	165.33 \pm 2,214 ^c	168.77 \pm 1.762 ^d	0.000000
MES (mg/L)	-	465.9 \pm 27.4 ^a	619.8 \pm 21.9 ^b	750.5 \pm 30.2 ^c	0.000039
VF (ml/L)	-	42.58 \pm 0,5 ^a	52.22 \pm 2.02 ^b	59.44 \pm 1.84 ^c	0.000042

Les valeurs suivies par des lettres différentes dans la même ligne sont significativement différentes (test de Tukey, $p < 0,05$).

Le suivi de la variation des paramètres du milieu en fonction du temps (fig.36 et 37) montre que les concentrations d'ammonium et de nitrites sont plus stables dans les bacs du groupe BFT20 et du groupe contrôle, par rapport aux groupes BFT14 et BFT17 qui présentent des fluctuations plus importantes. Après 44 jours d'élevage, nous avons constaté une stabilité des concentrations de ces deux paramètres dans les quatre groupes expérimentaux à des valeurs inférieures à 0.2 mg/L pour l'ammonium et 0.3 mg/L pour les nitrites.

Dans le groupe contrôle, les teneurs en nitrates sont maintenues à des niveaux stables autour de 7 mg/L, tandis que dans les groupes BFT17 et BFT20, les concentrations en nitrates diminuent progressivement avec le temps pour atteindre des valeurs atteignant 40 et 20 mg/L respectivement. Dans le groupe BFT14 à faible ratio C/N, la concentration des NO_3^- augmentent en fonction du temps pour atteindre des valeurs supérieures à 180 mg/l.

L'alcalinité de l'eau dans le groupe contrôle a été maintenue à des niveaux stables, avec des valeurs comprises entre 170 et 180 mg/L. En revanche, dans les groupes BFT, on observe une diminution régulière de l'alcalinité au fil du temps, avec les valeurs les plus basses observées dans le groupe BFT14. Au début de l'expérience, l'alcalinité de l'eau était d'environ 180 mg/L, puis elle a diminué pour atteindre des valeurs de 148 mg/L, 154 mg/L et 158 mg/L respectivement dans les groupes BFT14, BFT17 et BFT20.

Au cours du temps, il s'est produit une accumulation excessive de matières en suspension (MES) dans le milieu BFT, atteignant des concentrations de 1450 mg/L et 1120 mg/L dans les groupes BFT20 et BFT17 respectivement à la fin de l'expérience. En revanche, dans le groupe BFT14, les niveaux de MES reste à des valeurs inférieures à 670 mg/L au cours de cette expérience. De manière similaire le volume du floc augmente régulièrement dans le système BFT, atteignant des valeurs supérieures à 110 ml/L à la fin de l'expérience dans le groupe BFT20.

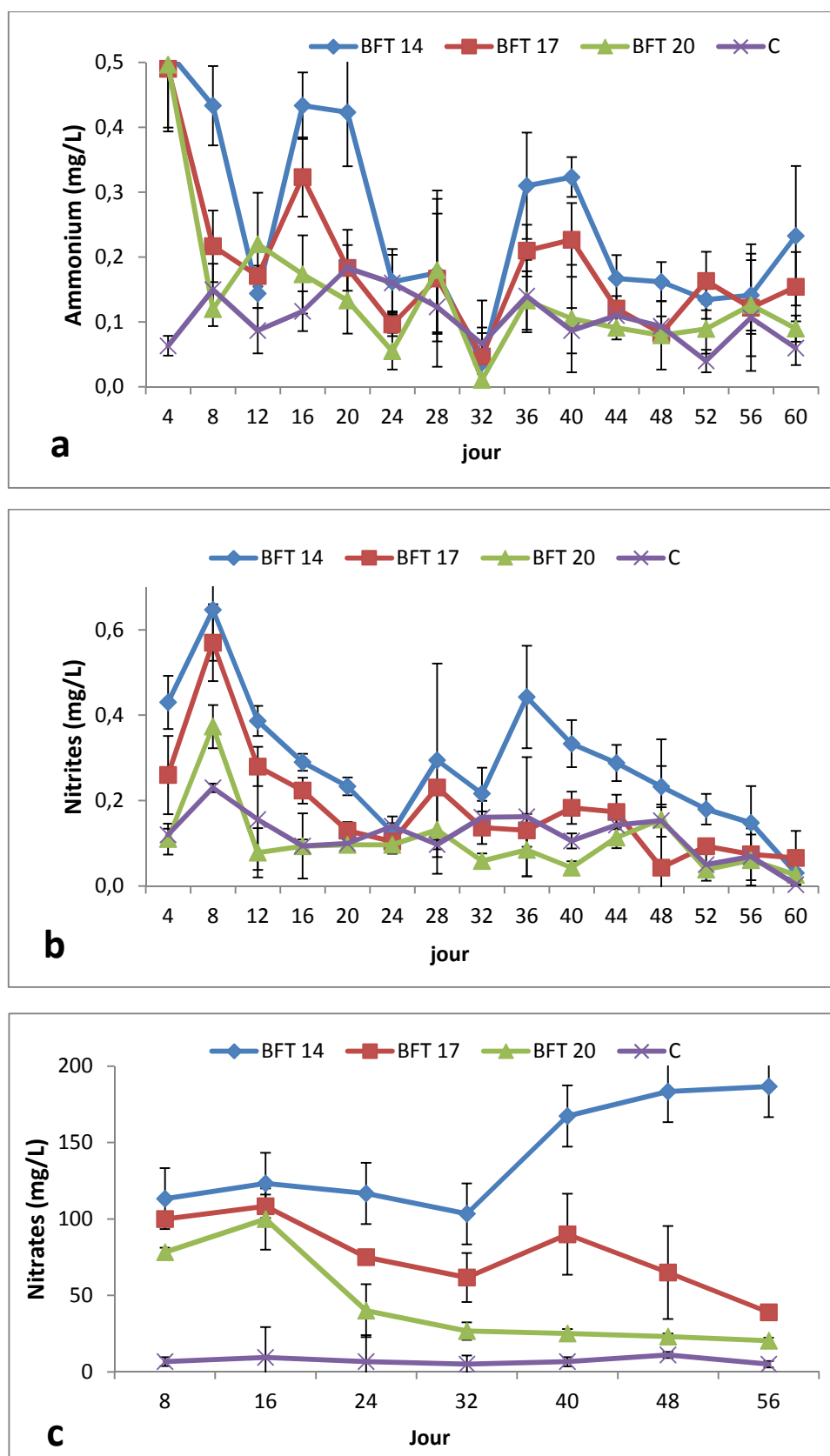


Figure 36. Évolution des concentrations moyennes \pm déviations standards des substances azotées dans les 03 groupes BFT à différents ratios C/N et dans le groupe contrôle au cours de l'expérience : (a) NH_4^+ , (b) NO_2^- , (c) NO_3^-

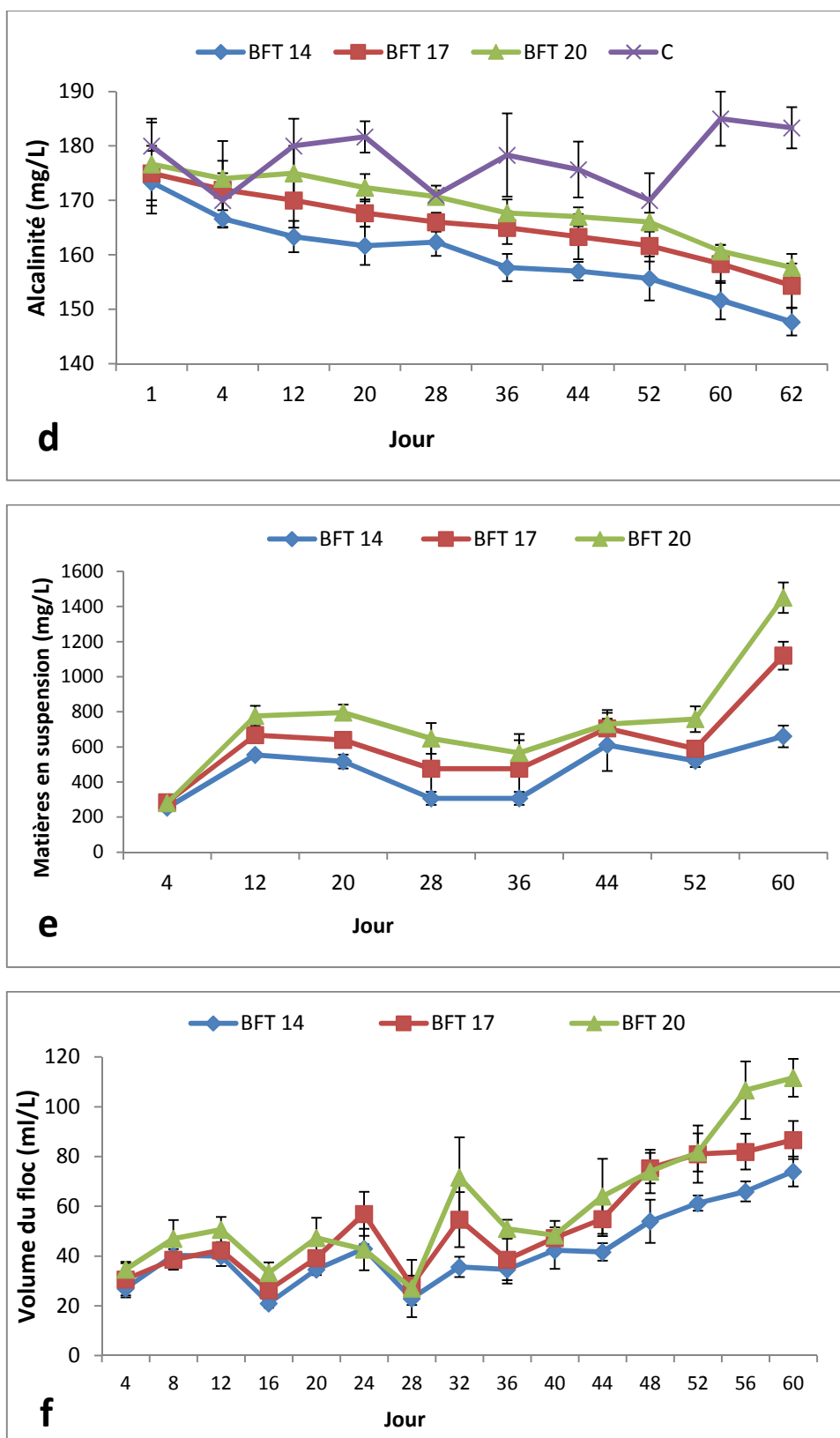


Figure 37. Évolution des concentrations moyennes \pm déviations standards des paramètres du milieu dans les 03 groupes BFT à différents ratio C/N et dans le groupe contrôle durant la période de l'expérience : **(d)** ALC **(e)** MES, **(f)** VF

2.2. Paramètres zootechniques

Les résultats relatifs aux performances zootechniques du tilapia élevés dans les différentes conditions expérimentales étudiées sont résumés dans les tableaux 12 et 13.

Tableau 12. Valeurs moyennes \pm déviations standards des paramètres zootechniques des juvéniles du tilapia après 30 jours d'élevage dans les quatre groupe expérimentaux

	C	BFT14	BFT17	BFT20	Valeur- <i>p</i>
PM_i (g)	24.26 \pm 0.08 ^a	24.29 \pm 0.13 ^a	24.27 \pm 0.16 ^a	24.15 \pm 0.09 ^a	0.51
PM_f (g)	43.2 \pm 1.2 ^a	42.5 \pm 0.9 ^a	41.2 \pm 0.3 ^a	41.3 \pm 1.5 ^a	0.17
GMQ (g/j)	0.63 \pm 0.04 ^a	0.61 \pm 0.02 ^a	0.58 \pm 0.01 ^a	0.57 \pm 0.05 ^a	0.18
TCS (%/j)	1.93 \pm 0.08 ^a	1.86 \pm 0.05 ^a	1.79 \pm 0.01 ^a	1.79 \pm 0.13 ^a	0.2
TCR (%)	78.2 \pm 4.4 ^a	74.9 \pm 2.8 ^a	71.1 \pm 0.5 ^a	71 \pm 6.9 ^a	0.18
FSD (kg/m³)	4.3 \pm 0.1 ^a	4.2 \pm 0.1 ^a	4.1 \pm 0.1 ^a	4.1 \pm 0.2 ^a	0.16
IC	0.93 \pm 0.05 ^a	0.92 \pm 0.05 ^a	0.98 \pm 0.04 ^a	0.97 \pm 0.08 ^a	0.56
Taux de survie (%)	100 \pm 0 ^a	100 \pm 0 ^a	100 \pm 0 ^a	100 \pm 0 ^a	-

Les valeurs suivies lettres différentes dans la même ligne sont significativement différentes ($p < 0,05$).

Durant cette étude, aucun cas de mortalité n'a été enregistré dans les bacs d'élevage (taux de survie = 100%), ce qui reflète les bonnes conditions de déroulement des expériences. Après 30 jours d'élevage, les poissons ont pratiquement doublés leurs poids moyen, dépassant les 40 g dans tous les bacs d'élevage. Le groupe contrôle a enregistré le poids moyen final le plus élevé (43,2 \pm 1,2 g). L'analyse statistique à l'aide du test ANOVA-1 des paramètres de croissance et de conversion alimentaire n'a révélé aucune différence significative entre les différents traitements au cours la première phase de cette expérience (J30).

A la fin de cette expérience (J 62), la comparaison des paramètres zootechniques n'a montré aucune différence significative entre les groupes C, BFT14 et BFT17 en ce qui concerne le poids moyen final, le gain de poids moyen quotidien, le taux de croissance spécifique et relatif, la densité finale de stockage et l'indice de conversion alimentaire.

Le taux de croissance des juvéniles était significativement plus élevés dans le groupe contrôle (1.85% par jour) par rapport au groupe BFT20 (1.52% par jour). La densité finale des poissons était significativement plus élevée dans les bacs des groupes C et BFT14 par rapport au groupe BFT20.

Tableau 13. Valeurs moyennes \pm déviations standards des paramètres zootechniques des juvéniles de tilapia après 62 jours d'élevage dans les quatre groupe expérimentaux

	C	BFT14	BFT17	BFT20	Valeur- <i>p</i>
PM_i (g)	43.2 \pm 1.2 ^a	42.5 \pm 0.9 ^a	41.2 \pm 0.3 ^a	41.3 \pm 1.5 ^a	0.17
PM_f (g)	76.28 \pm 3.37 ^a	72.13 \pm 2.11 ^{ab}	67.78 \pm 5.56 ^{ab}	62.15 \pm 4.12 ^b	0.013
GMQ (g/j)	0.84 \pm 0.05 ^a	0.77 \pm 0.04 ^{ab}	0.70 \pm 0.09 ^{ab}	0.61 \pm 0.07 ^b	0.015
TCS (%/j)	1.85 \pm 0.07 ^a	1.75 \pm 0.05 ^{ab}	1.65 \pm 0.14 ^{ab}	1.52 \pm 0.12 ^b	0.022
TCR (%)	214.5 \pm 14 ^a	196.9 \pm 9.7 ^{ab}	179.3 \pm 24 ^{ab}	157.4 \pm 18 ^b	0.018
FSD (kg/m³)	7.6 \pm 0.3 ^a	7.1 \pm 0.1 ^a	6.8 \pm 0.6 ^{ab}	6.1 \pm 0.3 ^b	0.005
IC	1.00 \pm 0.07 ^a	1.02 \pm 0.04 ^a	1.05 \pm 0.08 ^a	1.11 \pm 0.12 ^a	0.4
Taux de survie (%)	100 \pm 0 ^a	100 \pm 0	100 \pm 0 ^a	100 \pm 0 ^a	-

Les valeurs suivies lettres différentes dans la même ligne sont significativement différentes ($p < 0,05$).

2.3. Activité des enzymes digestives

Les résultats de l'analyse de l'activité des enzymes digestives dans le foie et le tube digestif des juvéniles de tilapia ne révèlent aucune différence significative entre les quatre groupes expérimentaux. L'activité des enzymes digestives chez les poissons élevés dans le système biofloc était similaire à celles des poissons élevés dans le groupe contrôle, qui représente le groupe de référence ($p > 0,05$).

L'activité des protéases variait de 50.4 \pm 8.9 à 56 \pm 11.7 U / mg protéines dans le tube digestif, tandis que dans le foie, elle variait de 0.39 \pm 0.16 à 0.49 \pm 0.52 (fig.38). L'activité de l'alpha-amylase était comprise entre 4.1 \pm 0.5 et 4.8 \pm 0.5 U/mg protéines dans le tube digestif, et entre 3.5 \pm 0.3 à 4.5 \pm 1.3 dans le foie (fig.39).

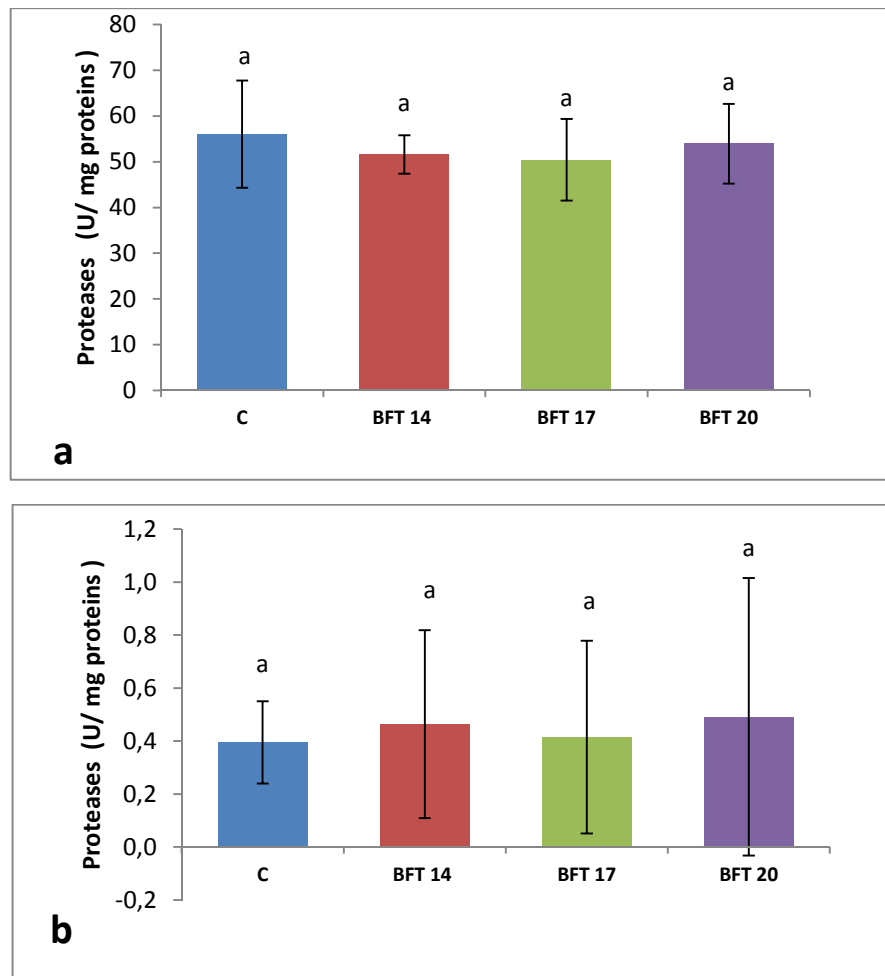


Figure 38. Activité spécifique des protéases (moyennes \pm déviations standards) dans le tube digestif (a) et le foie (b) des juvéniles de tilapia élevés dans les 04 groupes expérimentaux. Les lettres similaires au-dessus des histogrammes indiquent l'absence de différences significatives ($p > 0.05$)

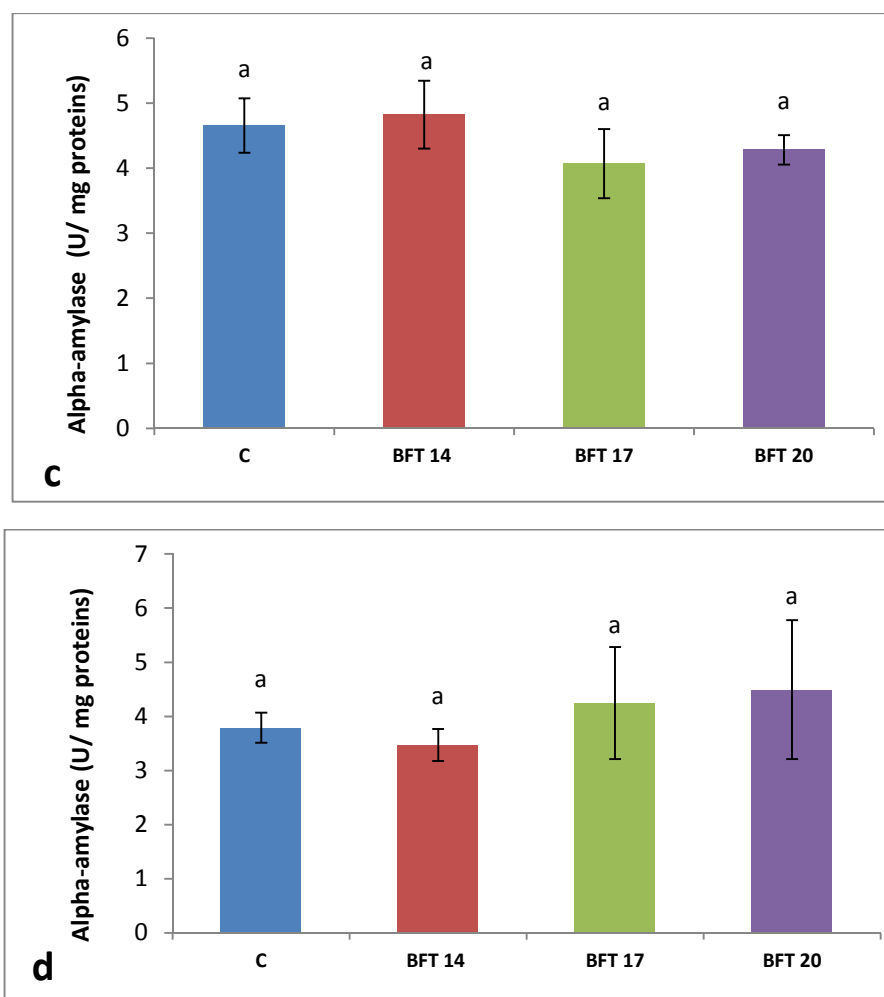


Figure 39. Activité spécifique de l'alpha-amylase (moyennes \pm déviations standards) dans le tube digestif (c) et le foie (d) des juvéniles de tilapia élevés dans les 04 groupes expérimentaux. Les lettres similaires au-dessus des histogrammes indiquent l'absence de différences significatives ($p > 0.05$)

2.4. Activité des enzymes antioxydants

L'étude de l'activité enzymatique des antioxydants n'a pas montré d'effets significatifs des milieux d'élevage testés sur l'activité de la catalase et du SOD chez les juvéniles du tilapia. L'activité des antioxydants chez les poissons élevés dans le système biofloc était similaire à celles des poissons élevés dans le groupe contrôle de référence ($p > 0.05$), ce qui indique l'absence d'influence sur le stress oxydatif.

L'activité des antioxydants dans le foie du tilapia a variée entre 171.9 ± 19.5 et 197.7 ± 20.4 U / mg protéines pour la catalase et de 74.3 ± 3.2 à 78.6 ± 7 U / mg protéines pour la SOD (fig. 40).

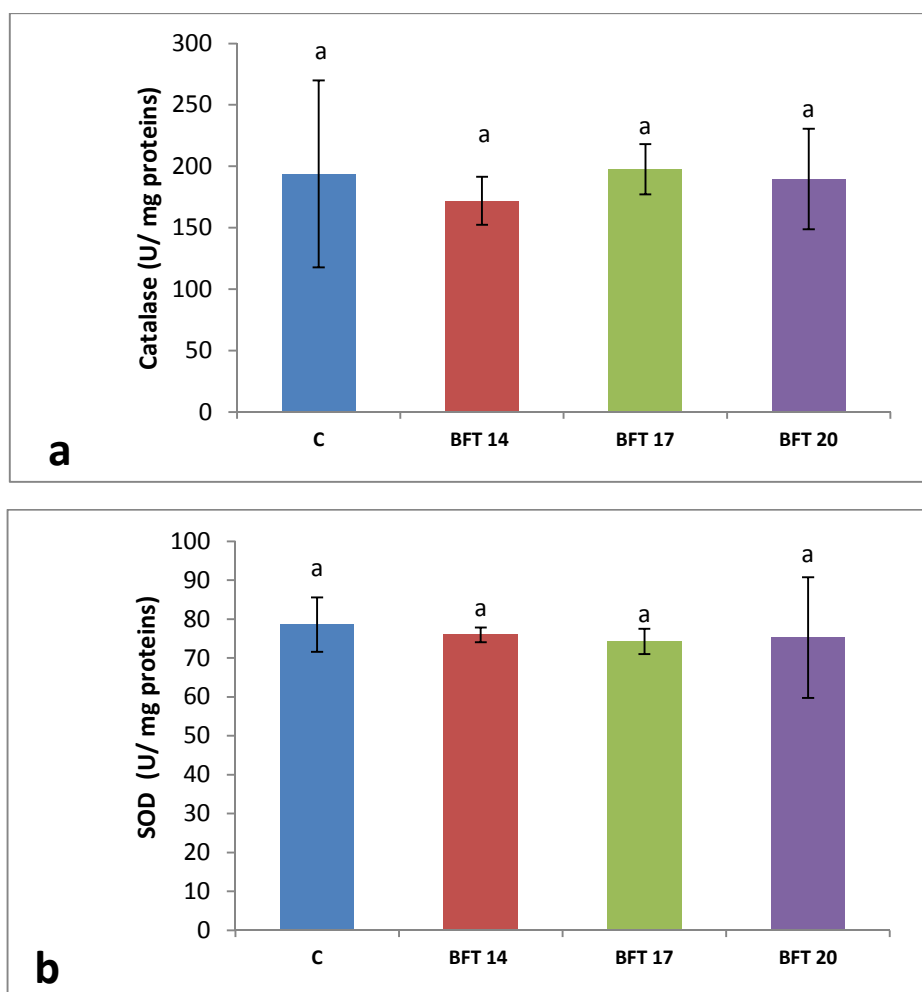


Figure 40. Activité spécifique (moyennes \pm déviations standards) de la catalase (**a**) et de la superoxyde dismutase (**b**) dans le foie des juvéniles de tilapia issus des 04 groupes expérimentaux. Les lettres similaires au-dessus des histogrammes indiquent l'absence de différences significatives ($p>0.05$)

3. Discussions

3.1. Paramètres du milieu

Dans cette étude, les valeurs de température et d'oxygène dissous étaient similaires entre les différents groupes expérimentaux ($p>0.05$) et se situaient dans la limite acceptable pour le bon développement du tilapia, telles que rapportées par DeLong et al. (2009), à savoir des températures de 25-32 °C et une teneur en oxygène dissous supérieures à 5 mg/L, et cela grâce à l'installation des thermostats et des diffuseurs d'air dans tous les bacs d'élevage.

La diminution du pH et de l'alcalinité observée dans les groupes BFT par rapport au groupe contrôle est due à l'utilisation de carbone inorganique par les bactéries autotrophes et hétérotrophes. Dans les systèmes d'élevage intensifs en circuits fermés, le processus de nitrification entraîne la baisse de l'alcalinité ce qui provoque une diminution du pH dans le

milieu (Van Rijn et al., 2006). Les valeurs significativement plus faibles de l'alcalinité dans le groupe BFT14 (159.7 mg/L) par rapport aux groupes BFT17 et BFT 20 (165.3 et 168.7 mg/L respectivement) sont dues à la contribution plus élevée des bactéries nitrifiantes dans le processus d'élimination de l'azote ammoniacal dans ce groupe. Selon Ebeling et al. (2006), pour chaque gramme d'ammonium converti en nitrate, 7,05 g d'alcalinité sont consommés par les bactéries nitrifiantes, tandis que la conversion de 1 g d'ammonium par les bactéries hétérotrophes consomme 3,57 g d'alcalinité.

La gestion efficace du cycle de production dans les systèmes biofloc nécessite le contrôle des paramètres de qualité de l'eau et la compréhension de leur dynamique et de leurs interactions (Emerenciano et al., 2017). La surveillance de la concentration des substances azotées est le principal objectif de la gestion des paramètres environnementaux dans les systèmes de productions aquacoles (Hargreaves, 2013). Les composés azotés présents dans le milieu d'élevage proviennent essentiellement du catabolisme des protéines alimentaires et des aliments non consommés (Person-Le Ruyet & Bœuf, 1998). Des niveaux élevés en ammonium et en nitrites peuvent entraîner une baisse des taux de survie, l'inhibition de la croissance, le stress et divers perturbations physiologiques chez les animaux aquatiques (Tomasso, 1994).

Dans le milieu biofloc, trois voies de conversion sont impliquées dans le processus d'élimination de l'azote ammoniacal : L'absorption par les algues photoautotrophes, la nitrification par les bactéries chimioautotrophes et l'assimilation par les bactéries hétérotrophes. La contribution de chacune de ces voies dans un système BFT est déterminée en fonction du rapport C/N appliqué (Ebeling et al., 2006; Hargreaves, 2006).

Au cours de cette expérience, la dynamique des substances azotées dans les traitements BFT a montré des différences dans le processus d'élimination de l'azote en fonction du rapport C/N utilisé. Dans le groupe BFT14, les niveaux élevés des nitrates (142 mg/L) indiquent que la nitrification est le principal processus utilisé, avec une dominance des bactéries autotrophes qui transforment l'azote ammoniacal en nitrites puis en nitrates. L'augmentation du ratio C/N dans les traitements BFT17 et BFT20 a favorisé le développement de bactéries hétérotrophes qui assimilent directement l'ammonium, ce qui explique les faibles concentrations de nitrates dans ces groupes. Généralement, la dominance de la voie hétérotrophe d'assimilation de l'azote dans le système BFT se caractérise par de faibles concentrations de nitrates (Ray & Lotz, 2014 ; Kamilya et al., 2017). Nos résultats sont en accord avec des travaux de recherche antérieures

montrant que l'augmentation du rapport C/N favorise la dominance des bactéries hétérotrophes dans les systèmes BFT (Xu et al., 2016 ; Silva et al., 2017^b; Liu et al., 2018).

Selon Xu et al. (2016), il est suggéré que le milieu biofloc nettement hétérotrophe est atteint lorsque les ratios C/N dépassent 18. Les bactéries hétérotrophes ont une vitesse spécifique maximale de croissance nettement plus élevée (05 jour^{-1}) que les bactéries nitrifiantes (1 jour^{-1}) (Ebeling et al., 2006; Hargreaves, 2006), ce qui pourrait expliquer la stabilisation plus rapide des niveaux d'ammonium observée dans le groupe BFT20 par rapport aux groupes BFT17 et BFT14.

Dans l'ensemble, les concentrations moyennes de substances azotées (NH_4^+ , NO_2^- et NO_3^-) dans tous les groupes expérimentaux restent dans la plage acceptable pour la croissance du tilapia. Selon la littérature, les niveaux acceptables d'azote ammoniacal total en élevage de tilapia sont inférieurs à 1 mg/L (El-Sayed, 2006; Emerenciano et al., 2017), les niveaux acceptables de nitrites sont inférieurs à 2 mg/L (Webster & Lim, 2006), et les concentrations de nitrates devraient être maintenues en dessous de 300 mg/L (DeLong et al., 2009) ou 500 mg/L (Monsees et al., 2017).

Ces résultats indiquent que l'utilisation d'un ratio C/N de 14 est suffisante pour maintenir les concentrations des substances azotées à des niveaux acceptables dans l'élevage du tilapia. L'application des ratios C/N plus élevés nécessite l'ajout de quantités supplémentaires de mélasse, ce qui peut entraîner une augmentation des coûts de production.

Les MES et le volume du floc sont des bons indicateurs du développement du milieu biofloc. En l'élevage du tilapia, il est recommandé d'avoir des valeurs optimales de volume du floc (VF) comprises entre 5 et 50 ml/L, et des concentrations de MES inférieures à 500 mg/L (Avnimelech, 2011; Emerenciano et al., 2017). Au cours de cette expérience, une augmentation du ratio C/N dans les bacs d'élevage a été associée à une augmentation des niveaux de MES. Les MES se sont accumulés progressivement dans les bacs des groupes BFT, atteignant environ 600 mg/L dans le traitement BFT14 et dépassant 1000 mg/L dans les groupes BFT17 et BFT20, malgré l'utilisation d'un système de décantation pour éliminer l'excès de matières en suspension. Des valeurs similaires ont été indiquées en systèmes BFT par Xu et al. (2018) en élevage des crevettes (MES entre 300 et 1200 mg/L) et par Azim and Little (2008) en élevage du tilapia (MES au-dessus de 1000 mg/L), malgré l'utilisation d'un système de séparation du floc. L'augmentation rapide des MES observée avec l'augmentation du rapport C/N est directement liée à la croissance rapide de la biomasse microbienne, principalement due à la prolifération des

bactéries hétérotrophes. En effet, l'élimination de l'azote ammoniacal par les bactéries hétérotrophes produira 40 fois plus de biomasse bactérienne par rapport à l'élimination par les bactéries autotrophes (Ebeling et al., 2006; Xu et al., 2018). La gestion efficace des solides en suspension est un élément clé pour assurer la réussite du cycle de production dans les systèmes BFT. Les MES doivent être gérées comme un compromis entre la fonctionnalité du biofloc en tant que système de biofiltration, la demande en oxygène et la tolérance des espèces élevées (Hargreaves, 2013).

3.2. Performances zootechniques

Après une période d'élevage de deux mois, le taux de croissance des juvéniles de tilapia variait entre 1,52 % et 1,85 % par jour dans les différents traitements expérimentaux. Ces valeurs sont comparables aux taux de croissance rapportés par El-Sayed (2006) pour des tilapias élevés au même stade dans un système intensif, avec des taux de croissance compris entre 1,7 % et 1,8 % par jour.

A la fin de cette expérience, la densité de stockage dans les bacs a atteint 7.6 kg/m^3 , qui reste une densité acceptable pour l'élevage du tilapia en système BFT. Une étude réalisée par Manduca et al. (2020) a montré que l'augmentation de la densité de stockage des tilapias jusqu'à 13 kg/m^3 en système BFT n'a pas eu d'effet négatif sur les performances de croissance et de conversion alimentaire.

Les résultats de notre étude n'ont montré aucune amélioration significative ($p > 0.05$) des performances de croissance, de conversion alimentaire et de survie des juvéniles de tilapia élevés en système biofloc par rapport à ceux élevés en système ouvert de renouvellement d'eau. Ces résultats sont cohérents avec les études menées par Widanarni et al. (2012) et Pérez-Fuentes et al. (2016) sur l'élevage du tilapia. Cependant, d'autres études ont signalé une amélioration des performances de croissance et de l'efficacité alimentaire du tilapia dans le système BFT par rapport aux systèmes d'élevage traditionnels (Azim & Little, 2008; Luo et al., 2014; Long et al., 2015; Haraz et al., 2018; Liu et al., 2018; Hisano et al., 2019; Mirzakhani et al., 2019).

L'amélioration des performances de croissance et de l'efficacité alimentaire des poissons en système BFT est attribuée à l'amélioration de la qualité de l'eau et à l'utilisation de biofloc comme source de nourriture supplémentaire. Des études basées sur les techniques de marquage isotopiques par l'azote ont confirmé l'utilisation du biofloc comme source de nourriture par le tilapia (Avnimelech, 2007) et par les crevettes (Burford et al., 2004).

Dans notre étude, nous avons utilisé des granulés artificiels de haute qualité distribués à satiété trois fois par jour, ce qui a probablement réduit la contribution du biofloc dans l'alimentation des juvéniles de tilapia. Selon Correa et al. (2020), l'application de périodes de privation de nourriture allant jusqu'à 3 jours par semaine permet d'améliorer l'efficacité alimentaire du tilapia dans le système biofloc sans affecter les performances de croissance.

Dans le même contexte, des études récentes ont montré la possibilité de réduire la ration alimentaire de 15 à 20% sans affecter la croissance et l'état sanitaire du tilapia dans un système BFT (Cavalcante et al., 2017; Pérez-Fuentes et al., 2018; Sarsangi Aliabad et al., 2022). Il est probable que cette restriction alimentaire favorise l'utilisation du biofloc comme source complémentaire de nourriture pour les tilapias en système BFT.

La comparaison statistique des données de cette expérience n'a montré aucun effet significatif de l'augmentation du ratio C/N sur les performances de croissance du tilapia ($p > 0.05$). Cependant, une diminution significative du taux de croissance ($p < 0.05$) a été observée dans le traitement BFT20 (1.52% par jour) par rapport au groupe témoin (1.85% par jour). De plus, le taux de conversion alimentaire était plus élevé dans le groupe BFT20, indiquant une efficacité alimentaire plus faible dans ce groupe.

Ce ralentissement de la croissance des poissons dans le groupe BFT20 peut être attribué à l'accumulation élevée de matières en suspension dans les bacs d'élevage, atteignant des concentrations supérieures à 1000 mg/L à la fin de l'expérience. Des concentrations élevées de MES ont généralement un effet négatif sur la croissance et peuvent provoquer des obstructions des branchies chez les poissons et les crevettes (Azim & Little, 2008; Schweitzer et al., 2013). Des études antérieures ont montré que l'utilisation de ratios C/N supérieurs à 15 peut affecter négativement la croissance et la conversion alimentaire chez le tilapia (Liu et al., 2018; Pérez-Fuentes et al., 2016). Des résultats similaires ont été obtenus en élevage des crevettes, avec des meilleures performances zootechniques enregistrées dans les traitements BFT à faibles ratios C/N (Chakrapani et al., 2021; Xu et al., 2016, 2018). L'étude menée par Duy & Van Khanh (2018) sur le pavillon tacheté (*Scatophagus argus*) a montré que l'utilisation d'un ratio C/N de 15 entraînait une amélioration significative de la croissance, la survie et la conversion alimentaire par rapport à l'utilisation des ratios C/N de 10 et 20.

Selon Xu et al. (2016), il est suggéré que le biofloc de type mixte, dominé par les microalgues et les bactéries autotrophes, est plus bénéfique pour le développement des crevettes par rapport au milieu biofloc dominé par les bactéries hétérotrophes. D'autre part, Wang et al. (2015) ont

indiqué une amélioration des indices de croissance à des ratios C/N de 20 et 25 par rapport à un ratio C/N de 15 dans l'élevage de carassin doré (*Carassius auratus*). De même, Minabi et al. (2020) ont constaté qu'un rapport C/N de 19 semble offrir une meilleure croissance chez les juvéniles de carpe commune élevés en système BFT par rapport aux ratios C/N de 11, 15 et 23.

L'optimisation du meilleur rapport C/N pour le bon développement des poissons dans les systèmes BFT reste encore sujette à discussion. Cette étude a montré qu'il est possible de réduire le rapport C/N jusqu'à 14, sans avoir un effet négatif sur la qualité de l'eau et la croissance des juvéniles du tilapia.

3.3. Activité enzymatique

Les enzymes digestives jouent un rôle clé dans le processus d'assimilation des nutriments, leurs activités étant un indicateur de la capacité de digestion et d'absorption, et elles ont un impact direct sur la croissance des poissons (Jiang et al., 2015).

L'analyse de l'activité enzymatique dans le système digestif des tilapias montre que l'activité des protéases est nettement plus élevée dans le tube digestif par rapport au foie. Ces résultats sont cohérents avec les travaux précédents menés sur le tilapia, qui indiquent une activité plus élevée des protéases dans l'intestin par rapport au foie (Chakrabarti et al., 1995; Klahan et al., 2009; Lin et al., 2010). L'activité de l'alpha amylase était comparable dans le tube digestif et le foie, indiquant une contribution plus importante du foie dans le processus de digestion des glucides par rapport aux protéines. Des études antérieures sur les tilapias ont également constaté une activité plus élevée de l'amylase dans la partie intestinale par rapport au foie (Chakrabarti et al., 1995; Lin et al., 2010). Par ailleurs, l'étude réalisée par Klahan et al. (2009), sur l'évolution de la localisation de l'activité enzymatique chez le tilapia a révélé une activité plus élevée de l'amylase dans le foie que dans l'intestin.

Plusieurs études antérieures ont investigué la contribution du biofloc dans la stimulation de l'activité des enzymes digestives chez les poissons (Liu et al., 2018; Luo et al., 2014; Sontakke et al., 2021; Yu et al., 2020) et les crevettes (Anand et al., 2014; Cardona et al., 2016; Wang et al., 2016; Xu et al., 2013). De manière générale, une augmentation de l'activité des enzymes digestives est associée à une amélioration de la croissance et de la conversion alimentaire. Cette stimulation enzymatique peut être attribuée à la contribution des enzymes extracellulaires libérées par les microorganismes présents dans le floc, ainsi qu'aux enzymes endogènes stimulées par certains éléments bioactifs contenus dans le biofloc (Xu et al., 2013; Wang et al., 2016).

La comparaison des résultats de l'analyse des enzymes digestives entre les différents groupes expérimentaux, n'a montré aucun effet significatif ($p > 0.05$) du milieu biofloc sur l'activité des protéases et de l'alpha-amylase dans le tube digestif et le foie du tilapia. Ces résultats confortent les observations faites dans cette étude concernant les performances de croissance et de l'utilisation des aliments. Ces résultats sont probablement dus à la faible contribution du biofloc dans le régime alimentaire des tilapias pendant cette expérience.

Dans les traitements BFT, l'augmentation du ratio C/N de 14 à 20 n'a pas influencé significativement l'activité des enzymes digestives ($p > 0.05$). Ces résultats sont cohérents avec une étude précédente menée sur l'élevage de la crevette *Litopenaeus vannamei*, où il n'y avait pas de différence significative dans l'activité des protéases et de l'amylase entre les ratios C/N de 15 et 20. Par ailleurs, Liu et al. (2018) et Yu et al. (2020), ont constaté respectivement que la variation du ratio C/N influence l'activité des enzymes digestives chez le tilapia et le carassin doré. Selon Yu et al. (2020), le floc à différents ratios C/N consommé par les poissons pourrait interférer avec la structure de la flore microbienne intestinale, et produire ou inciter à produire des enzymes digestives.

Les enzymes antioxydants sont généralement utilisées comme indicateurs du stress oxydatif résultant de la présence des agents pathogènes ou des perturbations environnementales, et elles peuvent donc refléter l'état de santé des animaux aquatiques (Martins et al., 2019; Shourbela et al., 2021). Divers facteurs associés à des conditions défavorables dans les systèmes aquacoles tels que les paramètres de qualité de l'eau, les polluants chimiques, le régime alimentaire, la densité de peuplement et les pathologies peuvent induire un stress oxydatif chez les poissons (Birnie-Gauvin et al., 2017; Bakhshi et al., 2018; Cavalcanti Nery et al., 2019; Dawood et al., 2019; Chowdhury & Saikia, 2020). La catalase et la Superoxyde dismutase (SOD) sont parmi les principales enzymes impliquées dans le processus d'élimination des éléments réactifs de l'oxygène, qui sont des indicateurs du stress oxydatif chez les poissons (Kovacik, 2017). La SOD catalyse la réaction de dismutation des radicaux superoxydes en oxygène et en peroxyde d'hydrogène, qui est ensuite décomposé par la catalase en eau et en oxygène, empêchant ainsi le début de la peroxydation lipidique (Hoseinifar et al., 2021; Shourbela et al., 2021).

Les résultats de la présente étude n'ont montré aucune différence significatives dans l'activité de la catalase et de la superoxyde dismutase dans le foie entre les différents groupes expérimentaux. L'absence d'impact sur la capacité antioxydante peut indiquer que le milieu biofloc n'a pas altéré l'état de santé des juvéniles du tilapia. Des résultats similaires ont été

obtenus pour l'activité SOD chez les tilapias et les carpes élevés en système BFT (Long et al., 2015). Une étude réalisée par Bañuelos-Vargas et al. (2021) sur les tilapias a montré que la réponse de l'activité de la CAT et la SOD variait en fonction de la densité de stockage des poissons, avec un impact significatif du milieu BFT sur l'activité des antioxydants observé à une densité de 120 individus/m³, tandis qu'aucun effet n'a été observé à la densité de 240 individus/ m³. Cependant, d'autres études ont rapporté une stimulation de l'activité de la SOD et de la CAT chez les tilapias élevés en système BFT (Luo et al., 2014; Mansour & Esteban, 2017; Liu et al., 2018; Menaga et al., 2019; Zaki et al., 2020; Mohammadi et al., 2021; Shourbela et al., 2021). En revanche, Haridas et al. (2017) ont indiqué une diminution de l'activité de la CAT et de la SOD chez le tilapia en système BFT par rapport au groupe témoin. La réponse physiologique de l'activité des antioxydants dans le système BFT pourrait être dépendante de l'interaction de plusieurs facteurs tel que les paramètres du milieu, la densité d'élevage, le type de la source de carbone, entre autres.

Chapitre IV

Effets du système biofloc sur les performances de reproduction du tilapia et la qualité des progénitures

1. Matériel et méthodes

Cette partie du travail consiste à étudier les effets de l'élevage des géniteurs du tilapia dans un système biofloc sur leurs performances de reproduction. Notre hypothèse de départ est que l'environnement biofloc peut améliorer les résultats de reproduction en fournissant une source supplémentaire d'aliments riches en nutriments qui peuvent influencer la mobilisation énergétique pour le développement gonadique, avec des conséquences potentielles sur la qualité des progénitures. Cette étude se déroule en deux phases expérimentales :

- La première phase consiste à stocker les géniteurs du tilapia dans le système BFT pendant 72 jours, tout en suivant les paramètres du milieu et des performances de croissance.
- La deuxième phase consiste à reproduire les géniteurs du tilapia dans le système BFT et à comparer les résultats de reproduction, ainsi que la qualité des œufs et des larves, avec les géniteurs issus des systèmes conventionnels d'élevage.

1.1. Phase de stockage des géniteurs

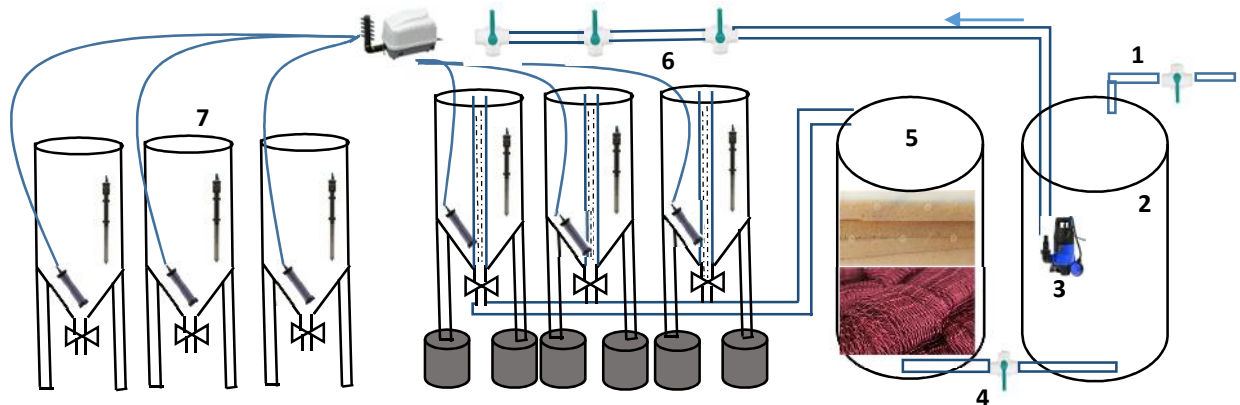
1.1.1. Dispositif expérimental et mise en charge

L'expérience s'est déroulée sur une période de 72 jours entre les mois de Mars et Mai 2018 dans la serre de la station expérimentale de pisciculture marine. Cette expérience avait deux objectifs :

- Le premier objectif était de préparer un stock de géniteurs élevés en système BFT et en eau claire pour comparer leurs performances de reproduction dans les 2 milieux.
- Le deuxième objectif était de compléter les expériences du chapitre précédent en comparant les performances de croissance du tilapia entre le milieu BFT et le système RAS en appliquant d'autres ratios C/N.

L'unité d'élevage comporte 09 bacs en PP de 350 L (fig.41). Six bacs fonctionnent en système biofloc, tandis que trois bacs fonctionnent en système de recirculation d'eau (RAS). Chaque bac est équipé d'un thermostat de 500 W afin de maintenir la température de l'eau autour de 26 °C, ainsi que de deux diffuseurs d'air pour assurer l'oxygénation et le maintien en suspension du floc. Dans le système RAS, l'eau d'élevage est évacuée gravitairement par le fond des bacs à travers les canalisations en PVC (50 mm), puis elle est collectée dans un bac de filtration de 1.7 m³. Dans le bac de filtration, l'eau traverse une couche de filtration mécanique composée d'éponges d'une épaisseur de 30 mm, puis à travers une couche de filtration biologique composée de filets de pêches. L'eau filtrée est évacuée par le fond vers un bassin de collecte de

1.7 m³. Le bac de collecte est doté d'une pompe immergée utilisée pour la recirculation d'eau vers les trois bacs d'élevage via une canalisation en PVC de 20 mm. Cette canalisation est équipée de vannes permettant de régler le débit d'eau pour chaque bac. Des tubes perforés en PVC (50 mm) sont placés au niveau de l'évacuation des bacs d'élevage afin d'empêcher le passage des poissons vers les filtres.



1 : arrivée d'eau neuve. 2 : bac de collecte. 3 : pompe de recirculation. 4 : vanne d'évacuation.
5 : bac de filtration. 6 : bacs du système RAS. 7 : bacs du système BFT.

Figure 41. Schéma de l'unité expérimentale du stockage des géniteurs

Les bacs du système BFT sont remplis à 30% avec l'eau riche en biofloc provenant de l'expérience précédente, ce qui permet d'accélérer le développement initial du floc. L'apport en eau neuve provient d'un bassin réservoir en béton de 16 m³, qui est alimenté à partir d'un puits. Les bacs d'élevage sont soumis à la photopériode naturelle (élevage en serre).

Au total, 117 individus de tilapia issus de l'expérience précédente sont répartis sur les 9 bacs d'élevage à une densité de 13 individus par bac. Trois groupes expérimentaux sont testés en triplicatas :

- Groupe BFT12 : Elevage en système biofloc avec un ratio C/N = 12
- Groupe BFT18 : Elevage en système biofloc avec un ratio C/N = 18
- Groupe C : Elevage en eau claire en système RAS

Pour chaque groupe expérimental, deux bacs contiennent des femelles et un bac contient des mâles de tilapia, dont les poids moyens sont indiqués dans le tableau 14. Une opération de sexage a été effectuée au sein des tilapias provenant de l'expérience précédente en examinant leurs orifices génitaux. La papille génitale du mâle est allongée en forme de cône (gonopode) avec un pore urogénital à l'extrémité, tandis que chez les femelles, elle est courte et présente en

son milieu une fente transversale (l'oviducte) avec un pore urinaire à l'extrémité (Seck et al., 2018).

Les poissons sont nourris à satiété apparente avec un aliment artificiel flottant de 03 mm (marque COPPENS). La fréquence de nourrissage est de 2 à 3 fois par jour, pendant 06 jours par semaine. Les quantités d'aliments distribués sont notées sur les fiches de suivi journalières. Dans les bacs du système BFT, du sucre blanc (42% C) est ajouté quotidiennement pour ajuster le ratio C/N selon les niveaux fixés pour chaque groupe expérimental. Le calcul des quantités de sucres nécessaires est réalisé selon la formule citée dans le chapitre précédent. Les bacs sont recouverts de filets, pour empêcher l'échappement des poissons.

Tableau 14. Mise en charge initiale des bacs d'élevage

	C	BFT12	BFT18
PM_i (g)	68.08 ± 14,41	69.33 ± 17,23	68.23 ± 15,59
Effectif / bac	13 ± 0	13 ± 0	13 ± 0
Charge (kg/m³)	2.5 ± 0.5	2.6 ± 0.6	2.5 ± 0.6

PM_i correspond au poids moyen initial des mâles et femelles pour chaque traitement

1.1.2. Suivi des paramètres du milieu

La température de l'eau et l'oxygène dissous sont mesurés quotidiennement avec un multi-paramètre portable (YSI modèle 85). Le pH de l'eau est mesuré quotidiennement avec un pH-mètre portable (HANNA). L'ammonium, les nitrites et l'alcalinité de l'eau sont dosés deux fois par semaine selon (Rodier et al., 2009). Les nitrates sont analysés une fois par semaine par des kits colorimétriques (MQuant 1100200001). Le volume de floc est mesuré deux fois par semaine dans les bacs BFT en utilisant deux Imhoff cônes. Ce sont les mêmes méthodologies décrites dans les chapitres précédents.

1.1.3. Paramètres zootechniques

A la fin de la période d'élevage (J72), les poissons sont collectés dans chaque bac. Le nombre et le poids des poissons sont enregistrés sur le cahier du suivi.

Le taux de survie (S%), le gain moyen quotidien du poids (GMQ), le taux de croissance relatif (TCR), Le taux de croissance spécifique (TCS) et l'indice de conversion alimentaire (IC) sont déterminés selon les formules cités dans le chapitre précédent (page 43).

1.1.4. Analyses statistiques

La comparaison des moyennes des paramètres du milieu et des performances zootechniques entre les trois régimes expérimentaux est effectuée en utilisant un test ANOVA-1, suivi par un test Tukey de comparaison multiple lorsque les différences sont significatives ($p < 0.05$). L'homogénéité des variances et la normalité des variables sont vérifiées préalablement par les tests de Bartlett, Hartley et Cochran et de Shapiro-Wilk respectivement.

La comparaison des indices zootechniques est effectuée en tenant en compte les bacs des femelles seulement ($n = 2$) et en tenant compte les sexes mélangés ($n = 3$). Le traitement des données statistique est effectué à l'aide du logiciel STATISTICA 8.0®.

1.2. Reproduction et élevage larvaire

1.2.1. Dispositif expérimental

Une unité de reproduction des tilapias (fig.42) a été aménagée à l'intérieure de la serre de la station expérimentale de pisciculture marine. L'unité comporte 05 bacs de ponte en plastique d'un volume utile de 800 L (1 x 1 x 0.8 m). Deux bacs fonctionnent en système RAS et deux bacs fonctionnent en système BFT. Les bacs du groupe RAS sont équipés d'un système de filtration comprenant un bac en plastique de 800 L rempli de matériaux de filtration mécanique (couches d'éponges) et des substrats de filtration biologique (filets de pêche). Quatre bacs supplémentaires sont utilisés pour le stockage des géniteurs en sexes séparés : 1 bac de 800 L fonctionnant en système BFT et 3 bacs de 350 L fonctionnant en système RAS.



Figure 42. Unité de reproduction du tilapia

Chaque bac de ponte est équipé de 04 diffuseurs et de deux thermostats réglés à 28°C. La photopériode naturelle est appliquée durant cette expérience (élevage sous serre).

Les bacs du système BFT sont remplis à 30% avec l'eau riche en floc issue des bacs de l'expérience précédente. Le ratio C/N est maintenu à 15 par l'addition quotidienne de sucre blanc comme source de carbone. Les quantités du sucre nécessaires sont calculées selon la formule modifiée de Duy and Van Khanh (2018), citée dans le chapitre II.

A la fin de la période de stockage des géniteurs, une opération de tri des géniteurs a été effectuée. Les femelles présentant des signes de maturation avancée (ventre gonflé et papille génital rougeâtre) ont été sélectionnées et transférées dans les bacs de ponte. Chaque bac de ponte contient six femelles et deux mâles (sexe ratio de 3 :1). Les femelles qui ne sont pas utilisés pour la reproduction sont maintenues dans les bacs de stockage.

Les géniteurs sont nourris à satiété avec un aliment commercial de 06 mm de diamètre contenant 30% de protéines. Ils sont nourris deux fois par jour, pendant six jours par semaine.

Les paramètres du milieu dans les bacs de ponte sont régulièrement surveillés tout au long de la période de reproduction. La température, l'oxygène dissous et le pH de l'eau sont mesurés quotidiennement à l'aide d'un multi-paramètre portable (marque ORCHIDIS). L'ammonium, les nitrites, l'alcalinité et les nitrates sont dosés une fois par semaine. Le volume de floc est mesuré deux fois par semaine dans les bacs BFT.

1.2.2. Collecte des œufs et comptage

La phase de reproduction s'est déroulée sur une période de deux mois (entre le 14/05/2018 et le 17/07/2018). Chaque semaine, les femelles sont pêchées à l'aide de filet adapté aux dimensions des bacs, puis inspectés individuellement pour vérifier la présence de pontes.

Les œufs collectés dans la cavité buccale des femelles sont placés dans des boîtes en plastiques identifiées, contenant de l'eau propre à une température similaire à celle des bacs de ponte (fig.43). Les femelles qui ont effectué la ponte sont pesées, puis remplacés par de nouvelles femelles sélectionnées dans les bacs de stockage de géniteurs. Les boîtes à fond quadrillé contenant les œufs sont placées sur des feuilles blanches et photographiées par caméra (fig.44). La méthodologie de comptage des œufs repose sur une approche manuelle basée sur l'observation des photos prises pour chaque ponte sous ordinateur. Les images sont

attentivement examinées, et les œufs sont comptés un par un à l'aide d'un compteur manuel et en utilisant les outils de traitement des images pour faciliter le comptage.

Les œufs sont désinfectés dans un bain de formol à 2 ‰ pendant 15 minutes afin d'éliminer les germes pathogènes et les champignons présents à la surface des œufs (Subasinghe & Sommerville, 1985).



Figure 43. Collecte et désinfection des œufs



Figure 44. Comptage des œufs du tilapia

1.2.3. Incubation et élevage larvaire

Deux systèmes ont été conçus pour réaliser l'incubation des œufs du tilapia :

- Incubation en circuit fermé

Nous avons aménagée une unité d'incubation à l'intérieure de la station expérimentale de pisciculture marine (fig. 45), comprenant 09 jarres d'incubation en plastique de formes cylindriques d'une capacité de 02 litres chacune. Les incubateurs sont alimentés en eau par un courant ascendant qui maintien les œufs en suspension. Après l'éclosion, les larves sont

entraînées par le courant d'eau vers les boîtes d'élevage larvaire de 1.5 litre. L'eau d'évacuation est recyclée par pompage, après avoir traversé 03 aquariums de décantation de 60 L chacun, placés au-dessous des incubateurs (1 aquarium pour 3 incubateurs). Les aquariums sont dotés de thermostats électriques de 300w, pour maintenir la température à 28°C. Un apport quotidien d'eau neuve est assuré à partir d'un bac de stockage de 3 m³ équipé de 04 thermostats de 500w. La photopériode est régulée à 16H de lumière grâce à des néons dotés d'interrupteur de minuterie.

Après mise en incubation des premières pontes dans l'unité d'incubation en circuit fermé, nous avons constaté la prolifération de champignons de type *Saprolegnia*, ce qui a provoqué des mortalités massives au sein des œufs et des larves.

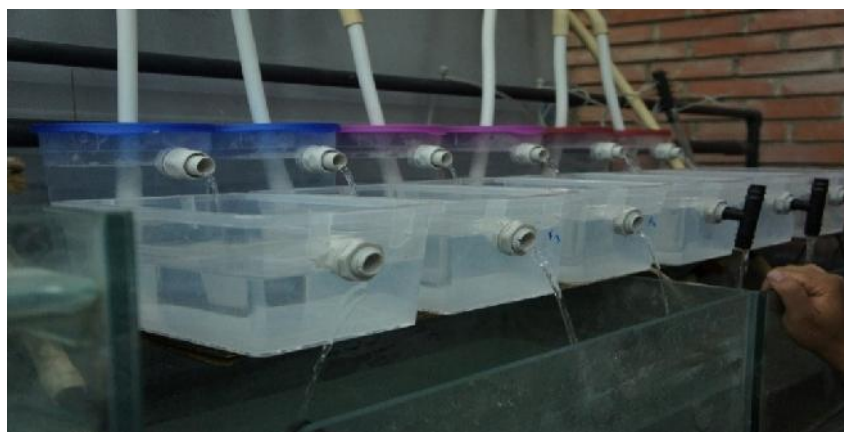


Figure 45. Unité d'incubation en circuit fermé

- Incubation en circuit ouvert

Suite à l'échec de la première technique utilisée, nous avons mis en place une nouvelle unité d'incubation en circuit ouvert au niveau de la serre (fig.46). Cette unité comporte une série de bouteilles d'incubation en plastique de forme cylindro-coniques (bouteilles d'eau minérale), alimentées en eau par un faible courant ascendant. L'eau est évacuée par le haut des bouteilles vers les boîtes d'élevage larvaire d'une capacité de 03 litres, équipées de filtre à maille de 500 µm pour empêcher la sortie des larves. L'apport en eau neuve est assuré par pompage à partir d'un bassin de stockage d'eau de 16 m³. Les conditions de température et de photopériode naturelles sont utilisées pour l'incubation et l'élevage larvaire, étant donné que l'expérience a été menée pendant la saison optimale de reproduction du tilapia. Des températures entre 28°C et 31°C ont été enregistrés dans cette unité d'élevage.

Du formol est injecté dans les bouteilles d'incubation, tous les 04 heures à une concentration de 2‰, durant toute la phase d'incubation, pour prévenir la propagation des champignons. Après éclosion complète, le nombre de larves dans les boîtes d'élevage larvaire est déterminé par un comptage manuel pour estimer le taux d'éclosion. Après 05 jours post-éclosion, les larves sont comptées manuellement afin de déterminer le taux de survie durant la phase lécithotrophique.

La mise en place d'unité d'incubation en circuit ouvert et l'injection régulière du formol dans le circuit d'eau a permis de réduire la prolifération des champignons et d'améliorer considérablement les taux de survie au sein des œufs et des larves.



Figure 46. Unité d'incubation en circuit ouvert

1.2.4. Echantillonnages et biométrie

A partir de chaque ponte, des échantillons de 15 œufs, 15 larves à l'éclosion et 15 larves à la fin de la phase lécithotrophique sont prélevés et fixés dans une solution de formol à 4% (de Oliveira et al., 2014) pour réaliser ultérieurement les mesures biométriques.

La biométrie des œufs et des larves (fig.47 et 48) est effectuée à l'aide du microscope équipé d'une caméra (CMEX-1 DC.1300c), en utilisant le logiciel ImageFocus 4. La calibration des mesures pour chaque grossissement est réalisée à l'aide d'une lame micrométrique graduée. La longueur totale des larves à J0 (jour de l'éclosion) et à J5 (5 jours post-éclosion) est mesurée en micromètres.

Pour les œufs, la plus grande longueur (axe1) et la plus petite longueur (axe2) sont mesurées pour déterminer le diamètre et le volume moyens des œufs selon les formules suivantes (Coward & Bromage, 1999) :

Diamètre moyen des œufs (mm) = (axe1 + axe2) / 2..... (22)

Volume moyen des œufs (mm³) = /6 × axe1 × axe2².....(23)

Les performances de reproduction sont évaluées selon les formules suivantes (Sarmiento et al., 2018) :

Fécondité relative (œuf / femelle) = N œufs par ponte / poids de la femelle (g).....(24)

Fécondité totale (œuf / g de femelle) = N œufs par ponte.....(25)

Taux d'éclosion (%) = N œufs éclos / nombre total des œufs x 100.....(26)

Taux de survie en phase lécithotrophique (%) = 100 N x larves à 05 j post-éclosion / N larves écloses.....(27)

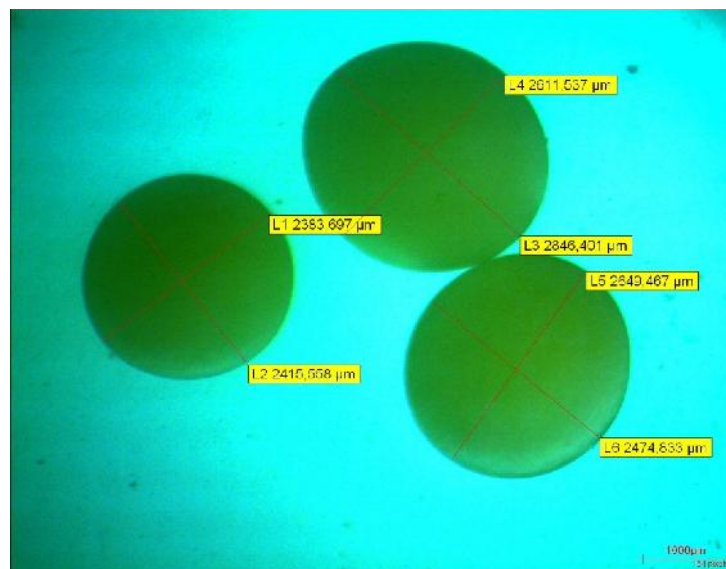


Figure 47. Biométrie des œufs du tilapia

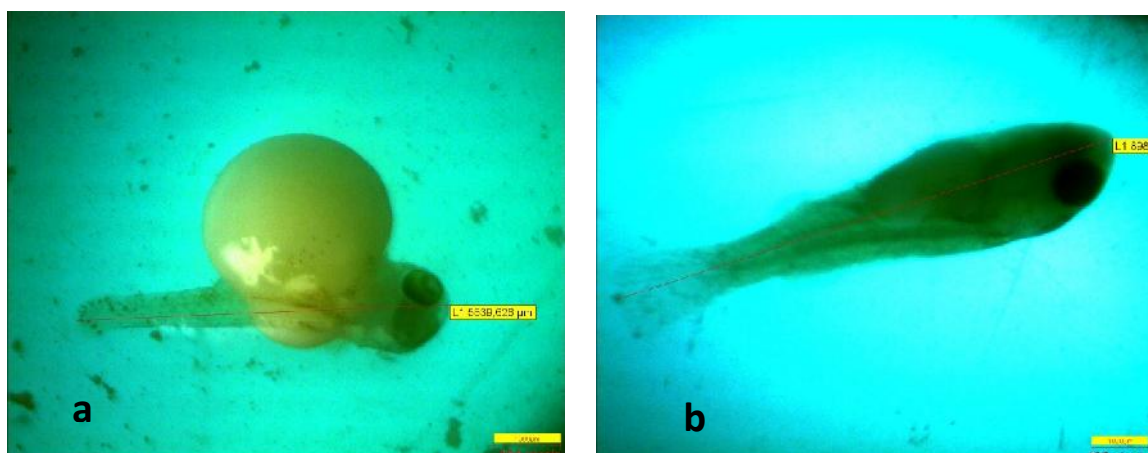


Figure 48. Biométrie des larves du tilapia à J0 (a) et à J5 (b) post-éclosion

1.2.5. Tests de résistance des larves

Pour évaluer la qualité des larves issues des géniteurs élevés en système BFT ou en système RAS, nous avons réalisé deux tests de résistance pour les larves âgées de 05 jours. Les tests sont réalisés en 06 répliques, avec des températures de l'eau autour de 26°C.

1.2.5.1. Test au choc osmotique (Ekasari et al., 2015)

A la fin de la phase lécithotrophique, 90 larves sont prélevées de chaque groupe expérimental (BFT et C) et placées dans 06 béchers (15 larves par bécher), préalablement remplis de 02 litres d'eau de mer à une salinité de 38 g/L. Après 60 minutes dans de l'eau de mer, les larves sont transférées dans des boîtes de 03 litres remplies d'eau douce. Les boîtes sont équipées de diffuseurs d'air pour maintenir l'oxygène dissous au-dessus de 06 mg/L, avec un renouvellement continu d'eau. La mortalité des larves est déterminée après 24 heures d'élevage en eau douce.

1.2.5.2. Test d'exposition à l'air

Les larves sont soumises à un test de résistance à l'exposition à l'air, réalisé selon la méthode décrite par Luz et al. (2012) et Sarmiento et al. (2018). Quatre-vingt-dix larves de chaque groupe expérimental sont réparties sur 06 boîtes en plastiques de 3 litres, équipées de diffuseurs d'air pour maintenir l'oxygène dissous au-dessus de 6 mg/L. Après 12 heures d'acclimatation, les larves sont collectées dans un tamis de 500 µm, puis placées sur un papier absorbant pour éliminer l'excès d'humidité (fig.49). Après exposition à l'air pendant 20 minutes, les larves sont remises dans les boîtes d'élevage. La résistance des larves est évaluée en déterminant leur taux de survies après 24 heures d'élevage.



Figure 49. Test d'exposition à l'air

1.2.6. Analyses statistiques

Les analyses statistiques (sur STATISTICA 8.0®) sont effectuées pour comparer les performances de reproduction et les paramètres relatifs à la qualité des progénitures. Les résultats sont présentés sous forme de moyennes \pm déviations standards. La comparaison des moyennes est effectuée en utilisant le test t de Student pour échantillons indépendants à un niveau de significativité de 0.05. L'homogénéité des variances et la normalité des variables sont vérifiées préalablement par les tests de Levene et de Shapiro-Wilk respectivement. Étant donné que les données relatives à la fécondité absolue et relative ne suivent pas une distribution normale, le test non paramétrique de Mann-Whitney est utilisé pour effectuer la comparaison des résultats entre les deux groupes, à un niveau de significativité de 0.05.

2. Résultats

2.1. Paramètres du milieu

Les valeurs moyennes des paramètres du milieu enregistrés pendant la période de stockage des géniteurs sont présentées dans le tableau 15.

Aucune différence significative n'a été observée entre les trois groupes expérimentaux en ce qui concerne la température, l'oxygène dissous et le pH de l'eau ($p < 0.05$). La température de l'eau était d'environ 26 °C dans tous les bacs, avec une teneur en oxygène dissous supérieure à 6 mg/L. Les concentrations d'ammonium et en nitrites étaient plus élevées dans les groupes BFT par rapport au groupe C, avec des différences statistiquement significatives observées pour les nitrites entre le groupe BFT12 et le groupe C. Les concentrations des nitrates étaient significativement différentes entre les 3 groupes, les valeurs les plus élevées étant enregistrées dans le groupe BFT12. L'alcalinité de l'eau était significativement plus élevée dans le groupe BFT18, par rapport aux groupes C et BFT12. Le volume du floc mesuré régulièrement dans les bacs BFT a été significativement plus élevé dans le groupe BFT18 par rapport au groupe BFT12.

Tableau 15. Valeurs moyennes \pm déviations standards des paramètres physico-chimiques dans les bacs de stockage des géniteurs

	C	BFT12	BFT18	Valeur-<i>p</i>
T °C	26.15 \pm 0.02 ^a	25.79 \pm 0.17 ^a	25.89 \pm 0.07 ^a	0.056
DO (mg/L)	6.70 \pm 0.18 ^a	6.85 \pm 0.31 ^a	6.41 \pm 0.14 ^a	0.12
pH	7.93 \pm 0.05 ^a	7.91 \pm 0.09 ^a	7.98 \pm 0.03 ^a	0.39
NH₄⁺ (mg/L)	0.10 \pm 0.02 ^a	0.53 \pm 0.25 ^a	0.33 \pm 0.21 ^a	0.022
NO₂⁻ (mg/L)	0.035 \pm 0.02 ^a	0.44 \pm 0.21 ^b	0.25 \pm 0.10 ^{ab}	0.028
NO₃⁻ (mg/L)	21.1 \pm 2,67 ^a	56.5 \pm 4.32 ^b	32.4 \pm 5.25 ^c	0.00013
Alcalinité (mg/L)	156.33 \pm 0.22 ^a	158.65 \pm 2.04 ^a	171.65 \pm 1.12 ^b	0.000018
VF (ml/L)	-	37.93 \pm 4.08 ^a	43.40 \pm 6.99 ^b	0.00064

Les valeurs suivies de lettres différentes dans la même ligne sont significativement différentes ($p < 0,05$).

Les figures 50 et 51 montrent l'évolution des paramètres du milieu en fonction du temps pendant la période de stockage des géniteurs. Les fluctuations des concentrations des substances azotées étaient plus prononcées dans les groupes BFT par rapport au groupe contrôle. L'ammonium augmente dans les bacs BFT durant les premières semaines d'élevage, atteignant des concentrations autour de 0.8 mg/L dans le groupe BFT12 et 0.6 mg/L dans le groupe BFT18. A partir de la 5^{ème} semaine, les concentrations se stabilisent à des valeurs inférieures à 0.4 mg/L dans le groupe BFT18.

Les teneurs en nitrites évoluent de manière similaire à celles de l'ammonium, atteignant des pics de concentrations entre 0.8 et 1 mg/L dans le groupe BFT12 et entre 0.4 et 0.6 mg/L dans le groupe BFT18. Dans le groupe contrôle, les teneurs en ammonium et en nitrites étaient plus stables à des valeurs inférieures à 0.2 mg/L.

Les nitrates s'accumulent dans le milieu d'élevage, atteignant des valeurs maximales supérieures à 80 mg/L dans le groupe BFT12 et environ 40 mg/L dans les groupes C et BFT18.

L'alcalinité de l'eau diminue progressivement en fonction du temps dans les bacs d'élevage, atteignant des valeurs inférieures à 140 mg/L dans les groupes BFT12 et C. La diminution de l'alcalinité est moins prononcée dans le groupe BFT18, avec des teneurs autour de 160 mg/L à la fin de l'expérience. Le volume du floc augmente régulièrement dans le milieu biofloc, atteignant des pics de concentration supérieurs à 60 ml/L. Cependant, l'utilisation du système de décantation a permis de réduire le volume du biofloc dans les bacs d'élevage en éliminant l'excès de matières en suspension.

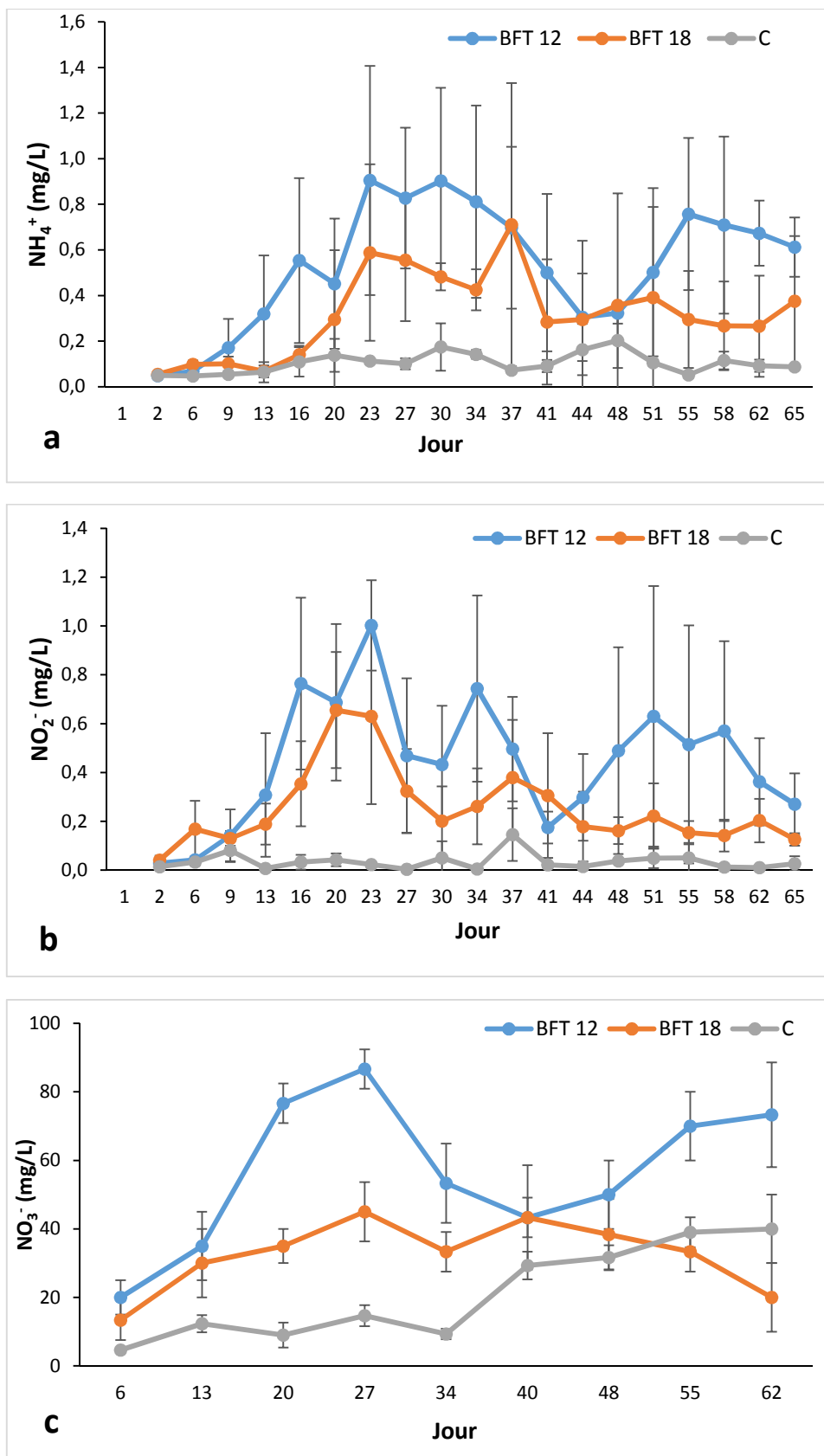


Figure 50. Évolution des concentrations moyennes ± déviations standards des substances azotées dans les bacs de stockage des géniteurs des groupes BFT et C : (a) NH₄⁺, (b) NO₂⁻, (c) NO₃⁻

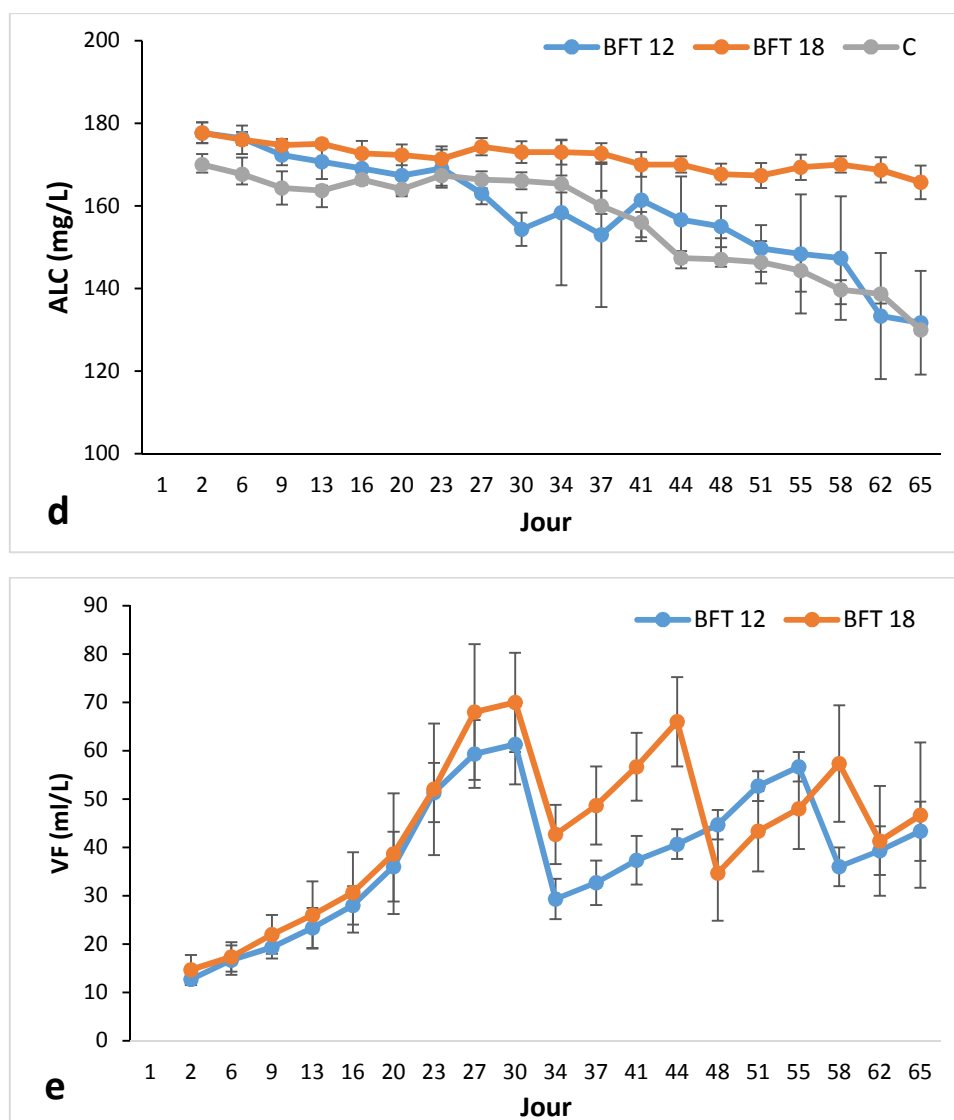


Figure 51. Évolution des concentrations moyennes \pm déviations standards de l'alcalinité (d) et du volume du floc (e) dans les bacs de stockage des géniteurs des groupes BFT et C

Les résultats de la surveillance des paramètres du milieu dans les bacs de ponte sont présentés de manière synthétique dans le tableau 15. La température de l'eau et la concentration en oxygène dissous étaient similaires entre les deux groupes BFT et C ($p > 0.05$), avec des valeurs moyennes d'environ 28 °C pour la température et environ 6.5 mg/L pour l'oxygène dissous. Les valeurs du pH et de l'alcalinité étaient plus faibles dans le groupe BFT par rapport au groupe C, bien que ces différences n'étaient pas significatives statistiquement. Les concentrations des produits azotés (ammonium, nitrites et nitrates) étaient significativement plus élevées dans les bacs BFT par rapport aux bacs du groupe C ($p < 0.05$).

Dans les bacs de reproduction du groupe BFT, une évolution progressive de la coloration de l'eau d'élevage a été observée, passant d'une coloration marron au début de l'expérience à une coloration verdâtre à la fin de l'expérience (fig.52). Cela indique la dominance du

phytoplancton, qui a été favorisée par le fort ensoleillement et les températures élevées pendant la période estivale.

Tableau 16. Valeurs moyennes \pm déviations standards des paramètres physico-chimiques dans les bacs de ponte

Paramètre	BFT	C	Valeur- <i>p</i>
Température (°C)	28.63 \pm 0.32	28.40 \pm 0.57	0.67
Oxygène dissous (mg/ L)	6.56 \pm 0.13	6.72 \pm 0.05	0.25
pH	7.98 \pm 0.11	8.22 \pm 0.02	0.08
Ammonium (mg/ L)	0.56 \pm 0.13*	0.10 \pm 0.01	0.036
Nitrites (mg/ L)	0.43 \pm 0.07*	0.06 \pm 0.02	0.016
Nitrates (mg/ L)	13.33 \pm 0.79*	7.08 \pm 0.43	0.01
Alcalinité (mg/ L)	153.42 \pm 0.71	157.72 \pm 6.29	0.43
Volume du floc (ml/ L)	16,15 \pm 3,32	-	-

* indique une différence significative entre les deux groupes (test t de Student, $p < 0.05$)

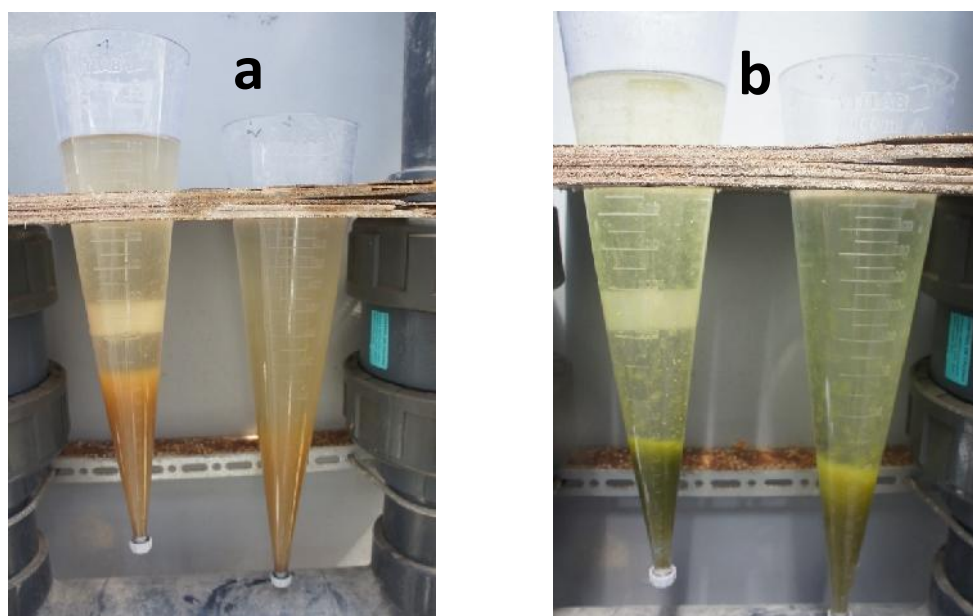


Figure 52. Floc issu des bacs de pontes au début de l'expérience (a) et à la fin de l'expérience (b)

2.2. Performances de croissance en phase de stockage

Les résultats de la comparaison des performances de croissance entre les 3 groupes expérimentaux en prenant en compte les bacs des mâles et femelles sont résumés dans le tableau 17. Bien que les paramètres de croissances étudiés étaient plus élevés dans les groupes BFT12 et C par rapport au groupe BFT18, l'analyse statistique n'a montré aucune différence

significative entre les trois groupes expérimentaux ($p > 0.05$). De même, aucune différence significative n'a été observée entre les trois groupes en ce qui concerne l'indice de conversion alimentaire. Au cours de cette expérience, aucun cas de mortalité n'a été observé dans les bacs des groupes C et BFT12. Dans le groupe BFT18, nous avons enregistré deux cas de mortalités qui sont dues au saut des poissons à l'extérieur des bacs d'élevage.

Tableau 17. Performances de croissance pendant la phase de stockage des géniteurs en tenant compte les bacs des mâles et des femelles (moyennes \pm déviations standards)

	C	BFT 12	BFT 18	Valeur-p
PM_i (g)	68.08 \pm 14.41	69.33 \pm 17.23	68.23 \pm 15.59	0.99
PM_f (g)	185.26 \pm 43.42	185.13 \pm 40.13	166.70 \pm 49.49	0.84
TCS (% / j)	1.39 \pm 0.04	1.37 \pm 0.08	1.23 \pm 0.09	0.066
GMQ (g / j)	1.63 \pm 0.40	1.61 \pm 0.32	1.37 \pm 0.47	0.69
TCR (%)	171.39 \pm 8.03	168.43 \pm 14,71	142.07 \pm 16.35	0.07
IC	1.19 \pm 0.02	1.13 \pm 0.07	1.24 \pm 0.10	0.27
Taux de survie (%)	100 \pm 0	100 \pm 0	94.87 \pm 4.44	-

Les valeurs suivies lettres différentes dans la même ligne sont significativement différentes ($p < 0,05$).

Le tableau 18 montre les résultats des paramètres zootechniques enregistrés pour les 3 traitements en tenant compte des bacs de femelles seulement (2 réplicas). L'analyse statistique montre que le poids moyen final et le gain moyen quotidien de poids étaient significativement supérieures dans les groupes BFT12 et C par rapport au groupe BFT18 ($p < 0.05$). Par ailleurs, aucune différence significative n'a été observée entre les 3 groupes pour le taux de croissance spécifique (TCS), le taux de croissance relatif (TCR) et l'indice de conversion (IC).

Tableau 18. Performances de croissance pendant la phase de stockage des géniteurs en tenant compte des bacs des femelles seulement (moyennes \pm déviations standards)

	C	BFT 12	BFT 18	Valeur-p
Pmi (g)	59,81 \pm 2,23	59,38 \pm 0,11	59,27 \pm 2,12	0.95
Pmf (g)	160,19 \pm 1,36 ^{ab}	162,31 \pm 9,79 ^a	138,13 \pm 0,29 ^b	0.069
TCS (% / j)	1,37 \pm 0,04	1,40 \pm 0,09	1,18 \pm 0,05	0.066
GMQ (g/j)	1,39 \pm 0,01 ^a	1,43 \pm 0,14 ^a	1,10 \pm 0,03 ^b	0.045
TCR (%)	167,99 \pm 7,72	173,33 \pm 16,99	133,19 \pm 7,85	0.07
IC	1,18 \pm 0,002	1,14 \pm 0,10	1,29 \pm 0,04	0.18
Taux de survie (%)	100 \pm 0	100 \pm 0	92,3 \pm 0	-

Les valeurs suivies lettres différentes dans la même ligne sont significativement différentes ($p < 0,05$).

2.3. Performances de reproduction

Le tableau 19 résume les résultats relatifs aux performances de reproduction des géniteurs élevés dans les deux milieux d'élevage (BFT et C). Le poids moyen des femelles ayant effectué des pontes était similaire entre les deux groupes. Les résultats ne montrent aucun effet significatif de l'élevage des géniteurs en milieu BFT sur la fécondité des femelles, la fréquence de ponte, le taux d'éclosion et la survie en phase larvaire ($p < 0.05$).

Tableau 19. Performances de reproduction chez les géniteurs du tilapia élevés en système BFT et en eau claire (moyennes \pm déviations standards).

	BFT	Contrôle	Valeur-<i>p</i>
Poids moyen des femelles (g)	168.8 \pm 38.6	157.8 \pm 32.5	0.35
Nombre de ponte /bac	9.5 \pm 3.54	9 \pm 1.41	0.86
Fécondité totale (œufs / femelle)	416.6 \pm 249.3	422.9 \pm 174.8	0.85
Fécondité relative (œufs/ g)	2.63 \pm 0.88	2.78 \pm 1.28	0.53
Taux d'éclosion (%)	77.4 \pm 15.4	71.1 \pm 19.2	0.44
Taux de survie en phase lécithotrophique (%)	70.7 \pm 16.1	68.4 \pm 15.3	0.76

* indique une différence significative entre les deux groupes ($p < 0.05$)

2.4. Biométrie des œufs

Les mesures effectuées sur les œufs de tilapia ont montré un diamètre moyen d'environ 2,5 mm, avec un volume moyen compris entre 7,73 et 7,95 mm³. Aucune différence significative en termes de taille des œufs n'a été observée entre les géniteurs provenant des deux systèmes d'élevage pendant la période de reproduction étudiée, comme l'illustre la Figure 53.

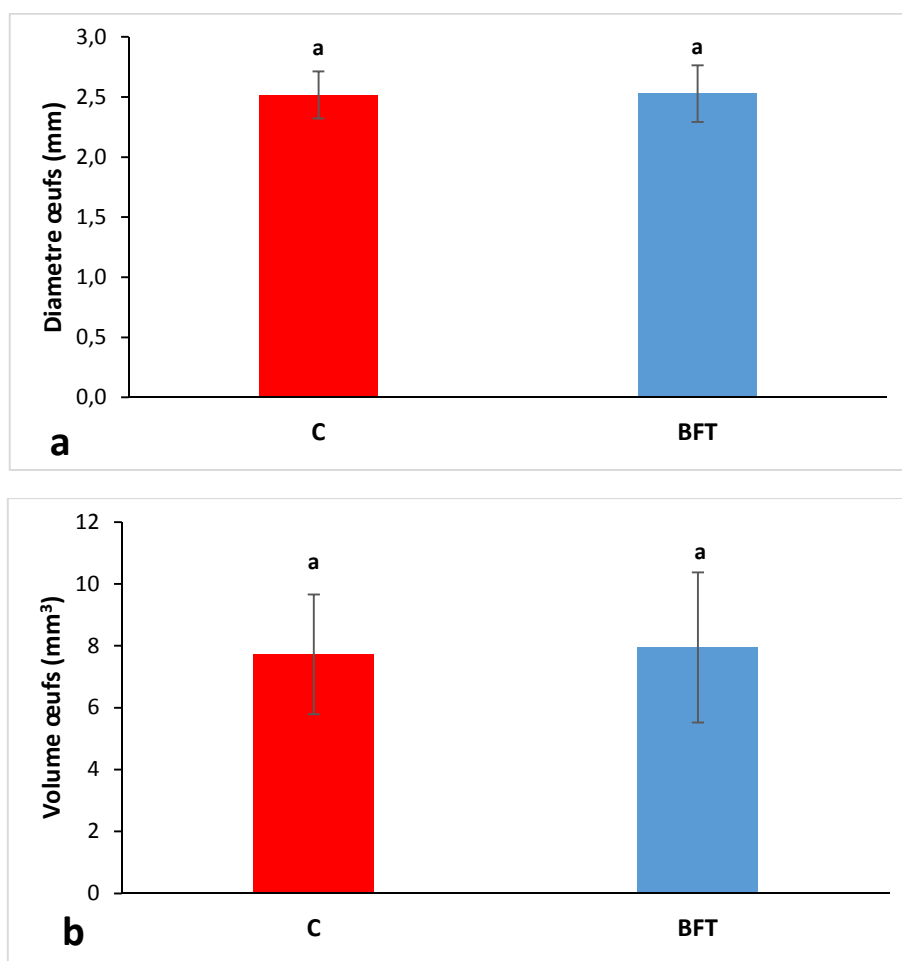


Figure 53. Biométrie des œufs du tilapia issues des géniteurs des groupes BFT et C (moyennes \pm déviations standards) : **(a)** diamètre en mm, **(b)** volume en mm³. Les lettres similaires au-dessus des histogrammes indiquent l'absence de différences significatives ($p > 0.05$).

2.5. Biométrie des larves

La biométrie des échantillons de larves au premier jour post-éclosion et à la fin de la phase lécithotrophique ne montre aucune différence significative de la taille des larves issues des deux groupes expérimentaux (Fig.54). La longueur moyenne des larves était entre 5.67 et 5.85 mm à l'éclosion et de 9.28 à 9.49 mm après 5 jours d'élevage.

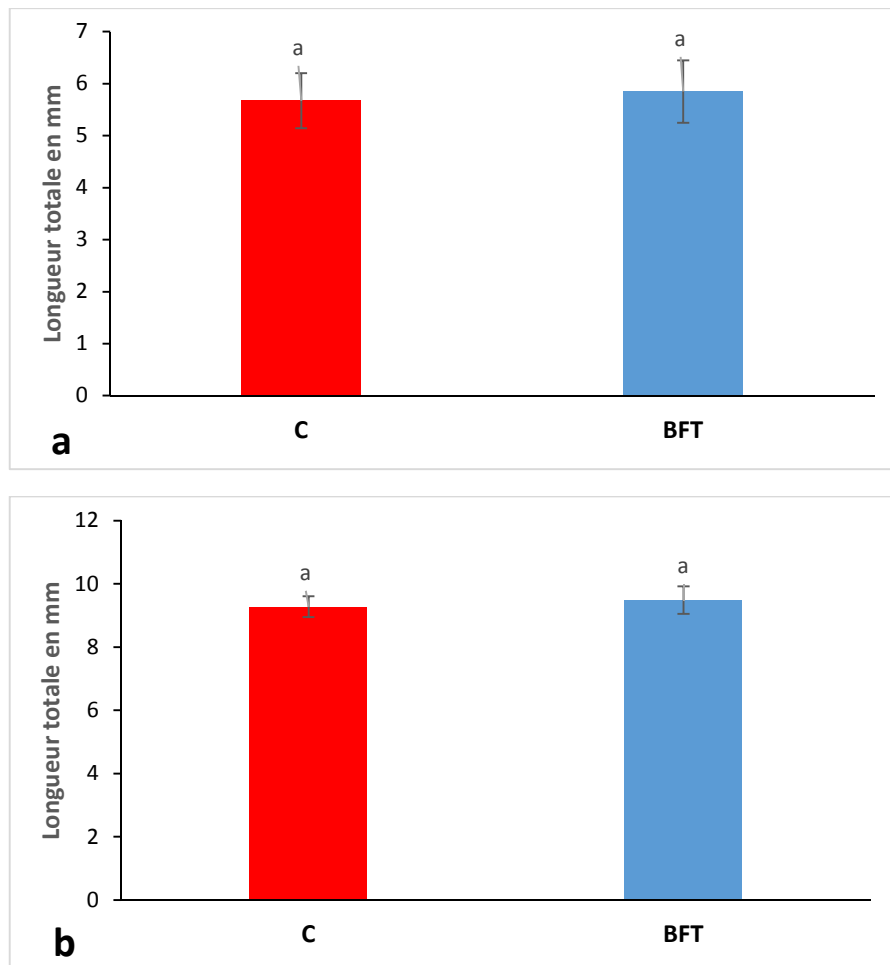


Figure 54. Longueurs moyennes \pm déviations standards des larves du tilapia issues des géniteurs des groupes BFT et C, à J0 (a) et à J5 (b) post-éclosion. Les lettres similaires au-dessus des histogrammes indiquent l'absence de différences significatives ($p > 0.05$)

2.6. Résistance des larves

Après application des tests de résistance au choc osmotique et à l'exposition à l'air pour les larves âgées de 05 jours, aucune différence significative ($p > 0.05$) n'a été observée en termes de taux de survie entre les larves issues des deux groupes expérimentaux, BFT et C (Fig. 55).

Les taux de survie des larves soumises à une salinité de 38 g/L pendant une heure se situaient entre 52.2% (groupe C) et 56.7% (groupe BFT), tandis que les taux de survie des larves exposées à l'air pendant 20 minutes se situaient entre 54.4% (groupe C) et 57.8% (groupe BFT).

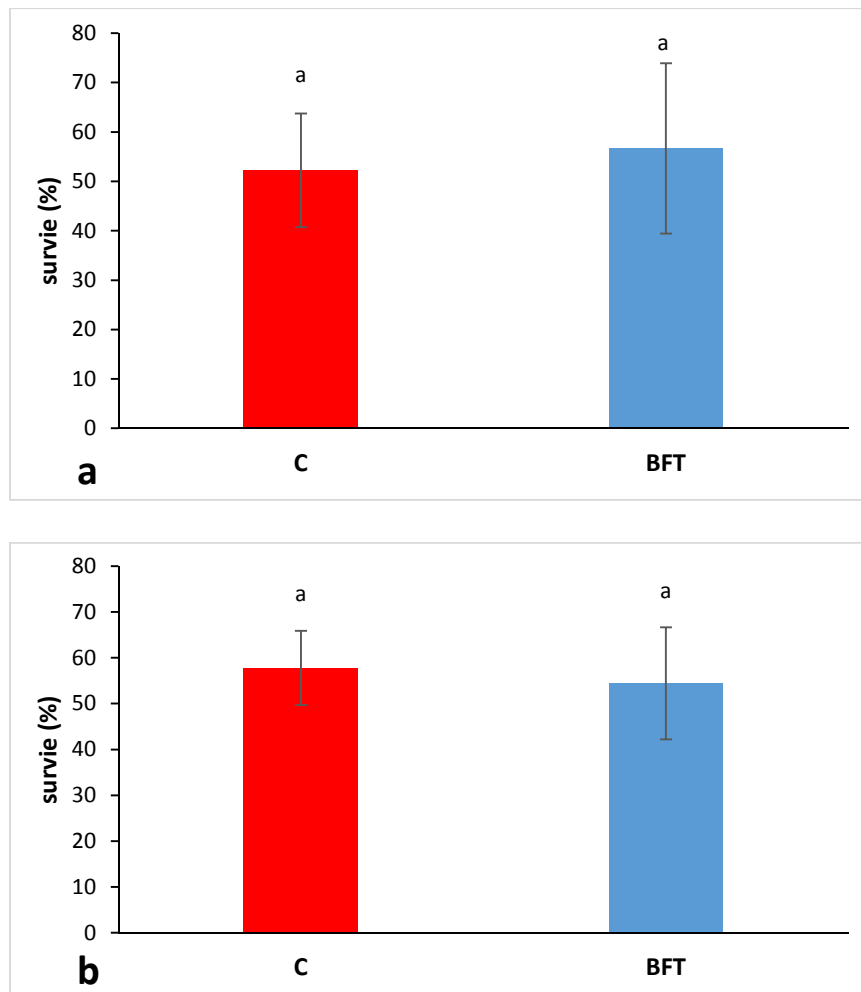


Figure 55. Taux de survie (moyennes \pm déviations standards) des larves du tilapia après le test de salinité (a) et d'exposition à l'air (b). Les lettres similaires au-dessus des histogrammes indiquent l'absence de différences significatives ($p > 0.05$)

3. Discussions

3.1. Paramètres du milieu

3.1.1. Bacs de stockage de géniteurs

Durant cette expérience, les températures de l'eau, l'oxygène dissous et le pH ont été maintenue dans la gamme acceptable pour le développement du tilapia qui se situe entre 25-32 °C pour la température, au-dessus de 5 mg/L pour l'oxygène dissous et entre 6 et 9 pour le pH (DeLong et al., 2009).

Les plus faibles concentrations de substances azotées ont été enregistrées dans les bacs du système C, ce qui indique l'efficacité du système de filtration mis en place. Ce système de filtration comprend un bac contenant des couches d'éponges synthétiques qui serviront à la filtration mécanique, ainsi qu'un substrat de filtration biologique composé de filets de pêche.

Le volume de filtration représente approximativement 50% du volume totale d'eau dans le circuit. Les faibles concentrations d'ammonium et de nitrites, ainsi que l'accumulation de nitrates sont des indicateurs du bon fonctionnement du processus de nitrification. Des valeurs comparables ont été enregistrées dans un système RAS conçu pour l'élevage des poissons marins, avec des concentrations maximales de 0.1 mg/l pour l'azote ammoniacal total, 0.1 mg/l pour les NO_2^- et 35 mg/l pour les NO_3^- (Alayse, 1981).

Les valeurs moyennes des concentrations d'ammonium et des nitrites étaient plus élevées dans le groupe BFT12 par rapport au groupe BFT18, tandis que les teneurs en nitrates étaient plus élevés dans le groupe BFT12. Cela indique la dominance du processus de nitrification par les bactéries autotrophes dans le groupe BFT12, caractérisé par la conversion de l'ammonium en nitrites puis en nitrates. L'assimilation de l'azote par les bactéries hétérotrophes devienne la voie dominante avec l'élévation du ratio C/N à 18. Ces observations sont cohérentes avec les résultats de Xu et al. (2016), qui ont également montré la dominance de la voie hétérotrophe en milieu BFT avec des ratios C/N supérieurs à 18.

Dans l'ensemble, les concentrations des produits azotés observées au cours de cette expérience restent dans la plage acceptable pour l'élevage du tilapia, avec des valeurs inférieures à 1 mg/L pour l'azote ammoniacal, inférieures à 2 mg/L pour les nitrites et à 300 mg/L pour les nitrates (El-Sayed, 2006; Webster & Lim, 2006; DeLong et al., 2009).

Le suivie de l'évolution des paramètres du milieu en fonction du temps montre que les concentrations des substances azotées étaient plus stables dans le groupe C par rapport aux groupes BFT qui présentaient des fluctuations plus importantes. Dans le groupe BFT12, des pics de concentrations plus marqués ont été enregistré, atteignant des valeurs de 0.9 mg/L pour l'ammonium et 1 mg/L pour les nitrites. Cela peut être attribué au rendement plus élevé des bactéries hétérotrophes dans la dégradation des déchets azotés par rapport aux bactéries autotrophes qui ont une vitesse de croissance plus lente (Ebeling et al., 2006).

Dans le groupe BFT18, une augmentation rapide du volume du floc dans le milieu d'élevage a été observée, atteignant des valeurs supérieures à 70 ml/L après 30 jours d'élevage. Ces niveaux dépassent les valeurs optimales recommandées en élevage de tilapia pour le volume de floc, qui sont comprises entre 20 et 50 ml/L selon Emerenciano et al. (2017).

Dans l'ensemble, les résultats de cette expérience indiquent que l'application d'un ratio C/N de 12 est suffisante pour maintenir les teneurs en produits azotés à des seuils acceptables en élevage du tilapia. Toutefois, il est essentiel de mettre en place un système de clarification de

l'eau efficace pour contrôler l'accumulation excessive de matières en suspension (MES), en particulier pour les ratios C/N élevés.

3.1.2. Bacs de ponte

La maîtrise des facteurs environnementaux représentent un élément clé pour la réussite des cycles de reproduction et de production d'alevins du tilapia (Bhujel, 2000). Les températures de l'eau, l'oxygène dissous, le pH et l'alcalinité ont été maintenues dans la plage optimale pour l'aquaculture du tilapia (El-Sayed, 2006).

La phase de reproduction s'est déroulée entre les mois de Mai et Juillet, avec une photopériode naturelle variant de 13H et 15H par jour. Les meilleures performances de reproduction sont généralement observées avec des photopériodes entre 12H et 14.5H (Biswas et al., 2005; El-Sayed, 2006). Dans cette étude, les teneurs en substances azotés dans les bacs de ponte étaient plus élevées dans les bacs du groupe BFT, avec des valeurs moyennes maintenues dans les limites acceptables pour la culture du tilapia (DeLong et al., 2009).

Le volume moyen de floc était d'environ 16 ml/L, ce qui se situe dans la plage acceptable pour l'élevage de juvéniles et d'adultes de tilapia, entre 20 et 50 ml/L (Emerenciano et al., 2017). Des résultats similaires ont été obtenus dans les bacs de reproduction du tilapia en système BFT, avec un volume de floc moyen de 24 ml/L, sans effet négatif sur les performances de reproduction (Alvarenga et al., 2017).

Durant la phase de reproduction, une évolution progressive de la couleur de l'eau a été observée dans les bacs BFT, passant du marron vers la coloration verdâtre, qui indique la prolifération du phytoplancton. Ce phénomène connu sous le nom du « green-water biofloc system » est lié à l'élevage dans les bassins extérieurs exposés à la lumière naturelle (Choo & Caipang, 2015). Selon Hargreaves (2013), le type du biofloc se transforme du « green-water » BFT à des faibles densités d'élevage vers le « brown-water » BFT dans les systèmes de production à haute densité de stockage. Dans notre étude, les faibles densités d'élevage dans les bacs de ponte, combinées aux températures élevées et à une forte exposition solaire pendant la période estivale (élevage sous serre), ont favorisé la transformation du milieu d'élevage vers le « green-water » BFT dominé par les communautés de phytoplancton.

3.2. Performances de croissance en phase de stockage des géniteurs

Cette expérience avait pour objectif de préparer des géniteurs du tilapia pour la phase de reproduction. Ces géniteurs ont été élevés dans deux systèmes de production : le système BFT

et le système RAS. Parallèlement, nous avons testé l'application de deux ratios C/N (12 et 18), pour compléter les résultats obtenus dans le chapitre précédent.

Les performances de croissance et d'efficacité alimentaire étaient similaires entre les poissons issus du groupe BFT12 et le groupe contrôle, ce qui est cohérent avec les résultats du chapitre précédent concernant la croissance des juvéniles du tilapia dans les deux systèmes d'élevage. Des études antérieures ont également montré l'absence d'effet significatif du système BFT sur la croissance des tilapias au même stade d'élevage (Widanarni et al., 2012; Pérez-Fuentes et al., 2016; Alvarenga et al., 2017). Ces résultats suggèrent que les besoins nutritionnelles des poissons ont été satisfaits dans les deux systèmes d'élevage, par la distribution d'aliment artificiel de bonne qualité, avec un mode nourrissage à satiété. Cela est supporté par les bons indices de conversion alimentaire obtenue durant cette expérience (IC autour de 1.2).

Dans les bacs BFT, nous avons constaté une diminution de la croissance des tilapias en augmentant le ratio C/N de 12 à 18. Cette différence était statistiquement significative en prenant en compte les bacs des femelles seulement. Des études antérieures ont également montré une diminution des performances de croissance du tilapia en appliquant des ratios C/N supérieures à 15 en système BFT (Pérez-Fuentes et al., 2016 ; Liu et al., 2018; Mirzakhani et al., 2019). En élevage de la crevette *Litopenaeus vannamei*, des meilleures performances en termes de taux de croissance spécifique et d'indice de conversion ont été obtenues avec des ratios C/N entre 9 et 12, par rapport aux ratios entre 15 et 18 (Xu et al., 2016, 2018). Ces auteurs suggèrent que le biofloc à faible ratio, C/N dominé par les micro-algues et les bactéries autotrophes est plus bénéfique pour les crevettes par rapport au biofloc dominé par les bactéries hétérotrophes. L'augmentation du ratio C/N peut engendrer l'accroissement rapide de la biomasse microbienne, avec une élévation des matières en suspension et de la demande biologique en oxygène, ce qui peut avoir des effets négatifs dans les bassins de production des crevettes et des poissons. Le contrôle de MES par l'installation de systèmes efficaces de clarification d'eau, permet d'améliorer la qualité de l'eau et les performances d'élevage en système BFT (Gaona et al., 2011). D'autres part, plusieurs auteurs ont observé l'amélioration de la croissance des poissons et des crevettes élevés en système BFT avec des ratios C/N autour de 20 (Minabi et al., 2020; Panigrahi et al., 2019; Wang et al., 2015). Plusieurs facteurs peuvent interagir pour influencer les performances d'élevage en système BFT tel que le type de la source de carbone, le ratio C/N, l'éclairage, la densité d'élevage (Jiang et al., 2020; Oliveira et al., 2022). L'optimisation du ratio C/N en milieu d'élevage nécessite la prise en considération de ces différents facteurs. Cette expérience montre la possibilité de réduire le ratio C/N jusqu'à 12

en élevage des tilapias, sans affecter négativement les performances de croissance et de conversion alimentaire.

3.3. Performance de reproduction et qualité des pontes

La facilité de reproduction naturelle en captivité, sans stimulation hormonale, présente un avantage pour le développement de l'aquaculture du tilapia. Cependant, les problèmes majeurs dans les éclosiers du tilapia consistent à la faible production d'œufs et le mode de ponte asynchrone (Bhujel, 2011). Le choix du meilleur système de production pourrait contribuer à l'amélioration des performances de reproduction (Bhujel, 2000). Afin d'évaluer la possibilité d'utiliser le système BFT dans les éclosiers de tilapia, cette étude se focalise sur l'influence du stockage dans le milieu biofloc sur la qualité des reproducteurs du tilapia, avec les conséquences potentielles sur les performances de reproduction et la qualité des pontes.

Dans cette étude, la fécondité relative des tilapias était autour de 2700 œufs/ kg pour des géniteurs ayant un poids moyen d'environ de 165 g. Dans l'ensemble, la fécondité des femelles du tilapia reste relativement faible par rapport aux valeurs mentionnés dans la littérature pour la même espèce : 4200 à 4700 œufs/kg (Alvarenga et al., 2017), 4700 à 7400 œufs/ kg (Gammanpila et al., 2007), 6000 à 7200 œufs/kg (Campos-Mendoza et al., 2004). Plusieurs facteurs peuvent influencer la production des œufs chez le tilapia tel que la densité de stockage des géniteurs, la photopériode, la qualité nutritionnelle, les paramètres du milieu, l'âge des géniteurs, etc. (Ridha & Cruz, 1999, 2000; Tsadik & Bart, 2007 ; Tsadik Getinet, 2008). Cette expérience a été réalisée dans les conditions optimales en matière de température, de photopériode et de qualité de l'alimentation pour la reproduction du tilapia. Les valeurs de fécondité relativement faibles sont probablement liées à la qualité génétique des reproducteurs utilisés. L'étude réalisée par Fessehaye et al. (2009) a montré que la fécondité des femelles du tilapia est significativement affectée par le niveau de consanguinité au sein des reproducteurs. Nous suggérons que les géniteurs issus de la station du développement de l'aquaculture saharienne d'Ouargla ont des niveaux élevés de consanguinité, vraisemblablement causés par les opérations répétées de reproduction au sein du même stock de poissons sans prendre en considération les risques de consanguinité.

Notre étude n'a montrée aucune différence significative en termes de fécondité et de fréquence de ponte entre les géniteurs élevés en système BFT et ceux élevés dans le système RAS. Des résultats similaires ont été rapportés par Alvarenga et al. (2017), qui ont comparé la fécondité, le taux de fertilisation, le rapport gonado-somatique, le pourcentage d'ovocytes, le nombre de

follicules post-ovulatoires et atrétiques, ainsi que le taux d'éclosion entre les géniteurs de tilapia élevés dans les deux systèmes. Ces auteurs avancé deux hypothèses : (1) le milieu BFT présente de faible influence sur la mobilisation énergétique pour la reproduction. (2) la période relativement courte de stockage des géniteurs en milieu BFT pendant un seul cycle de reproduction (1 mois) n'était pas suffisante pour mettre en évidence l'effet sur la reproduction. Pour notre cas, la période de l'étude était plus longue (plus de deux mois), sans mettre en évidence l'effet significatif du système BFT sur les performances de reproduction.

D'autre part, Ekasari et al. (2013) ont montré une amélioration de la fécondité des femelles du tilapia élevées en système BFT. Ils ont signalé la prédominance de cyanobactéries (connus pour leur toxicité) dans les bacs du groupe contrôle, ce qui aurait potentiellement influencé sur la croissance et les performances de reproduction des géniteurs. Dans notre étude, l'utilisation du système de recirculation avec un taux élevé de renouvellement de l'eau réduit la possibilité d'accumulation des algues bleues dans les bassins du groupe contrôle. Des études antérieures ont également mis en évidence des effets positifs du système BFT sur les performances de reproduction de différentes espèces de crevettes, telles que que *Litopenaeus stylirostris* (Cardona et al., 2016), *Farfantepenaeus duorarum* (Emerenciano et al., 2014), *Litopenaeus vannamei* (Magaña-Gallegos et al., 2021), et de poissons tels que *Clarias gariepinus* (Ekasari et al., 2016) et *Cyprinus carpio* (Manzoor et al., 2020). Cardona et al. (2016) ont suggéré que la consommation de biofloc par les géniteurs de crevettes constitue une source supplémentaire de lipides mobilisés comme source d'acides gras essentiels dans le processus du développement gonadique.

Des études antérieures ont démontré que les caractéristiques nutritionnelles des aliments destinés aux géniteurs du tilapia, tels que la quantité de protéines, la source de lipides, la supplémentation en vitamines et la teneur en énergie digestible, peuvent influencer leurs performances de reproduction et la qualité de leur progéniture (Gunasekera et al., 1996; El-Sayed et al., 2003, 2005; Gammanpila et al., 2007; Orlando et al., 2017; Sarmiento et al., 2018). Nos résultats, montrant des performances de reproduction similaires entre les deux traitements, peuvent suggérer que les besoins nutritionnels des géniteurs ont été adéquatement satisfaits dans les deux systèmes de production.

Les analyses biométriques effectuées sur les œufs et les larves ont montré des valeurs moyennes de diamètre des œufs des œufs d'environ 2,5 mm. Les longueurs totales des larves au premier jour post-éclosion étaient d'environ 5.7 mm et après 5 jours d'élevage larvaire, elles atteignaient

environ 9,3 mm. Des valeurs comparables ont été reportées pour la même espèce en ce qui concerne le diamètre des œufs, se situant entre 2,1 et 2,47 mm (Gunasekera et al., 1996; Campos-Mendoza et al., 2004; Biswas et al., 2005; Tsadik & Bart, 2007). Quant à la longueur totale des larves après l'éclosion, elle varie de 3 à 5 mm (Terpstra, 2015), et la longueur totale des larves après la résorption du sac vitellin se situe entre 9,37 et 9,61 mm (Gunasekera et al., 1996), et entre 7,7 et 8,6 mm (Sarmiento et al., 2018).

La mise en incubation des premières pontes dans des incubateurs alimentés en circuit fermé d'eau a provoqué des mortalités massives des œufs par la prolifération des champignons de type *Saprolegnia*. La prévalence élevée de l'infection par *Saprolegnia* constitue l'un des problèmes rencontrés durant la phase d'incubation des œufs de tilapia (Fitzsimmons & Watanabe, 2010). L'infection commence par les œufs morts et se propage ensuite à tous les œufs, entraînant des mortalités importantes. La recirculation de l'eau dans les incubateurs sans recours aux systèmes de filtration et de stérilisation a favorisée la propagation de *Saprolegnia* sur les œufs. Après installation d'un module d'incubation fonctionnant en circuit ouvert et l'utilisation du formol pour la désinfection des œufs, nous avons observé une amélioration des taux d'éclosion à des valeurs supérieures à 71%, avec des taux de survie des larves durant la phase de lécithotrophique d'environ 70%. Une désinfection efficace des œufs pourrait améliorer l'éclosion des œufs du tilapia à des taux supérieurs à 90% (Subasinghe & Sommerville, 1985).

Plusieurs facteurs liées aux géniteurs, peuvent influencer la qualité des œufs et des larves telles que l'origine (qualité génétique), le conditionnement (alimentation, paramètres environnementaux, etc.) et les manipulations (induction hormonale, facteurs de stress, etc.) (Migaud et al., 2013). Dans cette étude, nous avons constaté que le volume moyen des œufs, le taux d'éclosion, la taille des larves et la survie pendant la phase larvaire étaient légèrement supérieurs pour les géniteurs élevés en système BFT par rapport au groupe C, mais ces différences n'étaient pas statistiquement significatives ($p > 0.05$). L'étude menée par Ekasari et al. (2015) sur le tilapia a montré une amélioration de la survie et de la résistance des larves issues des géniteurs élevés en système BFT. Des effets positifs de l'élevage des géniteurs en système BFT sur la qualité des œufs et des larves ont également été observés chez le poisson chat africain (Ekasari et al., 2016), la crevette bleue (*Litopenaeus stylirostris*) (Cardona et al., 2016) et la crevette rodché (*Farfantepenaeus duorarum*) (Emerenciano et al., 2014).

Les tests de résistance au stress, tel que le test de salinité, représentent un outil important pour l'évaluation de la qualité des œufs et des larves des crevettes et des poissons (Merchie et al., 1997). Contrairement aux résultats obtenus par Ekasari et al. (2015), qui ont montré une amélioration de la résistance des larves de tilapia issues des géniteurs élevés en système BFT après les tests de salinité et d'exposition aux bactéries pathogènes, notre étude n'a pas révélé d'influence significatif du système d'élevage des géniteurs sur la résistance des larves aux chocs de salinité et d'exposition à l'air. Cela vient conforter nos résultats concernant les performances de reproduction et la qualité des œufs et des larves.

Dans l'ensemble, les résultats de cette étude montrent la possibilité d'utiliser le système BFT dans les écloseries de tilapia pour le stockage et la reproduction des géniteurs, sans impacts négatifs sur les rendements de production et la qualité des progénitures.

Chapitre V

**Influence du système biofloc sur les performances d'élevage des
premiers stades du développement du tilapia**

1. Matériel et méthodes

1.1. Dispositif expérimental

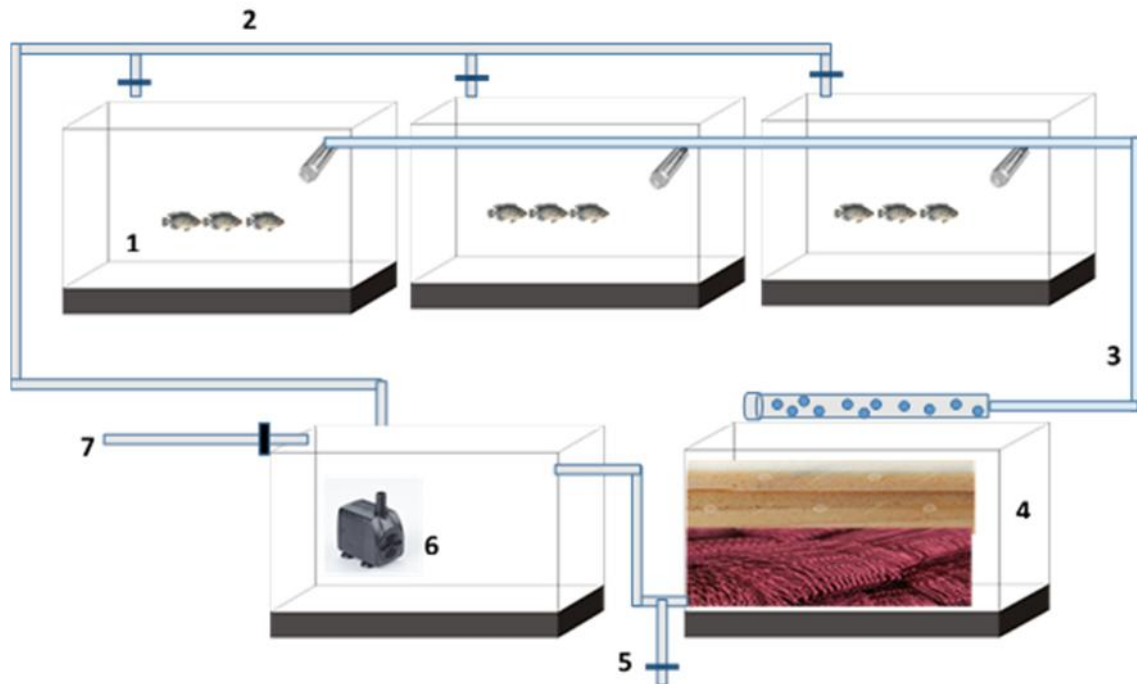
L'expérience s'est déroulée sur une période de 43 jours (entre Juillet et Aout 2018), au niveau de la salle des géniteurs de la station expérimentale de pisciculture marine.

Nous avons aménagé une unité d'élevage larvaire du tilapia qui comporte 06 aquariums en verre de 60 L (Fig.56). Trois aquariums fonctionnent en système BFT (groupe BFT) et trois aquariums fonctionnent en système de recirculation d'eau (groupe contrôle (C)).



Figure 56. Unité d'élevage des post-larves du tilapia

Dans les aquariums du groupe C, l'eau d'élevage est évacué gravitairement vers un aquarium de filtration de 60 L. Cet aquarium est équipé d'une couche d'éponges pour la filtration mécanique et d'une couche de filets de pêche qui servent de substrat pour la filtration biologique. L'eau filtrée est ensuite recueillie dans un aquarium de collecte, équipé d'une pompe immergée qui assure la recirculation d'eau vers les aquariums d'élevage à travers des vannes de réglage de débit (Fig.55). Le volume du système de filtration représente un tiers du volume d'élevage.



(1) Aquarium d'élevage, (2) Canalisation d'alimentation, (3) Canalisation d'évacuation, (4) aquarium de filtration, (5) Vanne de vidange, (6) Pompe de recirculation, (7) Arrivée d'eau neuve

Figure 57. Schéma du circuit de recirculation des aquariums du groupe contrôle

Le ratio C/N dans les bacs BFT est maintenu à 15, par la supplémentation quotidienne du sucre blanc comme source de carbone. Chaque aquarium est équipé de 2 diffuseurs d'air de grand modèle. La photopériode de la salle est réglée automatiquement à 14 heures de lumière / 24 heures. L'apport en eau neuve est assuré à partir d'un bassin de stockage en béton d'une capacité de 4.5 m³. Les trop-pleins des aquariums du groupe C sont équipés de filtres de 1 mm pour empêcher la sortie des larves. Ces filtres sont nettoyés régulièrement pour éviter le colmatage et le débordement de l'eau dans les aquariums.

Au total, 540 larves du tilapia provenant de l'expérience précédente, avec un poids moyen de 8.7±0.7 mg sont réparties sur les aquariums d'élevage à une densité de 90 individus par aquarium. Les aquariums du groupe BFT sont remplis préalablement avec 30 % d'eau riche en floc provenant des bacs de stockage des reproducteurs, pour accélérer le développement initial du floc.

Les poissons sont nourris trois fois par jour avec un aliment artificiel de marque COPPENS, dont le diamètre varie entre 0,3 et 1 mm. La composition détaillée de cet aliment est disponible dans l'annexe 05. Au cours de la première semaine, la ration quotidienne d'aliment distribuée correspondait à 9% de la biomasse totale, en se basant sur les tables de rationnement établies

par le fabricant de l'aliment. Par la suite, la ration a été progressivement réduite pour atteindre 6% à la fin de l'expérience. Les rations sont ajustées selon le comportement alimentaire des larves.

1.2. Suivi des paramètres du milieu

La température de l'eau, l'oxygène dissous et le pH sont mesurés quotidiennement avec un multi-paramètre portable de marque PNSEL « modèle ODEON ». L'ammonium, les nitrites et l'alcalinité sont analysés deux fois par semaine selon (Rodier et al., 2009), en utilisant les memes protocles décrites dans le chapitre II. Les nitrates sont mesurés une fois par semaine par dosage colorimétrique, en utilisant le photopod intégré au multi paramètre « PONSEL-ODEON ». Le volume du floc dans les aquariums du groupe BFT est mesuré deux fois par semaine en utilisant deux cônes Imhoff selon le protocole décrit dans le chapitre précédent.

1.3. Performances zootechniques

Le poids moyen des larves est déterminé au début de l'expérience (J0), après 20 jours d'élevage (J20) et à la fin de l'expérience (J43). Les paramètres de croissance et d'utilisation de l'aliment sont déterminés selon les formules suivantes (Gallardo-Collí et al., 2019) :

$$\text{Taux de survie (S\%)} = 100 \times N_{\text{final}} / (N_{\text{initial}} - N_{\text{larves prélevés par échantillonnage}}) \dots (29)$$

$$\text{Le gain moyen quotidien du poids : GMQ (g/j)} = (PM_f - PM_i) / t \dots (30)$$

$$\text{Taux de croissance spécifique : TCS (\% / j)} = 100 \times [(\ln PM_f) - (\ln PM_i)] / t \dots (31)$$

$$\text{Indice de Conversion : IC} = \text{Poids total d'aliment distribué (kg)} / \text{gain en biomasse (kg)} \dots (32)$$

$$\text{Coefficient de condition : } k = P / L^3 \dots (33)$$

$$\text{Coefficient de variation du poids : CV (\%)} = \sigma / PM_f \times 100 \dots (34)$$

$$\text{Coefficient de variation de taille : CV (\%)} = \sigma / L_{\text{moyenne}} \times 100 \dots (35)$$

PM_f : poids moyen final des poissons. **PM_i** : poids moyen initial des poissons. **t** : temps en jour. **P** : poids individuel en g. **L** : longueur des poissons en cm. σ : écart-type

1.4. Echantillonnage et dosages enzymatiques

Dans le but d'étudier l'effet du milieu biofloc sur les paramètres physiologiques chez le tilapia, des échantillons de 10 larves sont prélevés dans chaque aquarium à J20 et à J43. Les larves prélevées sont euthanasiés par une dose létale de 2-phénoxyéthanol à 0.2%. Les échantillons de larves sont ensuite découpés à l'aide de ciseaux, puis dilués 10 fois dans le tampon Tris-HCl (pH=7.5) et homogénéisés pendant 60 secondes à l'aide d'un bras mixeur (fig.58). Toutes les

manipulations des échantillons sont réalisées sur de la glace afin de maintenir la température autour de 4°C.

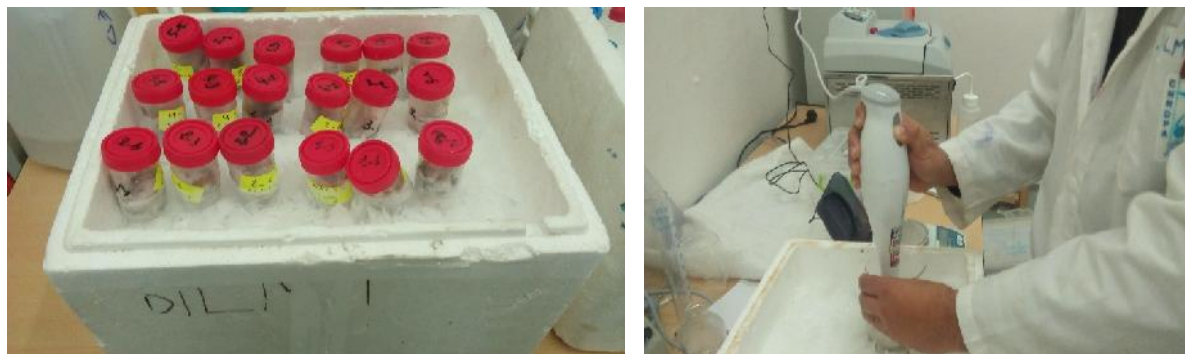


Figure 58. Homogénéisation des échantillons de post-larves

Les homogénats sont ensuite centrifugés à 6000 tr/mn pendant 60 min à 4°C. Le surnageant de chaque échantillon est transféré dans des tubes Eppendorf de 1.5 ml et conservé dans un congélateur ultra-basse température à -80°C, jusqu'à leur utilisation pour les dosages enzymatiques. Les dosages des protéases et de l'alpha-amylase sont réalisés selon les méthodes décrites par Anasori et al. (2015) et Bernfeld (1955) respectivement (voir pages 56-59).

Les dosages de la catalase et du SOD dans les homogénats des larves sont effectués respectivement selon Aebi (1984) et Marklund and Marklund (1974). L'analyse des protéines est réalisée selon la méthode de Lowry et al. (1951) (voir pages 60-63).

1.5. Analyses statistiques

Les résultats relatifs aux paramètres du milieu, les performances zootechniques et les paramètres physiologiques sont exprimés sous formes de moyennes \pm déviations standards. La comparaison des moyennes entre les deux groupes expérimentaux sont réalisées par le test t de Student pour les échantillons indépendants ($n=3$). L'homogénéité des variances et la normalité des variables sont vérifiées par les tests de Hartley et de Bartlett et de Shapiro-Wilk respectivement. Le traitement des données statistique est effectué à l'aide du logiciel STATISTICA 8.0®.

2. Résultats

2.1. Paramètres du milieu

Les valeurs moyennes des paramètres physico-chimiques dans les aquariums d'élevage larvaire sont résumées dans le tableau 20. Les résultats ne montrent pas de différences significatives de la température de l'eau, de l'oxygène dissous, et de l'alcalinité entre les aquariums des groupes BFT et C. Les températures de l'eau étaient stables autour de 26 °C et les teneurs en oxygène

dissous étaient maintenues au-dessus de 7 mg/L. Les concentrations des produits azotés (NH_4^+ , NO_2^- et NO_3^-) étaient significativement plus élevées dans le groupe BFT par rapport au groupe C ($p < 0.05$). Les valeurs moyennes du volume du floc restent au-dessous de 15 ml/L.

L'évolution des paramètres du milieu au cours du temps pour les deux groupes expérimentaux est présentée dans la figure 59. Nous avons enregistré d'importantes fluctuations des concentrations en ammonium dans les aquariums BFT, avec des pics de concentrations dépassant 3 mg/L durant la deuxième semaine. Les concentrations des nitrites ont fluctué à des valeurs entre 0.01 et 0.9 mg/L. Dans les aquariums du groupe contrôle, les teneurs en ammonium et en nitrites sont restées relativement stables. Les teneurs en nitrates ont augmenté régulièrement dans les deux groupes expérimentaux pour atteindre des valeurs autour de 30 mg/L à la fin de l'expérience. Une diminution régulière de l'alcalinité de l'eau a été observée dans tous les aquariums d'élevage. L'évolution du volume du floc dans les aquariums BFT montre une augmentation régulière, pour atteindre des valeurs supérieures à 30 ml/L à la fin de l'expérience.

Tableau 20. Valeurs moyennes \pm déviations standards des paramètres physicochimiques dans les aquariums des groupes BFT et C

Paramètres	BFT	C	Valeur- <i>p</i>
Température (°C)	25.82 \pm 0.31	25.97 \pm 0.1	0.46
Oxygène dissous (mg/ L)	7.31 \pm 0.042	7.33 \pm 0.02	0.39
pH	8.01 \pm 0.01*	8.09 \pm 0.02	0.0025
Ammonium NH_4^+ (mg/ L)	1.18 \pm 0.21*	0.52 \pm 0.05	0.0058
Nitrites NO_2^- (mg/ L)	0.41 \pm 0.14*	0.08 \pm 0.005	0.017
Nitrates NO_3^- (mg/ L)	25.9 \pm 3*	16.6 \pm 0.82	0.006
Alcalinité (mg/ L)	154 \pm 4.5	154.9 \pm 1.9	0.175
Volume du floc (ml/ L)	14.95 \pm 1.62	-	

* indique une différence significative entre les traitements (test t de Student, $p < 0.05$)

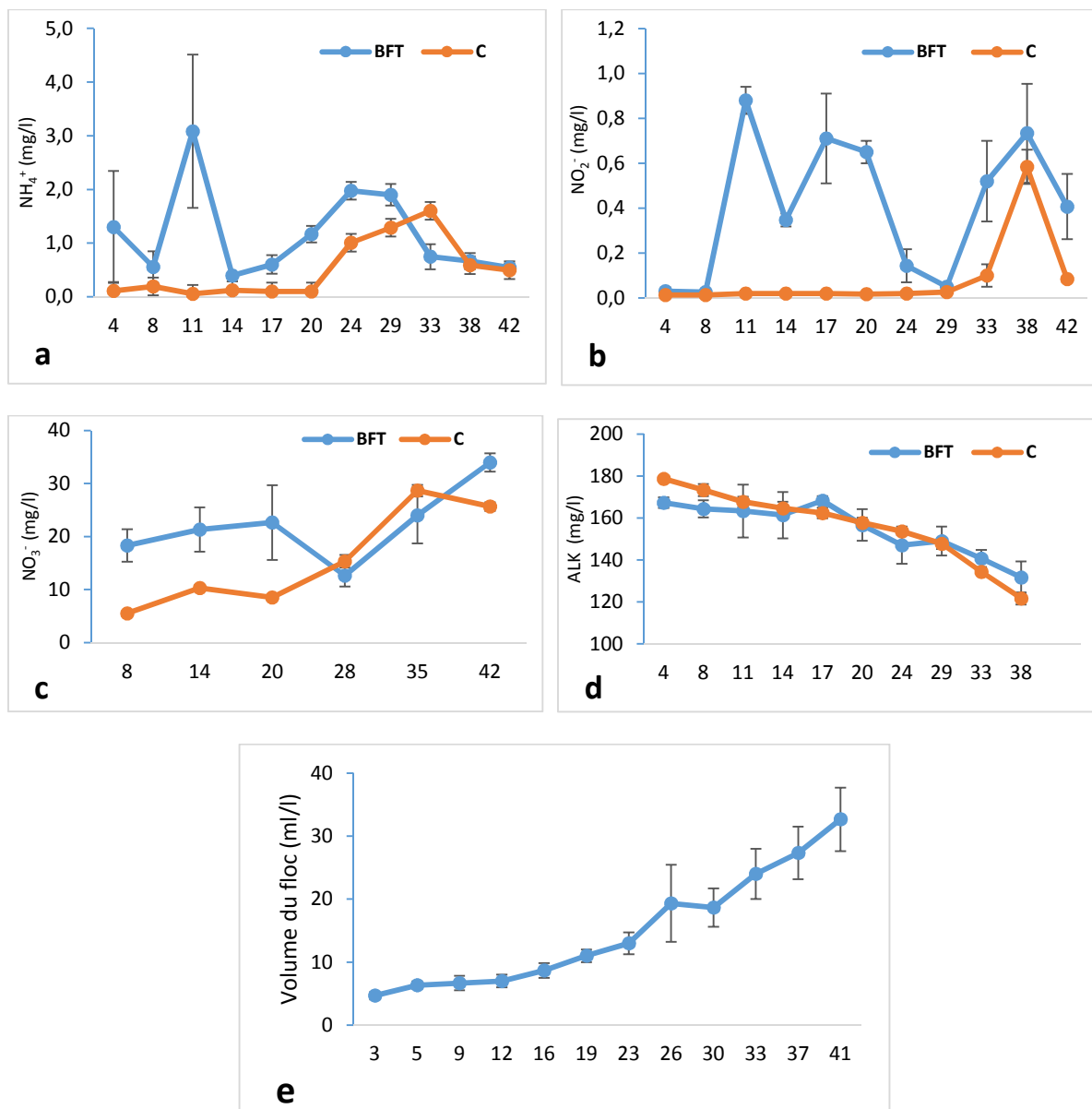


Figure 59. Évolution des concentrations moyennes \pm déviations standards de l'ammonium (a), les nitrites (b), les nitrates NO₃⁻ (c), l'alcalinité (d) et le volume du floc (e) dans les aquariums des groupes BFT et C

2.2. Performances de croissance

Les résultats des performances zootechniques des larves de tilapia durant les 20 premiers jours de l'expérience sont consignés dans le tableau 21. Les indices de croissance étudiés (PM_f, GMQ et TCS) étaient significativement plus élevés dans le groupe BFT par rapport au groupe C. Le poids des larves à J20 était d'environ 228 mg dans le milieu BFT et de 177 mg dans le groupe contrôle. L'indice de conversion alimentaire était significativement meilleur chez les larves élevées dans le système BFT.

Tableau 21. Performances de croissance et de l'utilisation de l'aliment des post-larves du tilapia après 20 jours d'élevage dans les deux groupes expérimentaux BFT et C (moyennes \pm déviations standards)

Paramètres	BFT	C	Valeur- <i>p</i>
Poids moyen initial (mg)	8.83 \pm 0.85	8.60 \pm 0.81	0.74
Poids moyen final (mg)	228 \pm 6.08*	177.3 \pm 7.54	0.0008
Gain moyen quotidien du poids (mg/j)	10.96 \pm 0.32*	8.44 \pm 0.36	0.0008
Taux de croissance spécifique (% / j)	16.27 \pm 0.54*	15.14 \pm 0.40	0.043
Indice de conversion alimentaire	0.79 \pm 0.04*	0.89 \pm 0.03	0.026

* indique une différence significative entre les traitements (test t de Student, $p < 0.05$)

Les résultats obtenus après 43 jours d'élevage (tableau 22) ne montrent aucune différence significative des indices de croissance et de conversion alimentaire étudiés (PM_f , GMQ, TCS et IC) entre les larves élevées dans les deux systèmes de production. Le facteur de condition et le coefficient de variation étaient similaires entre les larves des deux groupes expérimentaux ($p > 0.05$). Aucun cas de mortalité n'a été constaté au sein des larves au cours de cette expérience.

Tableau 22. Performances de croissance et de l'utilisation de l'aliment des post-larves du tilapia après 43 jours d'élevage dans les deux groupes expérimentaux BFT et C (moyennes \pm déviations standards)

Paramètres	BFT	C	Valeur- <i>p</i>
Poids moyen initial (mg)	8.83 \pm 0,85	8.60 \pm 0.81	0.74
Poids moyen final (g)	1.71 \pm 0.08	1.8 \pm 0.06	0.077
GMQ (mg/j)	39.53 \pm 1.86	41.62 \pm 1.39	0.19
TCS (% / j)	12.25 \pm 0.26	12.43 \pm 0.29	0.46
IC	0.88 \pm 0.04	0.96 \pm 0.05	0.073
S (%)	100	100	-
k	1.53 \pm 0.042	1.54 \pm 0.027	0.61
CV poids (%)	26.16 \pm 2.56	26.00 \pm 6.19	0.96
CV taille (%)	8.4 \pm 0.9	8.3 \pm 2.17	0.94

* indique une différence significative entre les traitements ($p < 0.05$)

2.3. Activité des enzymes digestives

Les résultats relatifs aux dosages des enzymes digestives dans les homogénats de larves (Fig.60) montrent que l'activité amylolytique à J20 était significativement plus élevée chez les larves élevées dans le système BFT. Aucune différence significative n'a été observée pour l'activité des protéases sur la même période d'élevage. À J43, les activités amylolytique et protéolytique étaient similaires entre les deux groupes expérimentaux.

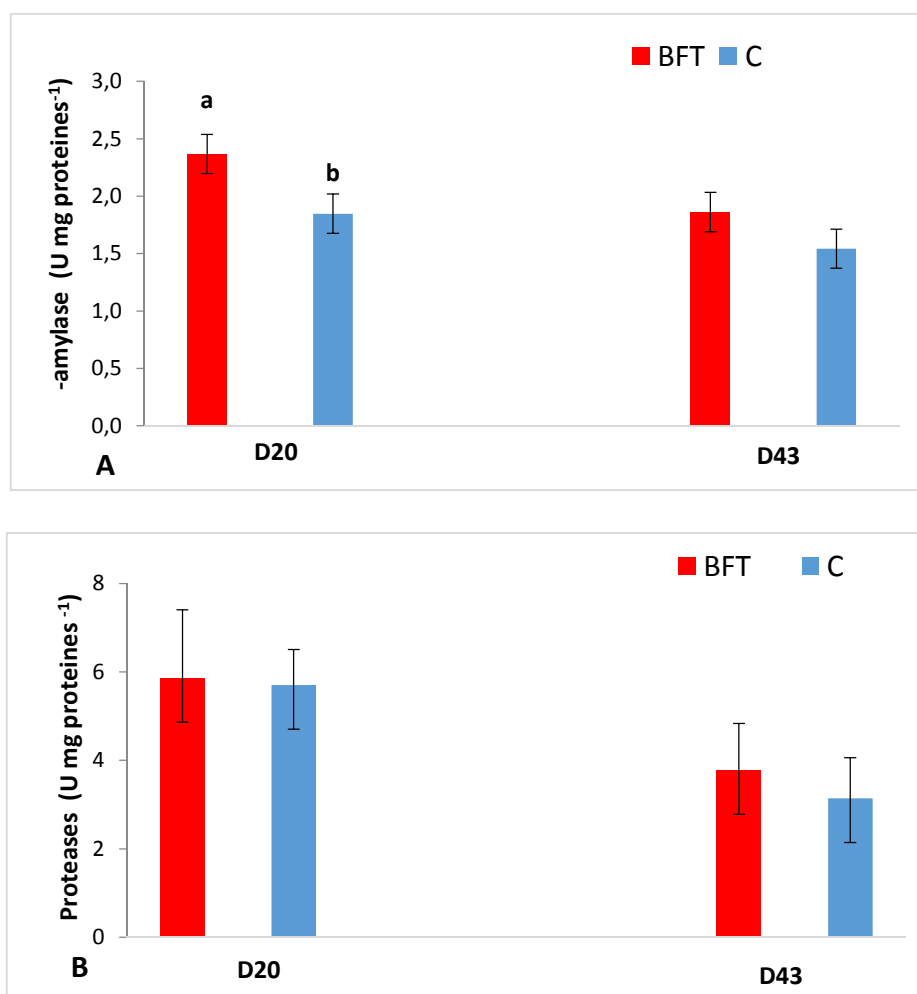


Figure 60. Activité de l'alpha-amylase (A) et des protéases (B) chez les larves du tilapia après 20 jours et 43 jours d'élevage dans les 2 traitements BFT et C (moyennes \pm déviations standards). Les lettres différents au-dessus des histogrammes indiquent une différence significatives ($p < 0.05$)

2.4. Activité des enzymes antioxydants

L'étude de l'activité enzymatique des antioxydants (Fig.61) a montré que l'activité de la catalase était significativement plus élevée chez les larves du système BFT après 20 jours d'élevage. À la fin de l'expérience (J43), l'activité de la catalase était relativement plus élevée dans le groupe BFT, mais cette différence n'était pas statistiquement significative. Aucune

différence significative de l'activité SOD n'a été mise en évidence chez les larves des 2 groupes à J20 et à J43.

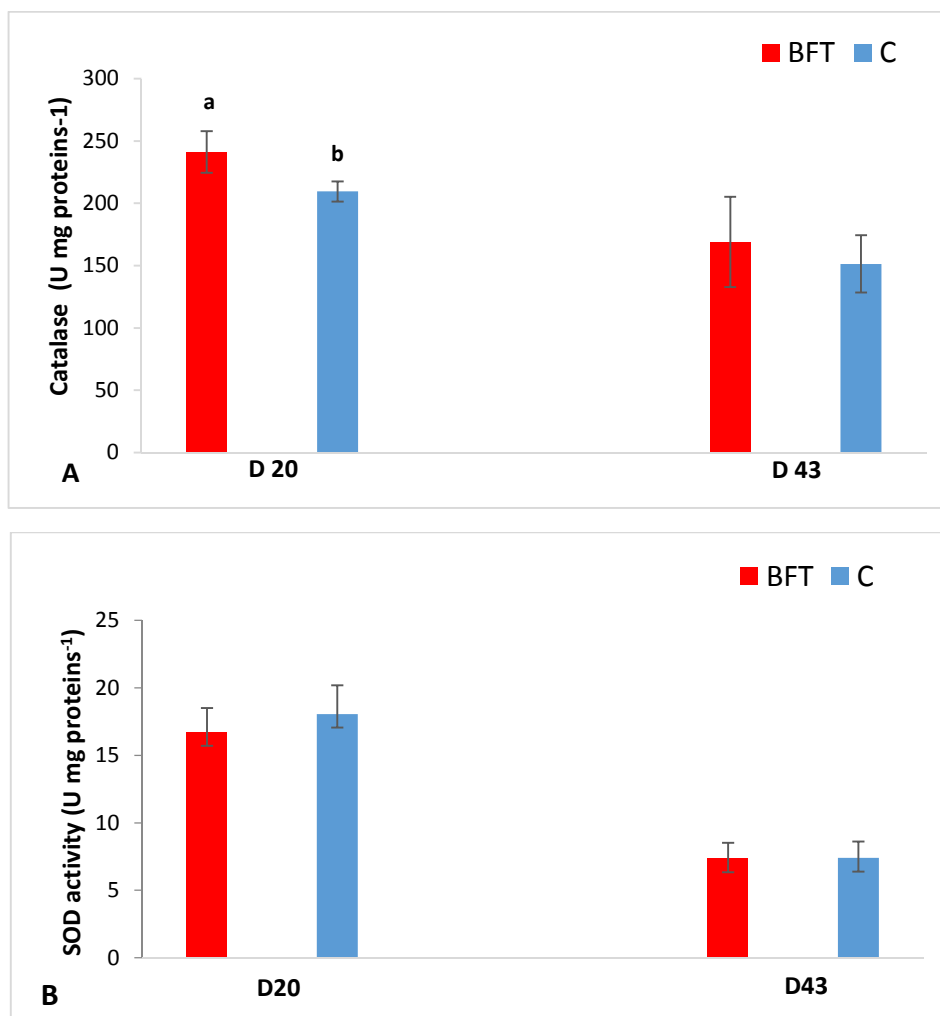


Figure 61. Activité de la Catalase (A) et de la SOD (B) chez les larves du tilapia après 20 jours et 43 jours d'élevage dans les 2 groupes BFT et C (moyennes \pm déviations standards).

3. Discussions

3.1. Paramètres du milieu

La température de l'eau, l'oxygène dissous, le pH et l'alcalinité étaient similaires entre les deux traitements et se situaient dans la plage optimale pour la croissance du tilapia (El-Sayed, 2006). Les concentrations moyennes d'ammonium, des nitrites et des nitrates étaient significativement plus élevés dans les aquariums du groupe BFT, mais les valeurs restaient dans la gamme acceptable pour le tilapia (El-Sayed, 2006 ; DeLong et al., 2009; Bhatnagar & Devi, 2013). Dans les aquariums du groupe BFT nous avons enregistré des concentrations maximales en NH_4^+ de 2.8 mg/L. Cependant, les déchets azotés sous la forme ammonium (NH_4^+) sont

beaucoup moins toxiques que la forme ammoniacale (NH_3), dont les concentrations doivent être maintenues en dessous de 0.2 mg/l (El-Sayed, 2006 ; Bhatnagar & Devi, 2013). Le ratio $\text{NH}_4^+/\text{NH}_3$ dans l'eau varie en fonction de la température et le pH de l'eau. À des températures de 25°C et un pH de 8, le taux de NH_3 dans l'eau représente 5.4% de la concentration de l'azote ammoniacale total (Summerfelt, 2000). En système BFT, des concentrations en ammonium supérieures à 9 mg ont été enregistrés sans effets négatifs sur la croissance et la survie des juvéniles du tilapia (Pérez-Fuentes et al., 2018). Les valeurs maximales des nitrites (1.46 mg/l) et des nitrates (45 mg/l) dans les aquariums BFT se situent dans la plage acceptable en élevage du tilapia (inférieures à 5 mg/l pour NO_2^- et inférieures à 300 mg/l pour NO_3^-) (DeLong et al., 2009; Monsees et al., 2017). La photopériode maintenue à 16 heures de lumière est favorable pour le développement des post-larves du tilapia (El-Sayed, 2006). Dans le groupe BFT, les valeurs moyennes du volume de floc se situaient dans la plage acceptable pour l'élevage des alevins du tilapia : 5 à 20 ml/L (Emerenciano et al., 2017).

3.2. Performances zootechniques

Nous n'avons pas enregistré des mortalités au sein des post-larves du tilapia dans tous les aquariums, ce qui reflète les bonnes conditions du déroulement de l'expérience.

Dans l'ensemble, la croissance des post-larves du tilapia était relativement bonne dans les deux systèmes d'élevage, avec des taux de croissance spécifique d'environ 15% par jour après 20 jours d'élevage et d'environ 12% par jour après 43 jours d'élevage. Ces résultats sont comparables à ceux rapportés dans la littérature pour les tilapias au même stade d'élevage (Dambo & Rana, 1993; Ferdous et al., 2014; Omar et al., 2014; Silva et al., 2017^a). Par ailleurs, une utilisation efficace de l'aliment par les larves a été enregistrée, se traduisant par des indices de conversions alimentaires comprises entre 0.8 et 0.98. Des indices de conversion inférieurs à 1 ont été indiqués en élevage des post-larves du tilapia (Fleckenstein et al., 2018; Haidar et al., 2018; Malik et al., 2018).

Les résultats de cette étude ont montré des effets positifs du milieu biofloc sur la croissance et l'utilisation de l'aliment pendant la première phase de l'expérience (20 jours d'élevage). Le gain du poids moyen quotidien était de 29.8% plus élevé dans le groupe BFT par rapport au groupe C, et l'indice de conversion alimentaire était de 15.6% plus élevé dans le groupe C. Des observations similaires ont été rapportées dans une étude menée par Liu et al. (2018), qui ont constaté une amélioration du taux de croissance spécifique et de l'indice de conversion alimentaire chez les tilapias élevés en système BFT (avec un poids moyen initial de 500 mg).

García-Ríos et al. (2019) ont également indiqué une amélioration de l'indice de conversion alimentaire chez les post-larves du tilapia en système BFT. En revanche, Ekasari et al. (2015), n'ont pas trouvé d'effet significatif de l'élevage en milieu biofloc sur la croissance des post-larves de tilapia (poids moyen initial de 23 mg).

Des études menées sur d'autres espèces aquacoles ont montré une amélioration des performances de croissance des post-larves élevées en système BFT, telles que le poisson chat africain (Ekasari et al., 2016) et les crevettes (Emerenciano et al., 2011; Kim et al., 2014). La disponibilité de proies vivantes telles que les daphnies et les rotifères peut contribuer à l'amélioration de la croissance des larves du tilapia (Cruz & James, 1989; Islam et al., 2017). Le milieu biofloc est un environnement riche en communautés diversifiées de microorganismes tels que les bactéries, de phytoplancton et de zooplancton (Castro-Mejía et al., 2017; Manan et al., 2017). Ces microorganismes constituent une source naturelle "in-situ" riche en éléments nutritifs et disponible en continu dans le milieu d'élevage (Becerril-Cortés et al., 2017). L'abondance des microorganismes planctoniques dans les bacs BFT peut donc servir de source complémentaire d'alimentation pour les post-larves du tilapia, contribuant ainsi à améliorer leur croissance et leur efficacité alimentaire.

Après une durée de 43 jours d'élevage, il n'y avait pas de différence significative dans les performances de croissance entre les larves des deux groupes expérimentaux. Il est possible que le ralentissement de la croissance observé dans le groupe BFT lors de la deuxième phase de l'expérience soit dû à une augmentation du volume de floc dans les aquariums, à des valeurs supérieures à 20 ml/L. La gestion adéquate des niveaux de MES est essentielle pour assurer le bon fonctionnement du système BFT et maintenir un environnement de culture sain et équilibré (Zemor et al., 2019). Dans le cas de l'alevinage du tilapia en système BFT, il est recommandé de maintenir le volume de floc entre 5 et 20 ml/L (Emerenciano et al., 2017). Selon Ardjosoediro and Ramnarine (2002), le gain de poids des alevins du tilapia diminue significativement en augmentant la turbidité des matières argileuses de 0 à 50 et 100 mg/L. L'auteur recommande de maintenir la turbidité à des niveaux inférieurs à 100 mg/L pour un rendement optimal de production.

Le facteur de condition est un indicateur utilisé pour évaluer l'état de santé et peut fournir des informations sur les variations de l'état physiologique des poissons liées aux conditions d'élevage, telles que l'alimentation et les paramètres environnementaux (Ighwela et al., 2011). Dans cette étude, nous n'avons observé aucun effet significatif du système BFT sur le facteur

de condition des post-larves de tilapia, ce qui est cohérent avec les résultats rapportés par Ekasari et al. (2015) et García-Ríos et al. (2019).

Contrairement aux résultats d'Ekasari et al. (2015) qui ont constaté une réduction de l'hétérogénéité des tailles des post-larves de tilapia élevées en système BFT, notre étude n'a montrée aucun effet significatif du système d'élevage sur l'hétérogénéité des tailles, avec des coefficients de variation de tailles compris entre 7.7 et 10.6%. Des valeurs de coefficients de variation comparables ont été rapportées pour les tilapias au même stade d'élevage (Gomes et al., 2000; Huang & Chiu, 1997).

3.3. Activité enzymatique

Les enzymes digestives jouent un rôle important dans la digestion et l'assimilation des nutriments chez les larves de poissons (Kolkovski, 2001). Des études antérieures ont montré que le milieu BFT peut favoriser l'activité des enzymes digestives chez les premiers stades du développement des poissons et des crevettes (Cardona et al., 2015; Liu et al., 2018; Mansour et al., 2022). Dans notre étude, nous avons montré une augmentation significative de l'activité amylolytique chez les post-larves de tilapia élevées pendant 20 jours en système BFT. À la fin de l'expérience (J43), l'activité amylolytique était plus élevée dans le groupe BFT, bien que cette différence n'ait pas atteint un niveau de signification statistique. L'activité protéolytique était similaire entre les poissons élevés dans les deux groupes expérimentaux. Cette augmentation de l'activité enzymatique de l'alpha-amylase a probablement contribué à l'amélioration de la digestion et de l'absorption des nutriments avec des effets positives sur la croissance et l'efficacité alimentaire. Des résultats similaires ont été obtenus par Long et al. (2015) et Mohammadi et al. (2021) concernant la stimulation de l'activité de l'alpha-amylase dans l'intestin des juvéniles du tilapia élevés en système BFT. D'autre part, Liu et al. (2018) ont indiqué une stimulation de l'activité de la trypsine et des lipases dans le foie des alevins de tilapia élevés en milieu BFT. L'alpha-amylase catalyse l'endohydrolyse des liaisons -1,4-glucosidiques de l'amidon et de molécules similaires en oligosaccharides simples, et son activité semble être plus importante chez les poissons herbivores et omnivores tel que les tilapias (Hidalgo et al., 1999; Krogdahl et al., 2005).

La stimulation de l'activité enzymatique dans le système biofloc peut être attribuée à la contribution des enzymes extracellulaires libérées par les micro-organismes associés au biofloc et/ou à l'amélioration de l'activité des enzymes endogènes par certains composés bioactifs contenus dans le biofloc (Xu et al., 2013; Wang et al., 2016).

Il existe une relation étroite entre le statut antioxydant, le système immunitaire et l'état sanitaire des poissons (Biller-Takahashi et al., 2015; Zaki et al., 2020). Plusieurs facteurs, tels que la température, l'oxygène dissous, la salinité, la disponibilité et la qualité de la nourriture, l'âge, les pathologies et la pollution, peuvent influencer le système de défense antioxydant chez les poissons (Birnie-Gauvin et al., 2017; Hoseinifar et al., 2021). La catalase, la superoxyde dismutase et la glutathion peroxydase constituent la première ligne de défense antioxydante dans les systèmes biologiques et préviennent la peroxydation lipidique (Ighodaro & Akinloye, 2018). Dans cette étude, l'activité de la catalase était significativement plus élevée chez les post-larves élevées pendant 20 jours dans le système BFT, mais aucune différence significative n'a été observée en ce qui concerne l'activité du superoxyde dismutase. Ces résultats suggèrent une amélioration du système de défense antioxydant chez les post-larves du tilapia en milieu biofloc, ce qui pourrait avoir un impact positif sur leur système immunitaire et leur état sanitaire. Ces résultats s'alignent avec les améliorations observées au niveau de la croissance et de l'activité des enzymes digestives dans le groupe BFT. Des résultats similaires ont été rapportés par Liu et al. (2018), qui ont constaté une amélioration de la réponse antioxydante chez les post-larves du tilapia élevées dans le système BFT. D'autres études récentes ont également montrés l'influence du milieu BFT sur le statut antioxydant des juvéniles de tilapia (Mansour & Esteban, 2017; Haraz et al., 2018; Mohammadi et al., 2021; Shourbela et al., 2021). Des études réalisées sur le tilapia ont montré une concordance entre la stimulation par le milieu biofloc de l'activité des enzymes antioxydants et l'influence sur les variables liés à l'immunité, avec des effets positifs sur l'état sanitaire et la résistance aux pathologies (Menaga et al., 2019; Mohammadi et al., 2021; Shourbela et al., 2021).

Il est bien connu que les additifs alimentaires fonctionnels tels que les probiotiques et les prébiotiques peuvent influencer l'activité des enzymes digestives et le système de défense antioxydant des poissons, avec des impacts positifs sur la croissance et l'efficacité alimentaire (Carnevali et al., 2014; Allameh et al., 2017; Dawood et al., 2020; Hoseinifar et al., 2021). Le milieu biofloc contient une variété de bactéries qui peuvent avoir un potentiel probiotique naturel dans les systèmes d'élevage (Ferreira et al., 2015; Pérez-Fuentes et al., 2018; Romano, 2021). Des études récentes ont montré que l'élevage des premiers stades larvaire du tilapia, notamment lors de la phase initiale de colonisation du microbiote intestinal, dans des milieux riches en bactéries tels que le système BFT, influence la composition de la flore microbienne et favorise les interactions microbiennes dans l'intestin, avec des bénéfices potentiels sur la santé de l'hôte (Giatsis et al., 2015; Deng et al., 2021).

Discussion générale

L'objectif général de cette thèse est d'évaluer l'efficacité de l'élevage du tilapia, une espèce d'intérêt économique pour l'aquaculture en Algérie, en utilisant la technologie innovante du biofloc (BFT), qui présente de multiples avantages, notamment la réduction de l'utilisation de l'eau et les aspects de biosécurité. Cette thèse a été réalisée en suivant plusieurs étapes méthodologiques visant à explorer et à approfondir les différents aspects de la maîtrise de cette technologie d'élevage, qui sont résumés dans le tableau 25.

La première partie du travail a été consacrée à la préparation d'un milieu biofloc stable en vue de mener les diverses expériences d'élevage. Une surveillance régulière des paramètres du milieu a été réalisée au cours de cette phase du démarrage du biofloc pour estimer la durée nécessaire pour la préparation du milieu.

La deuxième partie visait à optimiser le rapport carbone/azote dans le système BFT, un paramètre essentiel de son fonctionnement, en évaluant son impact sur les paramètres du milieu et les performances de croissance du tilapia en phase de grossissement. Des analyses biochimiques ont été réalisées sur des échantillons de poissons prélevés dans les bacs d'élevage afin d'évaluer l'influence du système d'élevage sur l'état physiologique de l'espèce étudiée. Les résultats obtenus ont été comparés à un groupe témoin élevé dans un système conventionnel en circuit ouvert.

Dans le but d'évaluer la faisabilité de l'utilisation de la technologie BFT dans les éclosiers de tilapia, une section de cette étude a été consacrée à l'évaluation des impacts du stockage des géniteurs de tilapia dans le milieu BFT sur leurs performances de reproduction, ainsi qu'à l'évaluation des effets potentiels sur la qualité de leur progéniture.

Dans la dernière partie de cette étude, des expérimentations d'élevage ont été effectuées en utilisant des post-larves du tilapia, dans le but de compléter l'exploration des différents stades de production de cette espèce dans le système BFT.

Les résultats obtenus dans cette étude indiquent que la phase initiale de maturation du biofloc a été caractérisée par une augmentation des concentrations de substances azotées, dépassant les valeurs recommandées pour l'élevage du tilapia. Des pics de concentrations d'environ 9 mg/L pour l'ammonium et 12 mg/L pour les nitrites ont été enregistrés au cours de cette phase. Cependant, après six à sept semaines du lancement du milieu avec des apports réguliers de la mélasse comme source de carbone, ces paramètres du milieu ont commencé à se stabiliser à des valeurs tolérables en élevage du tilapia, ce qui correspond à la durée de maturation du floc. Cette phase s'est également caractérisée par une diminution du pH et de l'alcalinité de l'eau,

ainsi que par une accumulation des matières en suspension dans le milieu. Les résultats des performances zootechniques pendant cette phase ont montré des taux de croissance faibles, avec des indices de conversion alimentaire très élevés, probablement dus aux fortes fluctuations des paramètres du milieu. Des études antérieures ont également observé des tendances similaires de variation des teneurs en substances azotées dans les systèmes BFT (Schweitzer et al., 2013; Luo et al., 2014; Ray & Lotz, 2014; Xu et al., 2020).

Les résultats de la deuxième expérience ont montré des variations significatives des concentrations moyennes des substances azotées entre les trois traitements BFT à des ratios C/N de 14, 17 et 20. Dans le groupe BFT14, les concentrations moyennes d'ammonium et de nitrites étaient significativement plus élevées que dans les groupes BFT17 et BFT20, tandis que les teneurs en nitrates étaient plus élevées dans le groupe BFT14. Ces observations suggèrent une transition d'un milieu biofloc à prédominance autotrophe à un milieu à prédominance hétérotrophe en augmentant le ratio C/N de 14 à 20. Ces résultats sont en accord avec des études antérieures qui ont également montré que l'augmentation du ratio C/N favorise la prédominance des bactéries hétérotrophes dans les systèmes BFT (Xu et al., 2016 ; Silva et al., 2017b; Liu et al., 2018).

Dans l'ensemble, les paramètres du milieu ont été maintenus dans les limites acceptables pour le développement du tilapia (El-Sayed, 2006; DeLong et al., 2009), à l'exception de l'accumulation excessive de matières en suspension, en particulier dans le groupe BFT20. Les bactéries hétérotrophes ont une vitesse spécifique maximale de croissance nettement plus élevée que les bactéries autotrophes, avec une meilleure efficacité dans l'élimination des déchets azotés. Cependant, cette croissance bactérienne entraîne une augmentation des matières en suspension dans le milieu d'élevage (Ebeling et al., 2006; Hargreaves, 2006).

Contrairement aux études antérieures qui ont constaté une amélioration des performances de croissance et de conversion alimentaire chez le tilapia élevé en système BFT (Azim & Little, 2008; Luo et al., 2014; Long et al., 2015; Haraz et al., 2018; Liu et al., 2018; Hisano et al., 2019; Mirzakhani et al., 2019), notre étude n'a pas mis en évidence d'effets significatifs du milieu BFT sur les performances de croissance du tilapia. De plus, l'augmentation du ratio C/N de 14 à 17 et 20, n'a pas eu d'influence significative sur les paramètres zootechniques, bien qu'une diminution significative de la croissance ait été constatée dans le groupe BFT20 par rapport au groupe contrôle après 60 jours d'élevage, ce qui est attribuée probablement à l'augmentation des matières en suspension dans ce traitement.

Les résultats des analyses biochimiques n'ont montré aucune influence des régimes étudiés sur l'activité des enzymes digestives et des enzymes antioxydants, chez les juvéniles du tilapia, ce qui est en accord avec les résultats relatifs aux performances zootechniques.

Pendant l'expérience portant sur le stockage des géniteurs dans le système BFT par rapport à un groupe contrôle en système RAS, nous avons complété les essais précédents en testant d'autres ratios C/N de 12 et 18. Après deux mois d'élevage, nous avons constaté que le ratio C/N peut être réduit à 12 tout en maintenant les paramètres du milieu à des niveaux acceptables pour l'élevage du tilapia.

Le stockage des géniteurs du tilapia en système BFT pendant plus de 2 mois n'a pas influencé significativement les performances de reproduction et de qualité des œufs et des larves, en termes de fécondité et de fréquence de ponte, taux d'éclosion et de survie larvaire, la taille des œufs et des larves, ainsi que la résistance des larves. Ces résultats suggèrent que les besoins nutritionnels des géniteurs ont été satisfaits dans les deux systèmes de production comparés.

En dernier lieu, la comparaison des performances zootechniques entre les post-larves du tilapia élevé dans le système BFT avec celles élevés en système de recirculation d'eau a montré une amélioration significative de la croissance et de l'efficacité alimentaire chez les larves du traitement BFT après 20 jours d'élevage. Cette amélioration de la croissance a été accompagnée d'une stimulation significative de l'activité de l'alpha-amylase et de la catalase dans le traitement BFT. Ces résultats sont probablement attribués à la richesse du milieu biofloc en microorganismes, qui peuvent être utilisés comme source d'alimentation supplémentaires pour les larves, ayant ainsi des effets positifs sur l'activité des enzymes digestives et le système de défense antioxydant.

Globalement, les résultats de cette étude montrent la viabilité technique de l'élevage du tilapia dans le système biofloc, avec des résultats comparables aux systèmes de production conventionnels (en circuit ouvert et en système de recirculation). Cependant, pour mettre en œuvre le système BFT à une échelle de production commerciale en Algérie, il est essentiel d'évaluer sa faisabilité économique, un aspect qui n'a pas été abordé dans notre étude.

En général, l'utilisation du système BFT engendre des coûts supplémentaires, notamment liés à l'ajout d'une source de carbone dans les bassins d'élevage pour ajuster le ratio C/N, à l'addition de carbonates pour prévenir les chutes du pH et à la consommation d'énergie requise pour l'aération et l'agitation continue de l'eau. Selon nos résultats, qui recommandent un ratio C/N de 12, il est nécessaire d'ajouter 316 g de mélasse pour chaque kg d'aliment distribué

(aliment contenant 30% de protéines). De plus, environ 250 g de bicarbonates de sodium sont utilisés dans le milieu biofloc pour chaque kg d'aliment consommé (Samocha, 2019). Les quantités requises de source de carbone et de bicarbonates dépendent de divers facteurs tels que le ratio C/N, la teneur de l'aliment en protéines et l'alcalinité de l'eau.

Cependant, le système biofloc présente des avantages susceptibles de réduire les coûts de production par rapport aux systèmes d'élevage conventionnels, notamment la réduction de la consommation de l'eau, la réduction des quantités d'aliments distribuées, la possibilité de diminuer les teneurs en protéines dans l'aliment, l'augmentation de la densité de stockage des poissons et la réduction des coûts associés au traitement des rejets aquacoles (Khanjani & Sharifinia, 2020; Mugwanya et al., 2021).

Tableau 23. Tableau synthétique des objectifs et des paramètres étudiés relatifs aux expériences réalisées dans le cadre de cette thèse

Expérience	Objectif	Durée	Stade	Paramètres étudiés
1	- Estimer la durée nécessaire pour la maturation du floc - Surveillance des paramètres du milieu pendant la phase de start-up à différentes densité de stockage	11 semaines	poissons adultes	- T °C, OD, pH, ALC, NH ₄ ⁺ , NO ₂ ⁻ , VF - TCS, IC
2	- Etude de l'effet du milieu biofloc sur les paramètres du milieu et contribution à l'optimisation du ratio C/N. - Comparaison des performances de croissance et des paramètres physiologiques entre les tilapias élevés dans le système BFT à différents ratios C/N (14, 17 et 20) par rapport à l'élevage en circuit ouvert	62 jours	Juvéniles	- T °C, OD, pH, ALC, NH ₄ ⁺ , NO ₂ ⁻ , NO ₃ ⁻ , VF, MES. - TCS, TCR, GMQ, FSD, IC et taux de survie. - Activité de l'alpha-amylase, protéases, catalase et superoxyde dismutase
3	- Suivre les paramètres du milieu et les performances zootechniques pendant le stockage des géniteurs en système BFT à 2 ratios C/N (12 et 18) et dans le système RAS	72 jours	Poissons adultes	- T °C, OD, pH, ALC, NH ₄ ⁺ , NO ₂ ⁻ , NO ₃ ⁻ , VF. - TCS, GMQ, IC, taux de survie
4	- Evaluer l'effet du système BFT sur les performances de reproduction et la qualité des œufs et des larves.	2 mois	Poissons adultes, œufs, larves	- Fécondité, nombre de pontes, taux d'éclosion, survie en phase larvaire, longueur et volume des œufs, longueur des larves à J0 et à J5
5	- Etudier l'effet du système biofloc sur les performances zootechniques et les paramètres physiologiques des post-larves du tilapia.	43 jours	Post-larves	- T °C, OD, pH, ALC, NH ₄ ⁺ , NO ₂ ⁻ , NO ₃ ⁻ , VF. - TCS, GMQ, IC, S (%), k, CV (%). - Activités de l'alpha-amylase, catalase, SOD

Conclusion générale et perspectives

La technologie Biofloc (BFT) est considérée comme une nouvelle technique de production prometteuse en aquaculture. Elle est basée sur la production in situ de micro-organismes qui jouent trois rôles majeurs (Emerenciano et al., 2017) :

- Amélioration de la qualité de l'eau par l'élimination des substances azotées, en générant de la biomasse microbienne in-situ.
- Fourniture d'une source d'alimentation complémentaire pour les espèces d'élevage.
- Compétition contre les germes pathogènes.

Notre étude a abordé plusieurs aspects liés à l'élevage du tilapia en utilisant le système BFT, tels que l'évolution des paramètres du milieu dans les différentes conditions d'élevage, l'optimisation du ratio C/N et les effets sur les performances d'élevage de l'espèce ciblée. L'objectif était de contribuer à l'évaluation de l'application de cette nouvelle technologie à l'échelle pilote et dans les fermes aquacoles commerciales notamment dans les régions à déficit hydrique chronique.

Cette étude a montré que l'élevage en système BFT nécessite une phase de préparation du milieu biofloc qui peut durer environ 6 à 7 semaines. Cette phase est caractérisée par de fortes fluctuations des paramètres du milieu, notamment les concentrations en substances azotées, avant la formation du floc et la stabilisation des populations microbiennes dans le milieu. Toutefois, il est possible de raccourcir cette phase par l'inoculation d'une eau riche en biofloc provenant d'autres bassins d'élevage en système BFT.

Le ratio C/N dans le milieu d'élevage est un facteur crucial pour le développement et le fonctionnement du système BFT. L'augmentation du ratio C/N se traduit par la transition d'un système BFT dominé par les bactéries nitrifiantes vers un système dominé par les bactéries hétérotrophes, avec des influences importantes sur l'évolution des paramètres du milieu. Les résultats de cette étude indiquent la faisabilité de réduire le ratio C/N à des niveaux compris entre 12 et 14 tout en maintenant les concentrations des paramètres du milieu dans les limites acceptables pour l'élevage du tilapia. Cette réduction du rapport C/N n'a pas entraîné d'effets néfastes sur les performances de croissance et l'efficacité alimentaire du tilapia. De plus, l'utilisation de faibles ratios C/N permet de réduire la quantité de mélasse requise, ce qui se traduit par une diminution des coûts de production.

Dans l'ensemble, notre étude a révélé que l'élevage du tilapia en système BFT n'a pas entraîné d'effets néfastes sur les performances zootechniques et physiologiques évaluées. Cependant, contrairement à nos attentes, nous n'avons pas observé d'amélioration significative des

rendements de production par rapport aux systèmes d'élevage en circuit ouvert ou en système de recirculation d'eau pour les stades juvéniles et adultes du tilapia. Par ailleurs, le système BFT a démontré une amélioration des performances zootechniques lorsqu'il était utilisé pour les premiers stades de développement du tilapia, probablement en raison de la disponibilité d'aliments naturels en continu dans le milieu biofloc. De plus, la stimulation de l'activité des enzymes digestives et du système antioxydant chez les post-larves représente un indicateur de l'influence des microorganismes présents dans le biofloc sur les paramètres physiologiques des poissons, pouvant potentiellement améliorer la digestion et renforcer la résistance aux pathologies.

En outre, les résultats suggèrent que le système BFT pourrait être utilisé avec succès dans les écloséries de tilapia pour le stockage et la reproduction des géniteurs, sans aucun effet négatif sur les performances de reproduction ou la qualité des progénitures. Toutefois, en tenant compte de nos résultats révélant une fécondité relativement faible du tilapia, il est recommandé de mettre l'accent sur les aspects liés à la qualité génétique des reproducteurs afin d'améliorer les rendements de production dans les fermes aquacoles en Algérie. Cette approche implique la surveillance des performances des différentes souches de tilapia utilisées dans les fermes aquacoles et la constitution du stocks de reproducteurs en tenant en compte les risques de consanguinité.

Il est important de souligner que, malgré l'absence d'amélioration significative des rendements de production en phase de grossissement du tilapia, l'élevage en système BFT offre certains avantages potentiels qui justifient son application dans les fermes aquacoles en Algérie, tels que la faible consommation d'eau, ainsi que l'amélioration des conditions de biosécurité.

Plusieurs sujets de recherche pourraient être développés pour approfondir les connaissances sur la technologie BFT, notamment sur la qualité nutritionnelle du biofloc, la diversification des sources de carbone utilisés, l'application de ce système à d'autres espèces à intérêt aquacole, les effets sur la qualité organoleptiques du produit, la valorisation du floc dans l'alimentation des poissons, l'intégration de l'approche d'aquaculture multi-trophique intégrée (IMTA) en système BFT, etc. En outre, le développement des dispositifs pour la gestion des matières en suspension dans les bassins BFT représente un élément clé pour l'application de cette technologie à l'échelle de production commerciale.

La faisabilité de l'application du système BFT dans l'élevage du tilapia en Algérie peut être davantage évaluée en réalisant des essais d'élevage à plus grande échelle. Ces essais pourraient

être menés dans des bassins de volumes plus importants, ou dans des étangs de taille significative. Il est essentiel que les biomasses de poissons utilisées dans ces essais soient comparables à celles des unités de production réelles, afin d'obtenir des résultats plus représentatifs. Les fermes pilotes ou les stations expérimentales de recherche pourraient jouer un rôle essentiel en fournissant un soutien technique dans le développement de cette nouvelle technologie.

Les faibles besoins en eau représentent un atout majeur pour le développement de la technologie BFT en Algérie, où les ressources hydriques sont limitées et leur exploitation nécessite une gestion rationnelle et responsable.

L'évaluation de la faisabilité économique de l'application du système BFT dans les projets d'élevage du tilapia en Algérie revêt une importance cruciale pour la prise de décision concernant l'adoption et la mise en œuvre à grande échelle de ce système dans le pays.

Références bibliographiques

- Abakari, G., Luo, G., & Kombat, E. O.** (2021a). Dynamics of nitrogenous compounds and their control in biofloc technology (BFT) systems: A review. *Aquaculture and Fisheries*, 6(5), 441-447.
- Abakari, G., Luo, G., Kombat, E. O., & Alhassan, E. H.** (2021b). Supplemental carbon sources applied in biofloc technology aquaculture systems: types, effects and future research. *Reviews in Aquaculture*, 13(3), 1193-1222.
- Adineh, H., Naderi, M., Hamidi, M. K., & Harsij, M.** (2019). Biofloc technology improves growth, innate immune responses, oxidative status, and resistance to acute stress in common carp (*Cyprinus carpio*) under high stocking density. *Fish Shellfish Immunol*, 95, 440-448.
- Aebi, H.** (1984). [13] Catalase in vitro. In *Methods in Enzymology* (Vol. 105, pp. 121-126). Academic Press. [https://doi.org/10.1016/S0076-6879\(84\)05016-3](https://doi.org/10.1016/S0076-6879(84)05016-3)
- Ahmad, I., Rani, A. B., Verma, A., & Maqsood, M.** (2017). Biofloc technology: an emerging avenue in aquatic animal healthcare and nutrition. *Aquaculture International*, 25(3), 1215-1226. <https://doi.org/10.1007/s10499-016-0108-8>
- Alayse, J. P.** (1981). Mise au point d'un circuit ferme en vue de permettre l'experimentation sur des larves et des juveniles de poissons marins. Suivi biologique et chimique de l'evolution du milieu. *Aquaculture*, 23(1), 219-230. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0044-8486\(81\)90016-8](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0044-8486(81)90016-8)
- Allameh, S., Noaman, V., & Nahavandi, R.** (2017). Effects of probiotic bacteria on fish performance. *Advanced Techniques in Clinical Microbiology*, 1(2), 11.
- Alvarenga, R. É., de Sales, S. C. M., de Brito, S. T., Santos, C. R., Corrêa, R. D. S., de Oliveira Alves, G. F., Manduca, L. G., & Turra, E. M.** (2017). Effects of biofloc technology on reproduction and ovarian recrudescence in Nile tilapia. *Aquaculture Research*, 48(12), 5965-5972. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/are.13420>
- Amoussou, T. O., Toguyeni, A., Toko, I. I., Chikou, A., & Karim, I. Y. A.** (2016). Caractéristiques biologiques et zootechniques des tilapias africains *Oreochromis niloticus* (Linnaeus, 1758) et *Sarotherodon melanotheron* Rüppell, 1852: une revue. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 10(4), 1869-1887.
- Anand, P. S. S., Kohli, M. P. S., Kumar, S., Sundaray, J. K., Roy, S. D., Venkateshwarlu, G., Sinha, A., & Pailan, G. H.** (2014). Effect of dietary supplementation of biofloc on growth performance and digestive enzyme activities in *Penaeus monodon*. *Aquaculture*, 418-419, 108-115. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2013.09.051>
- Anasori, N., Farahnak, A., Golmohamadi, T., Eshraghian, M., & Molaei Rad, M.** (2015). Comparative assay of protease enzyme activity in protoscolices (Hydatid cyst) and liver tissues. *Archives of Advances in Biosciences*, 6(1). <https://doi.org/10.22037/jps.v6i1.8116>
- Ardjosoediro, I., & Ramnarine, I. W.** (2002). The influence of turbidity on growth, feed conversion and survivorship of the Jamaica red tilapia strain. *Aquaculture*, 212(1), 159-165. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0044-8486\(01\)00881-X](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0044-8486(01)00881-X)
- Avnimelech, Y.** (1999). Carbon/nitrogen ratio as a control element in aquaculture systems. *Aquaculture*, 176(3), 227-235. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0044-8486\(99\)00085-X](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0044-8486(99)00085-X)
- Avnimelech, Y.** (2007). Feeding with microbial flocs by tilapia in minimal discharge bio-flocs technology ponds. *Aquaculture*, 264(1), 140-147. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2006.11.025>

- Avnimelech, Y.** (2011). Tilapia production using biofloc technology, saving water, waste recycling improves economics. *Global aquaculture Advocate*, 2011, 66-68.
- Avnimelech, Y.** (2012). *Biofloc technology : a practical guide book* (2nd ed.). Baton rouge: World aquaculture society.
- Avnimelech, Y., & Kochba, M.** (2009). Evaluation of nitrogen uptake and excretion by tilapia in biofloc tanks, using 15N tracing. *Aquaculture*, 287(1), 163-168.
<https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2008.10.009>
- Azim, M. E., & Little, D. C.** (2008). The biofloc technology (BFT) in indoor tanks: Water quality, biofloc composition, and growth and welfare of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*). *Aquaculture*, 283(1), 29-35. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2008.06.036>
- Bakhshi, F., H Najdegerami, E., Manaffar, R., Tokmechi, A., Rahmani Farah, K., & Shalizer Jalali, A.** (2018). Growth performance, haematology, antioxidant status, immune response and histology of common carp (*Cyprinus carpio L.*) fed biofloc grown on different carbon sources. *Aquaculture Research*, 49(1), 393-403. <https://doi.org/10.1111/are.13469>
- Bañuelos-Vargas, I., Rodríguez-Montes de Oca, G. A., Martínez-Montaño, E., Pérez-Jiménez, A., Mendoza-Gamboa, O. A., Estrada-Godínez, J. A., & Hernández, C.** (2021). Antioxidant and immune response of juvenile red tilapia (*Oreochromis sp*) cultured at different densities in sea water with biofloc plus probiotics. *Aquaculture*, 544, 737112.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2021.737112>
- Baroiller, J.-F., D'Cotta, H., Bezault, E., Wessels, S., & Hoerstgen-Schwark, G.** (2009). Tilapia sex determination: where temperature and genetics meet. *Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Molecular & Integrative Physiology*, 153(1), 30-38.
- Becerril-Cortés, D., Monroy-Dosta, M. D. C., Coelho-Emerenciano, M. G., Castro-Mejía, G., Cienfuegos-Martínez, K., & Lara-Andrade, D.** (2017). Nutritional importance for aquaculture and ecological function of microorganisms that make up Biofloc, a review. *Int. J. of Aquatic Science*, 8(2), 69-77.
- Bernfeld, P.** (1955). [17] Amylases, and . In *Methods in Enzymology* (Vol. 1, pp. 149-158). Academic Press. [https://doi.org/10.1016/0076-6879\(55\)01021-5](https://doi.org/10.1016/0076-6879(55)01021-5)
- Bezault, E.** (1999). *Etude de la conservation de locus microsattellites chez les Tilapias et application à l'analyse de la ségrégation méiotique chez des hybrides inter-génériques (O. niloticus x S. melanotheron)*[DES, Université Pierre et Marie Curie]. <https://agritrop.cirad.fr/593819/1/ID593819.pdf>.
- Bhatnagar, A., & Devi, P.** (2013). Water quality guidelines for the management of pond fish culture. *International journal of environmental sciences*, 3(6).
- Bhujel, R. C.** (2000). A review of strategies for the management of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) broodfish in seed production systems, especially hapa-based systems. *Aquaculture*, 181(1), 37-59.
[https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0044-8486\(99\)00217-3](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0044-8486(99)00217-3)
- Bhujel, R. C.** (2011). How to produce billions of high quality tilapia fry. *BETTER SCIENCE, BETTER FISH, BETTER LIFE*, 144.
- Bhujel, R. C.** (2013). On-farm feed management practices for Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) in Thailand. *On-farm feeding and feed management in aquaculture*, 583, 159-189.

- Bhujel, R. C.** (2014). *A manual for tilapia business management*. CABI Pub.
- Biller-Takahashi, J. D., Takahashi, L. S., Mingatto, F. E., & Urbinati, E. C.** (2015). The immune system is limited by oxidative stress: Dietary selenium promotes optimal antioxidative status and greatest immune defense in pacu *Piaractus mesopotamicus*. *Fish Shellfish Immunol*, 47(1), 360-367. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.fsi.2015.09.022>
- Birnie-Gauvin, K., Costantini, D., Cooke, S. J., & Willmore, W. G.** (2017). A comparative and evolutionary approach to oxidative stress in fish: A review. *Fish and Fisheries*, 18(5), 928-942. <https://doi.org/10.1111/faf.12215>
- Biswas, A. K., Morita, T., Yoshizaki, G., Maita, M., & Takeuchi, T.** (2005). Control of reproduction in Nile tilapia *Oreochromis niloticus* (L.) by photoperiod manipulation. *Aquaculture*, 243(1), 229-239. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2004.10.008>
- Borlongan, I. G., Coloso, R. M., & Golez, N. V.** (2002). Feeding habits and digestive physiology of fishes. In *Nutrition in Tropical Aquaculture: Essentials of fish nutrition, feeds, and feeding of tropical aquatic species* (pp. 77-97).
- Brito, L. O., Cardoso Junior, L. d. O., Lavander, H. D., Abreu, J. L. d., Severi, W., & Gálvez, A. O.** (2018). Bioremediation of shrimp biofloc wastewater using clam, seaweed and fish. *Chemistry and Ecology*, 34(10), 901-913. <https://doi.org/10.1080/02757540.2018.1520843>
- Burford, M. A., Thompson, P. J., McIntosh, R. P., Bauman, R. H., & Pearson, D. C.** (2004). The contribution of flocculated material to shrimp (*Litopenaeus vannamei*) nutrition in a high-intensity, zero-exchange system. *Aquaculture*, 232(1), 525-537. [https://doi.org/10.1016/S0044-8486\(03\)00541-6](https://doi.org/10.1016/S0044-8486(03)00541-6)
- Campos-Mendoza, A., McAndrew, B. J., Coward, K., & Bromage, N.** (2004). Reproductive response of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) to photoperiodic manipulation; effects on spawning periodicity, fecundity and egg size. *Aquaculture*, 231(1), 299-314. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2003.10.023>
- Cardona, E.** (2015). *Influence de l'environnement trophique de l'élevage en biofloc sur les performances physiologiques de la crevette Litopenaeus stylirostris: Étude de paramètres de la nutrition, de l'immunité et de la reproduction* [These de doctorat, Université de Nouvelle Calédonie]. <https://hal-unc.archives-ouvertes.fr/tel-02942509/document>
- Cardona, E., Lorgeoux, B., Chim, L., Goguenheim, J., Le Delliou, H., & Cahu, C.** (2016). Biofloc contribution to antioxidant defence status, lipid nutrition and reproductive performance of broodstock of the shrimp *Litopenaeus stylirostris*: Consequences for the quality of eggs and larvae. *Aquaculture*, 452, 252-262. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2015.08.003>
- Carnevali, O., Sun, Y.-Z., Merrifield, D. L., Zhou, Z., & Picchiatti, S.** (2014). Probiotic Applications in Temperate and Warm Water Fish Species. In *Aquaculture Nutrition* (pp. 253-289). <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/9781118897263.ch10>
- Castro-Nieto, L., Castro-Barrera, T., De Lara-Andrade, R., Castro-Mejía, J., & Castro-Mejía, G.** (2012). Biofloc systems: a technological breakthrough in aquaculture. *El Hombre y su Ambiente*, 1(1), 1-5.
- Castro-Mejía, G., De Lara, A., Monroy-Dosta, M., Maya-Gutierrez, S., Castro-Mejia, J., & Jiménez-Pacheco, F.** (2017). Presence and abundance of phytoplankton and zooplankton in a Biofloc production system using two carbon sources: 1) Molasses and 2) Molasses+ rice powder, culturing *Oreochromis niloticus*. *Digital Journal of El Hombre y su Ambiente.*, 1(13), 33-42.

Cavalcante, D. d. H., Lima, F. R. d. S., Rebouças, V. T., & Sá, M. V. d. C. (2017). Nile tilapia culture under feeding restriction in bioflocs and bioflocs plus periphyton tanks. *Acta Scientiarum. Animal Sciences*, 39, 223-228. <https://doi.org/10.4025/actascianimsci.v39i3.33574>

Cavalcanti Nery, R., Costa, C. B., Rodrigues, F., Soares, R., Bezerra, R. d. S., & Peixoto, S. (2019). Effect of feeding frequency on growth and digestive enzyme activity in *Litopenaeus vannamei* during the grow-out phase in biofloc system. *Aquaculture Nutrition*, 25(3), 577-584. <https://doi.org/10.1111/anu.12880>

Chakrabarti, I., Gani, M. A., Chaki, K. K., Sur, R., & Misra, K. K. (1995). Digestive enzymes in 11 freshwater teleost fish species in relation to food habit and niche segregation. *Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Physiology*, 112(1), 167-177. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0300-9629\(95\)00072-F](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0300-9629(95)00072-F)

Chakrapani, S., Panigrahi, A., Sundaresan, J., Sivakumar, M. R., Palanisamy, R., & Kumar, V. (2021). Three different C: N ratios for Pacific white shrimp, *Penaeus vannamei* under practical conditions: Evaluation of growth performance, immune and metabolic pathways. *Aquaculture Research*, 52(3), 1255-1266. <https://doi.org/10.1111/are.14984>

Choo, H. X., & Caipang, C. M. A. (2015). Biofloc technology (BFT) and its application towards improved production in freshwater tilapia culture. *Aquaculture, Aquarium, Conservation & Legislation*, 8(3), 362-366.

Chowdhury, S., & Saikia, S. (2020). Oxidative stress in fish: a review. *Journal of Scientific Research*, 12(1), 145-160.

Correa, A. d. S., Pinho, S. M., Molinari, D., Pereira, K. d. R., Gutiérrez, S. M., Monroy-Dosta, M. d. C., & Emerenciano, M. G. C. (2020). Rearing of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) juveniles in a biofloc system employing periods of feed deprivation. *Journal of Applied Aquaculture*, 32(2), 139-156. <https://doi.org/10.1080/10454438.2019.1679319>

Coward, K., & Bromage, N. R. (1999). Spawning periodicity, fecundity and egg size in laboratory-held stocks of a substrate-spawning tilapiine, *Tilapia zillii* (Gervais). *Aquaculture*, 171(3), 251-267. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0044-8486\(98\)00498-0](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0044-8486(98)00498-0)

Crab, R., Defoirdt, T., Bossier, P., & Verstraete, W. (2012). Biofloc technology in aquaculture: beneficial effects and future challenges. *Aquaculture*, 356, 351-356.

Creative Enzymes. Determination of Activity for Superoxide Dismutase (SOD) [En ligne] https://www.creativeenzymes.com/pdf/Protocol%20CE_Superoxide%20Dismutase%20EC%201.15.1.1.pdf

Cruz, E. M., & James, C. M. (1989). The effects of feeding rotifers (*Brachionus plicatilis typicus*) on the yield and growth of tilapia (*Oreochromis spilurus*) fry. *Aquaculture*, 77(4), 353-361. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0044-8486\(89\)90219-6](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0044-8486(89)90219-6)

Cupp-Enyard, C. (2008). Sigma's non-specific protease activity assay-casein as a substrate. *Journal of Visualized Experiments* (19), e899.

Dambo, W. B., & Rana, K. J. (1993). Effect of stocking density on growth and survival of *Oreochromis niloticus* (L.) fry in the hatchery. *Aquaculture Research*, 24(1), 71-80. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/j.1365-2109.1993.tb00829.x>

- Dauda, A. B.** (2020). Biofloc technology: a review on the microbial interactions, operational parameters and implications to disease and health management of cultured aquatic animals. *Reviews in Aquaculture*, 12(2), 1193-1210. <https://doi.org/10.1111/raq.12379>
- Dawood, M. A., Shukry, M., Zayed, M. M., Omar, A. A., Zaineldin, A. I., & El Basuini, M. F.** (2019). Digestive enzymes, immunity and oxidative status of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) reared in intensive conditions. *Slovenian Veterinary Research*, 56(22), 99-108. <https://doi.org/10.26873/SVR-747-2019>
- Dawood, M. A. O., Eweedah, N. M., Moustafa, E. M., & Farahat, E. M.** (2020). Probiotic effects of *Aspergillus oryzae* on the oxidative status, heat shock protein, and immune related gene expression of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) under hypoxia challenge. *Aquaculture*, 520, 734669. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2019.734669>
- de Oliveira, M. M., Ribeiro, T., Orlando, T. M., de Oliveira, D. G. S., Drumond, M. M., de Freitas, R. T. F., & Rosa, P. V.** (2014). Effects crude protein levels on female Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) reproductive performance parameters. *Animal Reproduction Science*, 150(1), 62-69. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.anireprosci.2014.08.006>
- Defoirdt, T., Sorgeloos, P., & Bossier, P.** (2011). Alternatives to antibiotics for the control of bacterial disease in aquaculture. *Current Opinion in Microbiology*, 14(3), 251-258. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.mib.2011.03.004>
- DeLong, D. P., Losordo, T., & Rakocy, J.** (2009). Tank culture of tilapia. *SRAC Publication*. No. 282.
- Deng, M., Dai, Z., Senbati, Y., Li, L., Song, K., & He, X.** (2020). Aerobic denitrification microbial community and function in zero-discharge recirculating aquaculture system using a single biofloc-based suspended growth reactor: Influence of the carbon-to-nitrogen ratio. *Frontiers in microbiology*, 11, 1760.
- Deng, Y., Kokou, F., Eding, E. H., & Verdegem, M. C.** (2021). Impact of early-life rearing history on gut microbiome succession and performance of Nile tilapia. *Animal microbiome*, 3(1), 1-17.
- Dubois, M., Gilles, K., Hamilton, J., Roberts, P., & Smith, F.** (1956). Phenol sulphuric acid method for carbohydrate determination. *Ann Chem*, 28(3), 350-359.
- Duy, N. T., & Van Khanh, L.** (2018). Effect of molasses addition at different C: N ratios on growth and survival rate of spotted scat (*Scatophagus argus*) fingerling in biofloc system. *International Journal of Scientific and Research Publications*, 8(5), 452-459. <https://doi.org/10.29322/IJSRP.8.5.2018.p7759>
- Ebeling, J. M., Timmons, M. B., & Bisogni, J. J.** (2006). Engineering analysis of the stoichiometry of photoautotrophic, autotrophic, and heterotrophic removal of ammonia–nitrogen in aquaculture systems. *Aquaculture*, 257(1), 346-358. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2006.03.019>
- Edwards, P.** (2015). Aquaculture environment interactions: Past, present and likely future trends. *Aquaculture*, 447, 2-14. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2015.02.001>
- Ekasari, J., Rivandi, D. R., Firdausi, A. P., Surawidjaja, E. H., Zairin, M., Bossier, P., & De Schryver, P.** (2015). Biofloc technology positively affects Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) larvae performance. *Aquaculture*, 441, 72-77. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2015.02.019>

- Ekasari, J., Suprayudi, M. A., Wiyoto, W., Hazanah, R. F., Lenggara, G. S., Sulistiani, R., . . . Zairin, M.** (2016). Biofloc technology application in African catfish fingerling production: The effects on the reproductive performance of broodstock and the quality of eggs and larvae. *Aquaculture*, 464, 349-356. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2016.07.013>
- Ekasari, J., Zairin Jr, M., Putri, D. U., Sari, N. P., Surawidjaja, E. H., & Bossier, P.** (2013). Biofloc-based reproductive performance of Nile tilapia *Oreochromis niloticus* L. broodstock. *Aquaculture Research*, 46(2), 509-512. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/are.12185>
- El-Hack, A., Mohamed, E., El-Saadony, M. T., Nader, M. M., Salem, H. M., El-Tahan, A. M., . . . Khafaga, A. F.** (2022). Effect of environmental factors on growth performance of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*). *International Journal of Biometeorology*, 1-12.
- El-Sayed, A.-F. M.** (2006). *Tilapia culture*. CABI Publishing, Wallingford, UK, 277 pp
- El-Sayed, A.-F. M.** (2021). Use of biofloc technology in shrimp aquaculture: a comprehensive review, with emphasis on the last decade [<https://doi.org/10.1111/raq.12494>]. *Reviews in Aquaculture*, 13(1), 676-705. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/raq.12494>
- El-Sayed, A.-F. M., Mansour, C. R., & Ezzat, A. A.** (2003). Effects of dietary protein level on spawning performance of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) broodstock reared at different water salinities. *Aquaculture*, 220(1), 619-632. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0044-8486\(02\)00221-1](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0044-8486(02)00221-1)
- El-Sayed, A.-F. M., Mansour, C. R., & Ezzat, A. A.** (2005). Effects of dietary lipid source on spawning performance of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) broodstock reared at different water salinities. *Aquaculture*, 248(1), 187-196. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2005.04.024>
- Elhetawy, A. I., El-Dahhar, A. A., Elebiary, E. H., Abo El-Wafa, M. A., Lotfy, A. M., & Emelianova, N.** (2021). Effect of biofloc system at different salinities and crude protein levels on water quality, growth performance, and survival rate of flathead grey mullet (*Mugil cephalus*). *Egyptian Journal for Aquaculture*, 41-67.
- Emerenciano, M., Ballester, E. L. C., Cavalli, R. O., & Wasielesky, W.** (2011). Effect of biofloc technology (BFT) on the early postlarval stage of pink shrimp *Farfantepenaeus paulensis*: growth performance, floc composition and salinity stress tolerance. *Aquaculture International*, 19(5), 891-901. <https://doi.org/10.1007/s10499-010-9408-6>
- Emerenciano, M., Cuzon, G., Arévalo, M., & Gaxiola, G.** (2014). Biofloc technology in intensive broodstock farming of the pink shrimp *Farfantepenaeus duorarum*: spawning performance, biochemical composition and fatty acid profile of eggs. *Aquaculture Research*, 45(10), 1713-1726. <https://doi.org/10.1111/are.12117>
- Emerenciano, M., Gaxiola, G., & Cuzon, G.** (2013). Biofloc Technology (BFT): A Review for Aquaculture Application and Animal Food Industry. In *Biomass Now - Cultivation and Utilization* (pp. 301-328). IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/53902>
- Emerenciano, M., Martínez-Cordova, L. R., Martínez-Porchas, M., & Miranda-Baeza, A.** (2017). Biofloc Technology (BFT): A Tool for Water Quality Management in Aquaculture. In H. Tutu (Ed.), *Water Quality* (pp. 91-109). IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/66416>
- FAO.** (2022). *La situation mondiale des pêches et de l'aquaculture 2022*. <https://www.fao.org/documents/card/fr/c/cc0461fr/>

- Ferdous, Z., Masum, M. A., & Ali, M. M.** (2014). Influence of stocking density on growth performance and survival of monosex tilapia (*Oreochromis niloticus*) fry. *International Journal of Research in Fisheries and Aquaculture*, 4(2), 99-103.
- Ferreira, G. S., Bolívar, N. C., Pereira, S. A., Guertler, C., Vieira, F. d. N., Mourinho, J. L. P., & Seiffert, W. Q.** (2015). Microbial biofloc as source of probiotic bacteria for the culture of *Litopenaeus vannamei*. *Aquaculture*, 448, 273-279. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2015.06.006>
- Fessehaye, Y., Bovenhuis, H., Rezk, M. A., Crooijmans, R., van Arendonk, J. A. M., & Komen, H.** (2009). Effects of relatedness and inbreeding on reproductive success of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*). *Aquaculture*, 294(3), 180-186. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2009.06.001>
- Fitzsimmons, K., & Watanabe, W. O.** (2010). Tilapia (Family: Cichlidae). *Finfish aquaculture diversification*, 374-396.
- Fleckenstein, L. J., Tierney, T. W., & Ray, A. J.** (2018). Comparing biofloc, clear-water, and hybrid recirculating nursery systems (Part II): Tilapia (*Oreochromis niloticus*) production and water quality dynamics. *Aquacultural Engineering*, 82, 80-85. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2018.06.006>
- Fuentes-Silva, C., Soto-Zarazúa, G. M., Torres-Pacheco, I., & Flores-Rangel, A.** (2013). Male tilapia production techniques: A mini-review. *African journal of Biotechnology*, 12(36).
- Fujimura, K., & Okada, N.** (2007). Development of the embryo, larva and early juvenile of Nile tilapia *Oreochromis niloticus* (Pisces: Cichlidae). Developmental staging system. *Development, Growth & Differentiation*, 49(4), 301-324. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/j.1440-169X.2007.00926.x>
- Gallardo-Collí, A., Pérez-Rostro, C. I., & Hernández-Vergara, M. P.** (2019). Reuse of water from biofloc technology for intensive culture of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*): effects on productive performance, organosomatic indices and body composition. *International Aquatic Research*, 11(1), 43-55.
- Gammanpila, M., Yakupitiyage, A., & Bart, A.** (2007). Evaluation of the effect of dietary vitamin C, E and Zinc supplementation on the reproductive performance of Nile Tilapia (*O. niloticus*). *Sri Lanka Journal of Aquatic Sciences*, 12, 39-60. <https://doi.org/10.4038/sljas.v12i0.2213>
- Gaona, C., Poersch, L., Krummenauer, D., Foes, G., & Wasielesky, W. J.** (2011). The effect of solids removal on water quality, growth and survival of *Litopenaeus vannamei* in a biofloc technology culture system. *International Journal of Recirculating Aquaculture*, 12, 54-73.
- García-Ríos, L., Miranda-Baeza, A., Coelho-Emerenciano, M. G., Huerta-Rábago, J. A., & Osuna-Amarillas, P.** (2019). Biofloc technology (BFT) applied to tilapia fingerlings production using different carbon sources: Emphasis on commercial applications. *Aquaculture*, 502, 26-31. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2018.11.057>
- Garcia, F., Romera, D. M., Gozi, K. S., Onaka, E. M., Fonseca, F. S., Schalch, S. H. C., Candeira, P.G., Guerra, L.O.M., Carmo, F.G., Carneiro, D.J., Martins, M.I.E.J., Portella, M. C.** (2013). Stocking density of Nile tilapia in cages placed in a hydroelectric reservoir. *Aquaculture*, 410-411, 51-56. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2013.06.010>

- Gennotte, V.** (2014). *Biologie de la reproduction et analyse du déterminisme et de la différenciation du sexe à des stades précoces chez le tilapia du Nil, Oreochromis niloticus*. [Thèse de doctorat, Université de Liège]. <file:///C:/Users/MON/Downloads/Th%C3%A8se%20VGennotte.pdf>
- Getachew, T., & Fernando, C. H.** (1989). The food habits of an herbivorous fish (*Oreochromis niloticus* Linn.) in Lake Awasa, Ethiopia. *Hydrobiologia*, 174(3), 195-200. <https://doi.org/10.1007/BF00008157>
- Giatsis, C., Sipkema, D., Smidt, H., Heilig, H., Benvenuti, G., Verreth, J., & Verdegem, M.** (2015). The impact of rearing environment on the development of gut microbiota in tilapia larvae. *Scientific reports*, 5(1), 1-15.
- Gomes, L. C., Baldisserotto, B., & Senhorini, J. A.** (2000). Effect of stocking density on water quality, survival, and growth of larvae of the matrinxã, *Brycon cephalus* (Characidae), in ponds. *Aquaculture*, 183(1), 73-81. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0044-8486\(99\)00288-4](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0044-8486(99)00288-4)
- Gomes Vilani, F., Schweitzer, R., da Fonseca Arantes, R., do Nascimento Vieira, F., Manoel do Espírito Santo, C., & Quadros Seiffert, W.** (2016). Strategies for water preparation in a biofloc system: Effects of carbon source and fertilization dose on water quality and shrimp performance. *Aquacultural Engineering*, 74, 70-75. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2016.06.002>
- Granada, L., Sousa, N., Lopes, S., & Lemos, M. F. L.** (2016). Is integrated multitrophic aquaculture the solution to the sectors' major challenges? – a review. *Reviews in Aquaculture*, 8(3), 283-300. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/raq.12093>
- Guillaume, J., Bergot, P., Kaushik, S., & Métailler, R.** (1999). *Nutrition et alimentation des poissons et crustacés*. INRA Editions, Paris, 480 pp.
- Gunasekera, R. M., Shim, K. F., & Lam, T. J.** (1996). Influence of protein content of broodstock diets on larval quality and performance in Nile tilapia, *Oreochromis niloticus* (L.). *Aquaculture*, 146(3), 245-259. [https://doi.org/10.1016/S0044-8486\(96\)01380-4](https://doi.org/10.1016/S0044-8486(96)01380-4)
- Haidar, M. N., Bleeker, S., Heinsbroek, L. T. N., & Schrama, J. W.** (2018). Effect of constant digestible protein intake and varying digestible energy levels on energy and protein utilization in Nile tilapia. *Aquaculture*, 489, 28-35. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2017.12.035>
- Haidar, M. N., Petie, M., Heinsbroek, L. T., Verreth, J. A., & Schrama, J. W.** (2016). The effect of type of carbohydrate (starch vs. nonstarch polysaccharides) on nutrients digestibility, energy retention and maintenance requirements in Nile tilapia. *Aquaculture*, 463, 241-247.
- Haleng, J., Pincemail, J., Defraigne, J.-O., Charlier, C., & Chapelle, J.-P.** (2007). Le stress oxydant. *Revue médicale de Liège*, 62(10).
- Han, C. Y., Zheng, Q. M., & Feng, L. N.** (2013). Effects of total replacement of dietary fish oil on growth performance and fatty acid compositions of hybrid tilapia (*Oreochromis niloticus* × *O. aureus*). *Aquaculture International*, 21(6), 1209-1217. <https://doi.org/10.1007/s10499-013-9624-y>
- Haraz, Y. G., El-Hawarry, W. N., & Shourbela, R. M.** (2018). Culture Performance of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) raised in a bioflocbased intensive system. *Alexandria Journal for Veterinary Sciences*, 58(1). <https://doi.org/10.5455/ajvs.299795>
- Hardy, R. W.** (2010). Utilization of plant proteins in fish diets: effects of global demand and supplies of fishmeal. *Aquaculture Research*, 41(5), 770-776.

- Hargreaves, J. A.** (2006). Photosynthetic suspended-growth systems in aquaculture. *Aquacultural Engineering*, 34(3), 344-363. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2005.08.009>
- Hargreaves, J. A.** (2013). Biofloc production systems for aquaculture. *SRAC Publication*, 4503.
- Haridas, H., Verma, A. K., Rathore, G., Prakash, C., Sawant, P. B., & Babitha Rani, A. M.** (2017). Enhanced growth and immuno-physiological response of Genetically Improved Farmed Tilapia in indoor biofloc units at different stocking densities. *Aquaculture Research*, 48(8), 4346-4355. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/are.13256>
- Harun, A. A. C., Mohammad, N. A. H., Ikhwanuddin, M., Jauhari, I., Sohaili, J., & Kasan, N. A.** (2019). Effect of different aeration units, nitrogen types and inoculum on biofloc formation for improvement of Pacific Whiteleg shrimp production. *The Egyptian Journal of Aquatic Research*, 45(3), 287-292.
- Hidalgo, M. C., Urea, E., & Sanz, A.** (1999). Comparative study of digestive enzymes in fish with different nutritional habits. Proteolytic and amylase activities. *Aquaculture*, 170(3), 267-283. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0044-8486\(98\)00413-X](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0044-8486(98)00413-X)
- Hisano, H., Barbosa, P. T., Hayd, L. A., & Mattioli, C. C.** (2019). Evaluation of Nile tilapia in monoculture and polyculture with giant freshwater prawn in biofloc technology system and in recirculation aquaculture system. *International Aquatic Research*, 11(4), 335-346. <https://doi.org/10.1007/s40071-019-00242-2>
- Hoseinifar, S. H., Yousefi, S., Van Doan, H., Ashouri, G., Gioacchini, G., Maradonna, F., & Carnevali, O.** (2021). Oxidative Stress and Antioxidant Defense in Fish: The Implications of Probiotic, Prebiotic, and Synbiotics. *Reviews in Fisheries Science & Aquaculture*, 29(2), 198-217. <https://doi.org/10.1080/23308249.2020.1795616>
- Huang, H.-H.** (2020). Novel biofloc technology (BFT) for ammonia assimilation and reuse in aquaculture in situ. *Emerging technologies and research for eco-friendly aquaculture*, 3-22.
- Huang, W. B., & Chiu, T. S.** (1997). Effects of stocking density on survival, growth, size variation, and production of Tilapia fry. *Aquaculture Research*, 28(3), 165-173. <https://doi.org/https://doi.org/10.1046/j.1365-2109.1997.t01-1-00843.x>
- Ighodaro, O., & Akinloye, O.** (2018). First line defence antioxidants-superoxide dismutase (SOD), catalase (CAT) and glutathione peroxidase (GPX): Their fundamental role in the entire antioxidant defence grid. *Alexandria journal of medicine*, 54(4), 287-293. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ajme.2017.09.001>
- Ighwela, K. A., Ahmed, A. B., & Abol-Munafi, A.** (2011). Condition factor as an indicator of growth and feeding intensity of Nile tilapia fingerlings (*Oreochromis niloticus*) feed on different levels of maltose. *American-Eurasian Journal of Agricultural and Environmental Science*, 11(4), 559-563.
- Islam, M., Hassan, M., Begum, M., Punom, N., Begum, M., Sultana, N., & Rahman, M.** (2017). Effects of feeding zooplankton, *Moina macrocopa* (Straus, 1820) on the growth of Nile tilapia *Oreochromis niloticus* L. *Bangladesh Journal of Scientific and Industrial Research*, 52(2), 81-88. <https://doi.org/10.3329/bjsir.v52i2.32910>
- Jiang, J., Feng, L., Tang, L., Liu, Y., Jiang, W., & Zhou, X.** (2015). Growth rate, body composition, digestive enzymes and transaminase activities, and plasma ammonia concentration of different weight Jian carp (*Cyprinus carpio* var. Jian). *Animal Nutrition*, 1(4), 373-377. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.aninu.2015.12.006>

- Jiang, W., Ren, W., Li, L., Dong, S., & Tian, X.** (2020). Light and carbon sources addition alter microbial community in biofloc-based *Litopenaeus vannamei* culture systems. *Aquaculture*, 515, 734572. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2019.734572>
- Kamilya, D., Debbarma, M., Pal, P., Kheti, B., Sarkar, S., & Singh, S. T.** (2017). Biofloc technology application in indoor culture of *Labeo rohita* (Hamilton, 1822) fingerlings: The effects on inorganic nitrogen control, growth and immunity. *Chemosphere*, 182, 8-14. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.05.021>
- Kestemont, P., Micha, J., & Falter, U.** (1989). Les Méthodes de Production d'Alevins de *Tilapia nilotica*. , . ADCP/REP/89/46, FAO, Rome, 132.
- Khanjani, M. H., & Sharifinia, M.** (2020). Biofloc technology as a promising tool to improve aquaculture production. *Reviews in Aquaculture*, 12(3), 1836-1850. <https://doi.org/10.1111/raq.12412>
- Khanjani, M. H., Zahedi, S., & Mohammadi, A.** (2022). Integrated multitrophic aquaculture (IMTA) as an environmentally friendly system for sustainable aquaculture: functionality, species, and application of biofloc technology (BFT). *Environmental Science and Pollution Research*, 29(45), 67513-67531. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-22371-8>
- Kim, S.-K., Pang, Z., Seo, H.-C., Cho, Y.-R., Samocha, T., & Jang, I.-K.** (2014). Effect of bioflocs on growth and immune activity of Pacific white shrimp, *Litopenaeus vannamei* postlarvae. *Aquaculture Research*, 45(2), 362-371. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/are.12319>
- Klahan, R., Areechon, N., Yoonpundh, R., & Engkagul, A.** (2009). Characterization and activity of digestive enzymes in different sizes of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus* L.). *Agriculture and Natural Resources*, 43(1), 143-153.
- Kolkovski, S.** (2001). Digestive enzymes in fish larvae and juveniles—implications and applications to formulated diets. *Aquaculture*, 200(1), 181-201. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0044-8486\(01\)00700-1](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0044-8486(01)00700-1)
- Kovacik, A.** (2017). Oxidative stress in fish induced by environmental pollutants. *Scientific Papers Animal Science and Biotechnologies*, 50(1), 121-125.
- Krogdahl, Å., Hemre, G. I., & Mommsen, T. P.** (2005). Carbohydrates in fish nutrition: digestion and absorption in postlarval stages [<https://doi.org/10.1111/j.1365-2095.2004.00327.x>]. *Aquaculture Nutrition*, 11(2), 103-122. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/j.1365-2095.2004.00327.x>
- Kroon, F., Streten, C., & Harries, S.** (2017). A protocol for identifying suitable biomarkers to assess fish health: A systematic review. *PloS one*, 12(4), e0174762. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0174762>
- Krummenauer, D., Samocha, T., Poersch, L., Lara, G., & Wasielesky Jr, W.** (2014). The Reuse of Water on the Culture of Pacific White Shrimp, *Litopenaeus vannamei*, in BFT System. *Journal of the World Aquaculture Society*, 45(1), 3-14. <https://doi.org/10.1111/jwas.12093>
- Kubitza, F.** (2019). Advances in tilapia nutrition, part 2. *Global Seafood Alliance*. <https://www.globalseafood.org/advocate/advances-in-tilapia-nutrition-part-2/>
- Labreuche, J.** (2010). Les principaux tests statistiques de l'analyse univariée: quand et comment les utiliser?. *Sang Thrombose Vaisseaux*, 22(10), 544-553.
- Leverve, X.** (2009). Stress oxydant et antioxydants?. *Cahiers de Nutrition et de Diététique*, 44(5), 219-224.

- Lin, S., Mai, K., Tan, B., & Liu, W.** (2010). Effects of Four Vegetable Protein Supplementation on Growth, Digestive Enzyme Activities, and Liver Functions of Juvenile Tilapia, *Oreochromis niloticus* × *Oreochromis aureus*. *Journal of the World Aquaculture Society*, 41(4), 583-593. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/j.1749-7345.2010.00398.x>
- Liu, G., Zhu, S., Liu, D., & Ye, Z.** (2018). Effect of the C/N ratio on inorganic nitrogen control and the growth and physiological parameters of tilapias fingerlings, *Oreochromis niloticu* reared in biofloc systems. *Aquaculture Research*, 49(7), 2429-2439. <https://doi.org/10.1111/are.13702>
- Long, L., Yang, J., Li, Y., Guan, C., & Wu, F.** (2015). Effect of biofloc technology on growth, digestive enzyme activity, hematology, and immune response of genetically improved farmed tilapia (*Oreochromis niloticus*). *Aquaculture*, 448, 135-141. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2015.05.017>
- Lowry, O. H., Rosebrough, N. J., Farr, A. L., & Randall, R. J.** (1951). Protein measurement with the Folin phenol reagent. *J Biol Chem*, 193(1), 265-275.
- Luo, G., Gao, Q., Wang, C., Liu, W., Sun, D., Li, L., & Tan, H.** (2014). Growth, digestive activity, welfare, and partial cost-effectiveness of genetically improved farmed tilapia (*Oreochromis niloticus*) cultured in a recirculating aquaculture system and an indoor biofloc system. *Aquaculture*, 422-423, 1-7. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2013.11.023>
- Luo, G., Zhang, N., Cai, S., Tan, H., & Liu, Z.** (2017). Nitrogen dynamics, bacterial community composition and biofloc quality in biofloc-based systems cultured *Oreochromis niloticus* with poly- -hydroxybutyric and polycaprolactone as external carbohydrates. *Aquaculture*, 479, 732-741.
- Luz, R. K., Ribeiro, P. A. P., Ikeda, A. L., Santos, A. E. H., Melillo Filho, R., Turra, E. M., & Teixeira, E. d. A.** (2012). Performance and stress resistance of Nile tilapias fed different crude protein levels. *Revista Brasileira de Zootecnia*, 41, 457-461. <https://doi.org/https://doi.org/10.1590/S1516-35982012000200031>
- Maas, R. M., Verdegem, M. C., Wiegertjes, G. F., & Schrama, J. W.** (2020). Carbohydrate utilisation by tilapia: a meta-analytical approach. *Reviews in Aquaculture*, 12(3), 1851-1866.
- Mabroke, R. S., El-Husseiny, O. M., Zidan, A. E.-N. F. A., Tahoun, A.-A., & Suloma, A.** (2019). Floc meal as potential substitute for soybean meal in tilapia diets under biofloc system conditions. *Journal of Oceanology and Limnology*, 37(1), 313-320. <https://doi.org/10.1007/s00343-019-7222-1>
- Magaña-Gallegos, E., Arévalo, M., Cuzon, G., & Gaxiola, G.** (2021). Effects of using the biofloc system and eyestalk ablation on reproductive performance and egg quality of *Litopenaeus vannamei* (Boone, 1931) (Decapoda: Dendrobranchiata: Penaeidae). *Animal Reproduction Science*, 228, 106749. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.anireprosci.2021.106749>
- Mair, G., Abucay, J., Abella, T., Beardmore, J., & Skibinski, D.** (1997). Genetic manipulation of sex ratio for the large-scale production of all-male tilapia *Oreochromis niloticus*. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 54(2), 396-404.
- Malik, A., Abbas, G., Ghaffar, A., Ferrando, S., & Gallus, L.** (2018). Impact of different salinity levels on growing performance, food conversion and meat quality of red tilapia (*Oreochromis sp.*) reared in seawater tanks. *Pakistan Journal of Zoology*, 50(2).

- Manan, H., Moh, J. H. Z., Kasan, N. A., Suratman, S., & Ikhwanuddin, M.** (2017). Identification of biofloc microscopic composition as the natural bioremediation in zero water exchange of Pacific white shrimp, *Penaeus vannamei*, culture in closed hatchery system. *Applied Water Science*, 7(5), 2437-2446. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s13201-016-0421-4>
- Manduca, L. G., da Silva, M. A., Alvarenga, É. R. d., Alves, G. F. d. O., Fernandes, A. F. d. A., Assumpção, A. F., Cardoso, C.C., de Sales, S.C.M., Teixeira, E.d.A., Silva, M.d.A., Turra, E. M.** (2020). Effects of a zero exchange biofloc system on the growth performance and health of Nile tilapia at different stocking densities. *Aquaculture*, 521, 735064. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2020.735064>
- Mansour, A. T., Ashry, O. A., El-Neweshy, M. S., Alsaqufi, A. S., Dighiesh, H. S., Ashour, M., Kelany, M.S., El-Sawy, M.A., Mabrouk, M.M., Abbas, E.M., Sharawy, Z. Z.** (2022). Effect of Agricultural By-Products as a Carbon Source in a Biofloc-Based System on Growth Performance, Digestive Enzyme Activities, Hepatopancreas Histology, and Gut Bacterial Load of *Litopenaeus vannamei* Post Larvae. *Journal of Marine Science and Engineering*, 10(10).
- Mansour, A. T., & Esteban, M. Á.** (2017). Effects of carbon sources and plant protein levels in a biofloc system on growth performance, and the immune and antioxidant status of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*). *Fish Shellfish Immunol*, 64, 202-209. <https://doi.org/10.1016/j.fsi.2017.03.025>
- Manzoor, P. S., Rawat, K. D., Tiwari, V. K., Poojary, N., & Asanaru Majeedkutty, B. R.** (2020). Dietary lipid influences gonadal maturation, digestive enzymes and serum biochemical indices of *Cyprinus carpio* reared in biofloc system [https://doi.org/10.1111/are.14659]. *Aquaculture Research*, 51(8), 3244-3254. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/are.14659>
- Marklund, S., & Marklund, G.** (1974). Involvement of the Superoxide Anion Radical in the Autoxidation of Pyrogallol and a Convenient Assay for Superoxide Dismutase. *European Journal of Biochemistry*, 47(3), 469-474. <https://doi.org/10.1111/j.1432-1033.1974.tb03714.x>
- Martins, G. B., da Rosa, C. E., Tarouco, F. d. M., & Robaldo, R. B.** (2019). Growth, water quality and oxidative stress of Nile tilapia *Oreochromis niloticus* (L.) in biofloc technology system at different pH. *Aquaculture Research*, 50(4), 1030-1039. <https://doi.org/10.1111/are.13975>
- Menaga, M., Felix, S., Charulatha, M., Gopalakannan, A., & Panigrahi, A.** (2019). Effect of in-situ and ex-situ biofloc on immune response of Genetically Improved Farmed Tilapia. *Fish Shellfish Immunol*, 92, 698-705. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.fsi.2019.06.031>
- Menaga, M., & Fitzsimmons, K.** (2017). Growth of the tilapia industry in India. *World Aquaculture*, 48(3), 49-52.
- Merchie, G., Lavens, P., & Sorgeloos, P.** (1997). Optimization of dietary vitamin C in fish and crustacean larvae: a review. *Aquaculture*, 155(1), 165-181. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0044-8486\(97\)00115-4](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0044-8486(97)00115-4)
- Migaud, H., Bell, G., Cabrita, E., McAndrew, B., Davie, A., Bobe, J., Herráez, M. P., Carrillo, M.** (2013). Gamete quality and broodstock management in temperate fish. *Reviews in Aquaculture*, 5(s1), S194-S223. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/raq.12025>
- Migdal, C., & Serres, M.** (2011). Espèces réactives de l'oxygène et stress oxydant. *médecine/sciences*, 27(4), 405-412.
- Miller, D., & Semmens, K.** (2002). Waste management in aquaculture. *West Virginia University Extension Service Publication No. AQ02-1. USA*, 8.

- Minabi, K., Sourinejad, I., Alizadeh, M., Ghatrami, E. R., & Khanjani, M. H.** (2020). Effects of different carbon to nitrogen ratios in the biofloc system on water quality, growth, and body composition of common carp (*Cyprinus carpio* L.) fingerlings. *Aquaculture International*, 28, 1883-1898. <https://doi.org/10.1007/s10499-020-00564-7>
- Mirzakhani, N., Ebrahimi, E., Jalali, S. A. H., & Ekasari, J.** (2019). Growth performance, intestinal morphology and nonspecific immunity response of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) fry cultured in biofloc systems with different carbon sources and input C:N ratios. *Aquaculture*, 512, 734235. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2019.734235>
- Mjoun, K., Rosentrater, K., & Brown, M. L.** (2010). Tilapia: environmental biology and nutritional requirements. In *Fact Sheets*. South Dakota State University, pp.164.
- Mohammadi, G., Rafiee, G., Tavabe, K. R., Abdel-Latif, H. M. R., & Dawood, M. A. O.** (2021). The enrichment of diet with beneficial bacteria (single- or multi- strain) in biofloc system enhanced the water quality, growth performance, immune responses, and disease resistance of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*). *Aquaculture*, 539, 736640. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2021.736640>
- Monsees, H., Klatt, L., Kloas, W., & Wuertz, S.** (2017). Chronic exposure to nitrate significantly reduces growth and affects the health status of juvenile Nile tilapia (*Oreochromis niloticus* L.) in recirculating aquaculture systems. *Aquaculture Research*, 48(7), 3482-3492. <https://doi.org/10.1111/are.13174>
- Moreau, Y.** (1988). Physiologie de la nutrition. In *Biologie et écologie des poissons d'eau douce africains* (pp. 137-152).
- Moriarty, D.** (1973). The physiology of digestion of blue-green algae in the cichlid fish, *Tilapia nilotica*. *Journal of Zoology*, 171(1), 25-39.
- Morrison, C. M., Miyake, T., & Wright Jr, J. R.** (2001). Histological study of the development of the embryo and early larva of *Oreochromis niloticus* (Pisces: Cichlidae). *Journal of Morphology*, 247(2), 172-195.
- MPRH.** (2014). *Secteur de la pêche et de l'aquaculture, Bilan (2012-2014), Prospective 2030 et projet «Plan AQUAPECHE 2020 »*. <http://extwprlegs1.fao.org/docs/pdf/alg165014.pdf>
- Mugwanya, M., Dawood, M. A., Kimera, F., & Sewilam, H.** (2021). Biofloc systems for sustainable production of economically important aquatic species: A review. *Sustainability*, 13(13), 7255.
- Mukankomeje, R., Laviolette, F., & Descy, J. P.** (2009). Régime alimentaire de Tilapia, *Oreochromis niloticus*, du Lac Muhazi (Rwanda). *Annales de Limnologie - International Journal of Limnology*, 30(4), 297-312. <https://doi.org/10.1051/limn/1994022>
- Ng, W. K., & Romano, N.** (2013). A review of the nutrition and feeding management of farmed tilapia throughout the culture cycle. *Reviews in Aquaculture*, 5(4), 220-254.
- Nguyen, M. T., Pham, N. T. A., Vo, L. T., Truong, D. V., Nguyen, H. V., Nguyen, T. D. Q., Nguyen, P.N., Bossier, P.** (2023). Integrated mariculture of co-cultured whiteleg shrimp (*Litopenaeus vannamei*) and grey mullet (*Mugil cephalus*) in sequence with red tilapia (*Oreochromis spp.*) in a closed biofloc-based system. *Aquaculture*, 566, 739200. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2022.739200>
- Nielsen, S. S.** (2017). Total carbohydrate by phenol-sulfuric acid method. *Food analysis laboratory manual*, 137-141.

- Njiru, M., Okeyo-Owuor, J., Muchiri, M., & Cowx, I.** (2004). Shifts in the food of Nile tilapia, *Oreochromis niloticus* (L.) in Lake Victoria, Kenya. *African Journal of Ecology*, 42(3), 163-170.
- Oliveira, L. K., Wasielesky, W., & Tesser, M. B.** (2022). Fish culture in biofloc technology (BFT): Insights on stocking density carbon sources, C/N ratio, fish nutrition and health. *Aquaculture and Fisheries*. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.aaf.2022.08.010>
- Omar, E. A., Yousef, M. I., Srour, T. M., & Mansour, A. T.-E.** (2014). Effect of dietary natural phytochemicals on sex-reversal, growth performance, feed utilization and body composition of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) fry. *Journal of the Advances in Agricultural Researches*, 19(3), 428-441.
- ONS.** (2021). *Les principaux indicateurs du secteur de la pêche: année 2019*. https://www.ons.dz/IMG/pdf/peche_2019.pdf
- ONS.** (2022). *Les statistiques de la pêche, rétrospective 2010-2019*. Collection statistique, N° 224/2022. https://www.ons.dz/IMG/pdf/peche2010_2019.pdf
- Orlando, T. M., Oliveira, M. M. d., Paulino, R. R., Costa, A. C., Allaman, I. B., & Rosa, P. V.** (2017). Reproductive performance of female Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) fed diets with different digestible energy levels. *Revista Brasileira de Zootecnia*, 46, 1-7. <https://doi.org/https://doi.org/10.1590/s1806-92902017000100001>
- Pandey, S., Parvez, S., Sayeed, I., Haque, R., Bin-Hafeez, B., & Raisuddin, S.** (2003). Biomarkers of oxidative stress: a comparative study of river Yamuna fish Wallago attu (Bl. & Schn.). *Science of the total environment*, 309(1-3), 105-115.
- Panigrahi, A., Sundaram, M., Chakrapani, S., Rajasekar, S., Syama Dayal, J., & Chavali, G.** (2019). Effect of carbon and nitrogen ratio (C:N) manipulation on the production performance and immunity of Pacific white shrimp *Litopenaeus vannamei* (Boone, 1931) in a biofloc-based rearing system. *Aquaculture Research*, 50(1), 29-41. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/are.13857>
- Pérez-Fuentes, J. A., Hernández-Vergara, M. P., Pérez-Rostro, C. I., & Fogel, I.** (2016). C:N ratios affect nitrogen removal and production of Nile tilapia *Oreochromis niloticus* raised in a biofloc system under high density cultivation. *Aquaculture*, 452, 247-251. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2015.11.010>
- Pérez-Fuentes, J. A., Pérez-Rostro, C. I., Hernández-Vergara, M. P., & Monroy-Dosta, M. d. C.** (2018). Variation of the bacterial composition of biofloc and the intestine of Nile tilapia *Oreochromis niloticus*, cultivated using biofloc technology, supplied different feed rations. *Aquaculture Research*, 49(11), 3658-3668. <https://doi.org/10.1111/are.13834>
- Perneger, T., & Perrier, A.** (2004). Analyses de variance (1re partie): Test de T et ANOVA. *Revue des maladies respiratoires*, 21(4), 797-801.
- Person-Le Ruyet, J., & Bœuf, G.** (1998). L'azote ammoniacal, un toxique potentiel en élevage de poissons: le cas du turbot. *Bulletin Français de la Pêche et de la Pisciculture* (350-351), 393-412.
- Pires, C. M., Bazzo, G. C., Barreto, P. L. M., do Espírito Santo, C. M., Ventura, T. F. B., Pedra, A. G. L. M., Rover, T., McGovern, M., Hayashi, L.** (2021). Cultivation of the red seaweed *Kappaphycus alvarezii* using biofloc effluent. *Journal of Applied Phycology*, 33(2), 1047-1058. <https://doi.org/10.1007/s10811-020-02335-6>

- Poli, M. A., Legarda, E. C., de Lorenzo, M. A., Pinheiro, I., Martins, M. A., Seiffert, W. Q., & do Nascimento Vieira, F.** (2019). Integrated multitrophic aquaculture applied to shrimp rearing in a biofloc system. *Aquaculture*, 511, 734274. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2019.734274>
- Popma, T. J., & Lovshin, L. L.** (1996). Worldwide prospects for commercial production of tilapia. *International Center for Aquaculture and Aquatic Environments Alabama*, 41, 42 pp.
- Popma, T., & Masser, M.** (1999). Tilapia life history and biology. *SRAC Publication*, No. 283.
- Prabu, E., Rajagopalsamy, C., Ahilan, B., Jeevagan, I. J. M. A., & Renuhadevi, M.** (2019). Tilapia—an excellent candidate species for world aquaculture: a review. *Annual Research & Review in Biology*, 31(3), 1-14. <https://doi.org/10.9734/arrb/2019/v31i330052>
- Prabu, E., Rajagopalsamy, C., Ahilan, B., Jeevagan, J. M. A., & Renuhadevi, M.** (2018). Effect of dietary supplementation of biofloc meal on growth and survival of GIFT tilapia. *Indian Journal of Fisheries*, 65(1), 65-70.
- Ray, A. J., & Lotz, J. M.** (2014). Comparing a chemoautotrophic-based biofloc system and three heterotrophic-based systems receiving different carbohydrate sources. *Aquacultural Engineering*, 63, 54-61. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2014.10.001>
- Ray, A. K., & Ringo, E.** (2014). The Gastrointestinal Tract of Fish. In *Aquaculture Nutrition: Gut Health, Probiotics and Prebiotics* (eds D. Merrifield and E. Ringø), pp. 1-13. Wiley-Blackwell Publishing, Oxford, UK. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/9781118897263.ch1>
- Ridha, M. T., & Cruz, E. M.** (1999). Effect of different broodstock densities on the reproductive performance of Nile tilapia, *Oreochromis niloticus* (L.), in a recycling system [<https://doi.org/10.1046/j.1365-2109.1999.00311.x>]. *Aquaculture Research*, 30(3), 203-210. <https://doi.org/https://doi.org/10.1046/j.1365-2109.1999.00311.x>
- Ridha, M. T., & Cruz, E. M.** (2000). Effect of light intensity and photoperiod on Nile tilapia *Oreochromis niloticus* L. seed production. *Aquaculture Research*, 31(7), 609-617. <https://doi.org/https://doi.org/10.1046/j.1365-2109.2000.00481.x>
- Riou, B., & Landais, P.** (1998). Principes des tests d'hypothèse en statistique: , et P. *Annales francaises d'anesthésie et de réanimation*, 17, 1168-80.
- Rodier, J., Legube, B., Merlet, N., & Brunet, R.** (2009). *L'analyse de l'eau - 9e éd.: Eaux naturelles, eaux résiduaires, eau de mer*. Dunod, Paris, France.
- Romano, N.** (2021). Probiotics, prebiotics, biofloc systems, and other biocontrol regimens in fish and shellfish aquaculture. In *Aquaculture Pharmacology* (pp. 219-242). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821339-1.00003-9>
- Romano, N., Dauda, A. B., Ikhsan, N., Karim, M., & Kamarudin, M. S.** (2018). Fermenting rice bran as a carbon source for biofloc technology improved the water quality, growth, feeding efficiencies, and biochemical composition of African catfish *Clarias gariepinus* juveniles. *Aquaculture Research*, 49(12), 3691-3701. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/are.13837>
- Rouwenhorst, R. J., Jzn, J. F., Scheffers, W. A., & van Dijken, J. P.** (1991). Determination of protein concentration by total organic carbon analysis. *Journal of biochemical and biophysical methods*, 22(2), 119-128.

- Saha, S., Roy, R. N., Sen, S. K., & Ray, A. K.** (2006). Characterization of cellulase-producing bacteria from the digestive tract of tilapia, *Oreochromis mossambica* (Peters) and grass carp, *Ctenopharyngodon idella* (Valenciennes). *Aquaculture Research*, 37(4), 380-388. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/j.1365-2109.2006.01442.x>
- Saker, M. L., & Bouhoun, M. D.** (2007). Les ressources naturelles sahariennes: Gestion et impact sur le développement agricole. *Annales de la Faculté des Sciences et des Sciences de l'Ingénieur*, 1(2), 58-62.
- Samocha, T. M.** (2019). *Sustainable biofloc systems for marine shrimp*. Academic Press.
- Santiago, C. B., & Lovell, R. T.** (1988). Amino acid requirements for growth of Nile tilapia. *The journal of nutrition*, 118(12), 1540-1546.
- Sarmiento, N. L. A. F., Martins, E. F. F., Costa, D. C., Mattioli, C. C., da Costa Julio, G. S., Figueiredo, L. G., Luz, M. R., & Luz, R. K.** (2018). Reproductive efficiency and egg and larvae quality of Nile tilapia fed different levels of vitamin C. *Aquaculture*, 482, 96-102. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2017.08.035>
- Sarsangi Aliabad, H., Naji, A., Mortezaei, S. R. S., Sourinejad, I., & Akbarzadeh, A.** (2022). Effects of restricted feeding levels and stocking densities on water quality, growth performance, body composition and mucosal innate immunity of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) fry in a biofloc system. *Aquaculture*, 546, 737320. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2021.737320>
- Schweitzer, R., Arantes, R., Costódio, P. F. S., do Espírito Santo, C. M., Arana, L. V., Seiffert, W. Q., & Andreatta, E. R.** (2013). Effect of different biofloc levels on microbial activity, water quality and performance of *Litopenaeus vannamei* in a tank system operated with no water exchange. *Aquacultural Engineering*, 56, 59-70. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2013.04.006>
- Seck, M., Diadhiou, H. D., Ndao, P. D., Diouf, T., & Niane, A.** (2018). Production en masse d'alevins mâles de Tilapia *Oreochromis niloticus* de la vallée du fleuve Sénégal à partir de l'aliment hormoné au 17 alpha méthyl testostérone. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 12(5), 2236-2243.
- Seridi, F.** (2011). *L'aquaculture en Algérie: évolution, état actuel et essai d'analyse de durabilité* [Thèse de Magister, Université Badji Mokhtar, Annaba]. <https://biblio.univ-annaba.dz/wp-content/uploads/2014/05/Memoire-Magister1.pdf>
- Shalloof, K. A. S., & Khalifa, N.** (2009). Stomach contents and feeding habits of *Oreochromis niloticus* (L.) from Abu-Zabal lakes, Egypt. *World Applied Sciences Journal*, 6(1), 1-5.
- Shourbela, R. M., Khatab, S. A., Hassan, M. M., Van Doan, H., & Dawood, M. A. O.** (2021). The Effect of Stocking Density and Carbon Sources on the Oxidative Status, and Nonspecific Immunity of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) Reared under Biofloc Conditions. *Animals*, 11(1). <https://doi.org/10.3390/ani11010184>
- Silva, T. C. d., Rocha, J. D., Moreira, P., Signor, A., & Boscolo, W. R.** (2017a). Fish protein hydrolysate in diets for Nile tilapia post-larvae. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 52, 485-492.
- Silva, U. L., Falcon, D. R., PESSÔA, M. N. D. C., & Correia, E. d. S.** (2017b). CARBON SOURCES AND C: N RATIOS ON WATER QUALITY FOR NILE TILAPIA FARMING IN BIOFLOC SYSTEM 1. *Revista Caatinga*, 30, 1017-1027. <https://doi.org/10.1590/1983-21252017v30n423rc>

- Singh, J., Sarma, K., Kumar, T., Ahirwal, S., & Keer, S. R. a. N.** (2020). Bio-floc Technology (BFT): An Intensive Eco Sustainable and Cost-Effective Tool for Aquaculture. *Food and Scientific Reports*, 10(1).
- Smith, B. J., Smith, S. A., Tengjaroenkul, B., & Lawrence, T. A.** (2000). Gross morphology and topography of the adult intestinal tract of the tilapian fish, *Oreochromis niloticus* L. *Cells Tissues Organs*, 166(3), 294-303.
- Sontakke, R., Tiwari, V. K., Kurcheti, P., Asanaru Majeedkuty, B. R., Ande, M. P., & Haridas, H.** (2021). Yam-based biofloc system improves the growth, digestive enzyme activity, bacterial community structure and nutritional content in milkfish (*Chanos chanos*). *Aquaculture Research*, 52(7), 3460-3474. <https://doi.org/10.1111/are.15190>
- Stone, D. A.** (2003). Dietary carbohydrate utilization by fish. *Reviews in fisheries Science*, 11(4), 337-369.
- Subasinghe, R. P., & Sommerville, C.** (1985). Disinfection of *Oreochromis mossambicus* (Peters) eggs against commonly occurring potentially pathogenic bacteria and fungi under artificial hatchery conditions. *Aquaculture Research*, 16(2), 121-127. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/j.1365-2109.1985.tb00301.x>
- Summerfelt, R. C.** (2000). Water quality considerations for aquaculture. *Department of Animal Ecology*, 2-7.
- Tacon, A. G., Hasan, M. R., & Metian, M.** (2011). Demand and supply of feed ingredients for farmed fish and crustaceans: trends and prospects. *FAO Fisheries and Aquaculture technical paper*(564), I.
- Teferi, Y., Admassu, D., & Mengistou, S.** (2000). The food and feeding habit of *Oreochromis niloticus* L.(Pisces: Cichlidae) in Lake Chamo, Ethiopia. *SINET: Ethiopian Journal of Science*, 23(1), 1-12.
- Teoh, C.-Y., & Ng, W.-K.** (2016). The implications of substituting dietary fish oil with vegetable oils on the growth performance, fillet fatty acid profile and modulation of the fatty acid elongase, desaturase and oxidation activities of red hybrid tilapia, *Oreochromis sp.* *Aquaculture*, 465, 311-322.
- Terpstra, A.** (2015). Feeding and growth parameters of the tilapia (*oreochromis niloticus*) in the body weight range from newly hatched larvae (about 5 mgrams) to about 700 grams. *Growth*, 600, 800.
- Tesfahun, A., & Temesgen, M.** (2018). Food and feeding habits of Nile tilapia *Oreochromis niloticus* (L.) in Ethiopian water bodies: A review. *International Journal of Fisheries and Aquatic Studies*, 6(1), 43-47.
- Tomasso, J. R.** (1994). Toxicity of nitrogenous wastes to aquaculture animals. *Reviews in fisheries Science*, 2(4), 291-314. <https://doi.org/10.1080/10641269409388560>
- Tsadik Getinet, G.** (2008). Effects of Maternal Age on Fecundity, Spawning Interval, and Egg Quality of Nile tilapia, *Oreochromis niloticus* (L.). *Journal of the World Aquaculture Society*, 39(5), 671-677. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/j.1749-7345.2008.00197.x>
- Tsadik, G. G., & Bart, A. N.** (2007). Effects of feeding, stocking density and water-flow rate on fecundity, spawning frequency and egg quality of Nile tilapia, *Oreochromis niloticus* (L.). *Aquaculture*, 272(1), 380-388. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2007.08.040>
- Tucker, C. S., Hargreaves, J. A., & Boyd, C. E.** (2008). Better Management Practices for Freshwater Pond Aquaculture. In *Environmental best management practices for aquaculture* (pp. 151-226). <https://doi.org/10.1002/9780813818672.ch6>

- van der Salm, A. L., Metz, J. R., Wendelaar Bonga, S. E., & Flik, G.** (2005). Alpha-MSH, the melanocortin-1 receptor and background adaptation in the Mozambique tilapia, *Oreochromis mossambicus*. *General and Comparative Endocrinology*, 144(2), 140-149. <https://doi.org/10.1016/j.ygcen.2005.05.009>
- van Rijn, J., Tal, Y., & Schreier, H. J.** (2006). Denitrification in recirculating systems: Theory and applications. *Aquacultural Engineering*, 34(3), 364-376. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2005.04.004>
- Vicentini, C., Franceschini-Vicentini, I., Bombonato, M., Bertolucci, B., Lima, S., & Santos, A.** (2005). Morphological study of the liver in the teleost *Oreochromis niloticus*. *International Journal of Morphology*, 23(3), 211-216.
- Wang, C., Pan, L., Zhang, K., Xu, W., Zhao, D., & Mei, L.** (2016). Effects of different carbon sources addition on nutrition composition and extracellular enzymes activity of bioflocs, and digestive enzymes activity and growth performance of *Litopenaeus vannamei* in zero-exchange culture tanks. *Aquaculture Research*, 47(10), 3307-3318. <https://doi.org/10.1111/are.12784>
- Wang, G., Yu, E., Xie, J., Yu, D., Li, Z., Luo, W., Qiu, L., Zheng, Z.** (2015). Effect of C/N ratio on water quality in zero-water exchange tanks and the biofloc supplementation in feed on the growth performance of crucian carp, *Carassius auratus*. *Aquaculture*, 443, 98-104. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2015.03.015>
- Webster, C. D., & Lim, C.** (2006). *Tilapia: biology, culture, and nutrition*. CRC Press.
- Widanarni, Ekasari, J., & Maryam, S.** (2012). Evaluation of Biofloc Technology Application on Water Quality and Production Performance of Red Tilapia *Oreochromis sp.* Cultured at Different Stocking Densities. *HAYATI Journal of Biosciences*, 19(2), 73-80. <https://doi.org/10.4308/hjb.19.2.73>
- Xu, W.-J., Morris, T. C., & Samocha, T. M.** (2016). Effects of C/N ratio on biofloc development, water quality, and performance of *Litopenaeus vannamei* juveniles in a biofloc-based, high-density, zero-exchange, outdoor tank system. *Aquaculture*, 453, 169-175. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2015.11.021>
- Xu, W.-J., Morris, T. C., & Samocha, T. M.** (2018). Effects of two commercial feeds for semi-intensive and hyper-intensive culture and four C/N ratios on water quality and performance of *Litopenaeus vannamei* juveniles at high density in biofloc-based, zero-exchange outdoor tanks. *Aquaculture*, 490, 194-202. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2018.02.028>
- Xu, W., Xu, Y., Su, H., Hu, X., Yang, K., Wen, G., & Cao, Y.** (2020). Characteristics of Ammonia Removal and Nitrifying Microbial Communities in a Hybrid Biofloc-RAS for Intensive *Litopenaeus vannamei* Culture: A Pilot-Scale Study. *Water*, 12(11).
- Xu, W. J., Pan, L. Q., Sun, X. H., & Huang, J.** (2013). Effects of bioflocs on water quality, and survival, growth and digestive enzyme activities of *Litopenaeus vannamei* (Boone) in zero-water exchange culture tanks. *Aquaculture Research*, 44(7), 1093-1102. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2109.2012.03115.x>
- Yu, J., Wen, X., You, C., Wang, S., Chen, C., Tocher, D. R., & Li, Y.** (2021). Comparison of the growth performance and long-chain polyunsaturated fatty acids (LC-PUFA) biosynthetic ability of red tilapia (*Oreochromis mossambicus* × *O. niloticus*) fed fish oil or vegetable oil diet at different salinities. *Aquaculture*, 542, 736899. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2021.736899>

- Yu, Z., Li, L., Zhu, R., Li, M., Duan, J., Wang, J.-Y., Liu, Y.-H., Wu, L.-F.** (2020). Monitoring of growth, digestive enzyme activity, immune response and water quality parameters of Golden crucian carp (*Carassius auratus*) in zero-water exchange tanks of biofloc systems. *Aquaculture Reports*, *16*, 100283. <https://doi.org/10.1016/j.aqrep.2020.100283>
- Zaki, M. A. A., Alabssawy, A. N., Nour, A. E.-A. M., El Basuini, M. F., Dawood, M. A. O., Alkahtani, S., & Abdel-Daim, M. M.** (2020). The impact of stocking density and dietary carbon sources on the growth, oxidative status and stress markers of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) reared under biofloc conditions. *Aquaculture Reports*, *16*, 100282. <https://doi.org/10.1016/j.aqrep.2020.100282>
- Zemor, J. C., Wasielesky, W., Fóes, G. K., & Poersch, L. H.** (2019). The use of clarifiers to remove and control the total suspended solids in large-scale ponds for production of *Litopenaeus vannamei* in a biofloc system. *Aquacultural Engineering*, *85*, 74-79. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2019.03.001>
- Zhang, N., Luo, G., Tan, H., Liu, W., & Hou, Z.** (2016). Growth, digestive enzyme activity and welfare of tilapia (*Oreochromis niloticus*) reared in a biofloc-based system with poly- γ -hydroxybutyric as a carbon source. *Aquaculture*, *464*, 710-717. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2016.08.013>

Annexes

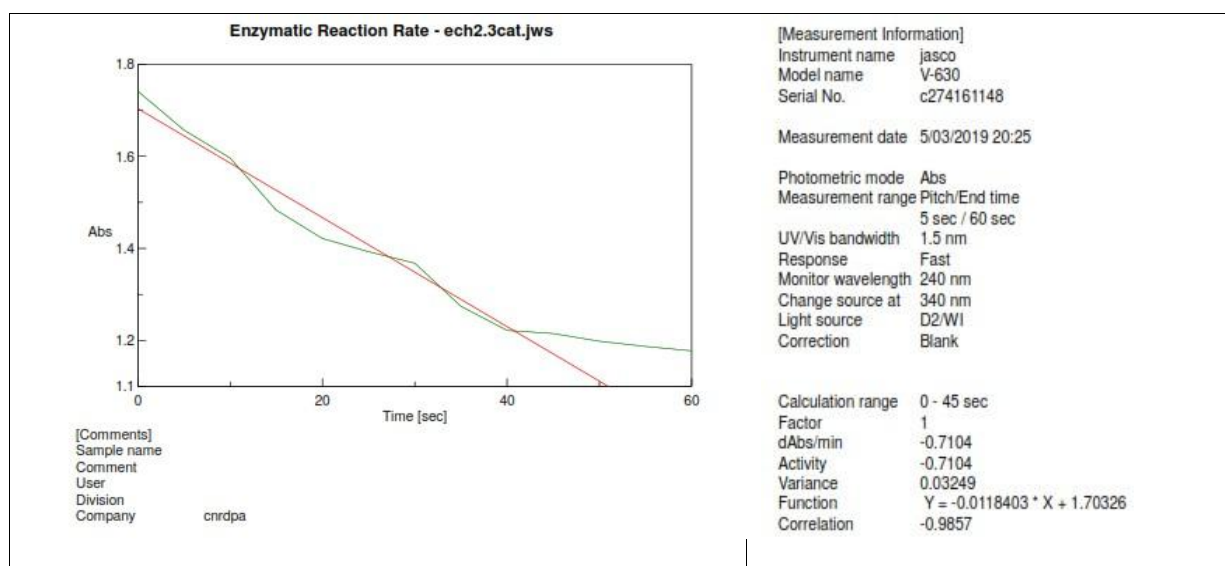
- **Annexe 1.** Principaux sources de carbone utilisées en système biofloc (Abakari, et al., 2021^b; El-Sayed, 2021)

Source de carbone	Espèce cultivée
Mélasses	<i>L. vannamei</i> , <i>P. vannamei</i> , <i>F. paulensis</i> , <i>F. duorarum</i> , <i>M. rosenbergii</i> , <i>O. niloticus</i>
Amidon de tapioca	<i>P.vachelli</i> , <i>O.niloticus</i> , <i>P.monodon</i>
Cellulose	<i>P.vachelli</i>
Saccharose	<i>L.vannamei</i>
Glycérol	<i>L.vannamei</i>
Farine de blé	<i>O.niloticus</i> , <i>L.vannamei</i> ,
Acétate de sodium	<i>O.niloticus</i>
Glucose	<i>O.niloticus</i>
Son de riz	<i>O.niloticus</i> , <i>L.vannamei</i>
Farine de maïs	<i>L.vannamei</i> , <i>O.niloticus</i>
Sucre de canne	<i>L.vannamei</i> , <i>O.niloticus</i>
Farine de manioc	<i>L.vannamei</i>

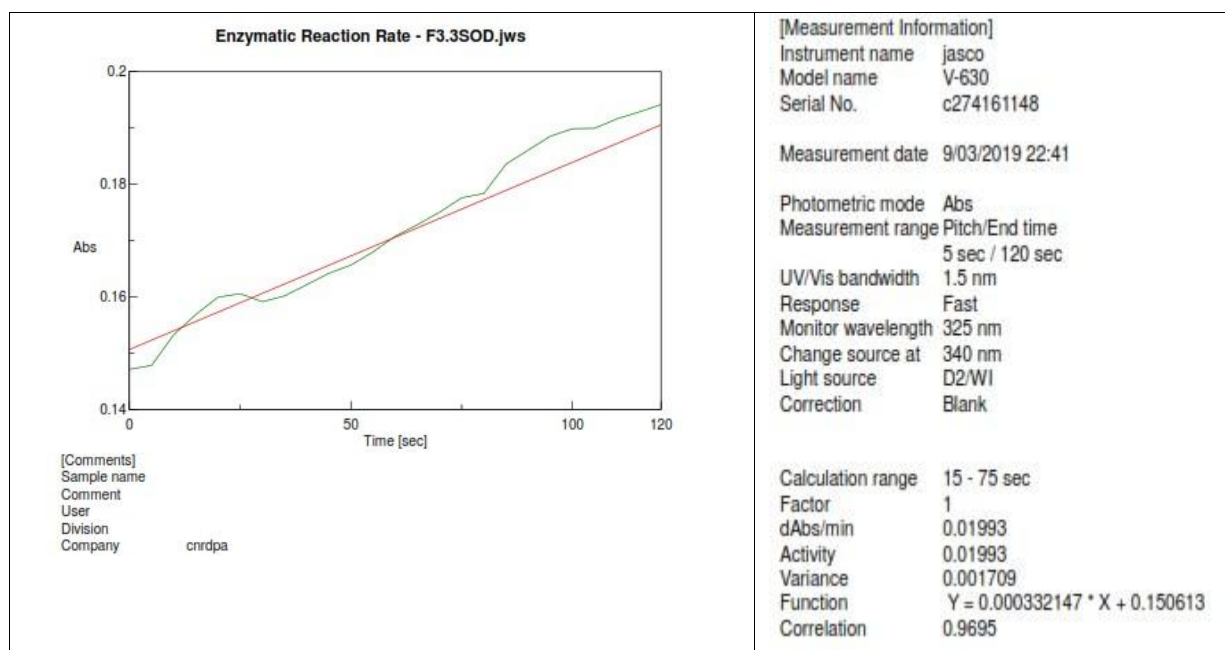
- **Annexe 02.** Composition des granulés utilisés dans les expériences d'élevage des juvéniles et des adultes du tilapia (Marque COPPENS)

Diamètre	2 mm	3 mm	6 mm
Protéines	50 %	30 %	30 %
Lipides	15 %	6 %	6 %
Fibres	0.8 %	3.4 %	3 %
Cendres	8.6 %	8.2 %	7.7 %

Annexe 03. Résultats d'analyse de l'activité de la catalase dans un échantillon du foie de tilapia : lecture de l'absorbance à 240 nm en modes cinétique par spectrophotomètre JASCO



Annexe 04. Résultats d'analyse de l'activité de la SOD dans un échantillon du foie de tilapia : lecture de l'absorbance à 325 nm en modes cinétique par spectrophotomètre JASCO



Annexe 05. Composition des granulés utilisés en élevage des post-larves du tilapia (Marque COPPENS)

Diamètre	0.3-0.5 mm	0.5-0.8 mm	1 mm
Protéines	56 %	56 %	54 %
Lipides	15 %	15 %	15 %
Fibres	0.2 %	0.2 %	0.3 %
Cendres	13 %	13 %	10.6 %

Annexe 06. Méthodologie de l'analyse statistique

Les tests statistiques reposent sur le principe d'énoncer une hypothèse nulle (H_0) et une hypothèse alternative (H_1) que l'on veut démontrer, de définir deux risques d'erreurs liés au choix de H_1 (noté α) et de H_0 (noté β) et de calculer une valeur de probabilité notée p pour prendre une décision. Le risque de première espèce (α) correspond à la probabilité de rejeter l'hypothèse nulle H_0 et d'accepter l'hypothèse alternative H_1 alors que H_0 est vraie. L'idée d'un test statistique est de supposer que H_0 est vraie et de calculer la valeur de probabilité p , qui est ensuite comparé au seuil α pour prendre une décision finale sur le choix d'hypothèse (Labreuche, 2010) :

- Si $p \leq \alpha$, H_0 est rejeté et H_1 est acceptée.
- Si $p > \alpha$, H_1 est rejeté et H_0 est acceptée.

La valeur seuil de 0,05 pour le risque α est communément admise pour trancher entre H_0 et H_1 (Riou & Landais, 1998).

Il existe deux grandes catégories de tests statistiques : les tests paramétriques et les tests non paramétriques. Les tests paramétriques ont des conditions d'application spécifiques, tandis que les tests non paramétriques sont applicables de manière plus générale, mais ont une puissance statistique moindre par rapport à leurs équivalents paramétriques (Labreuche, 2010).

Les tests paramétriques tels que le test t de Student, l'ANOVA, et la régression linéaire ne sont applicables que si certaines conditions sont remplies : les observations sont indépendantes, la distribution de la variable analysée suit une loi normale et que la variance au sein de chacun des groupes comparés soit égale (homogénéité des variances) (Perneger & Perrier, 2004). Si ces conditions ne sont pas remplies, des tests non paramétriques sont utilisés pour la comparaison des moyennes, tels que le test Mann-Whitney (comparaison de 2 échantillons) ou le test de Kruskal-Wallis (comparaison de plus de deux groupes) (Labreuche, 2010).

Dans cette étude la vérification de la normalité des variable est réalisée par un test de Shapiro-Wilk, et l'homogénéité des variances est vérifier à l'aide du test de Hartley-Bartlett ou du test de Levene.

Le test t de Student est appliqué pour comparer les moyennes de deux échantillons, tandis que l'ANOVA (analyse de la variance) est utilisée pour comparer les moyennes de trois échantillons et plus. Lorsque l'hypothèse H0 est rejetée dans l'ANOVA ($p < 0.05$), cela indique qu'il y a au moins deux moyennes qui diffèrent les unes des autres. Pour effectuer des comparaisons deux à deux entre les moyennes, des tests de comparaisons multiples, appelés "tests post-hoc", sont souvent utilisés. Ces tests permettent d'identifier les paires de moyennes qui présentent des différences significatives. Les tests de comparaisons multiples couramment utilisés incluent les tests de Bonferroni, de Tukey et de Scheffé.

Annexe 07. Données brutes et analyses statistiques du chapitre III : paramètres du milieu

1- Température de l'eau (°C)

Bac	BFT 14	BFT17	BFT20	C
1	23,93	24,07	24,13	24,17
2	24,22	24,23	24,14	23,76
3	24,30	24,26	24,10	23,97
Moyenne	24,15	24,19	24,12	23,97
Déviatoin standard	0,19	0,10	0,02	0,20

	Normalité	Homogénéité variances	Comparaison moyennes
Test	Shapiro-Wilk	Hartley-Bartlett	ANOVA
$p < 0.05$	0.35	0,105	0,361

2- Oxygène dissous (mg/L)

Bac	BFT 14	BFT17	BFT20	C
1	6,5	6,5	6,4	6,7
2	6,0	6,3	6,1	6,7
3	6,1	6,1	6,0	6,4
Moyenne	6,18	6,32	6,17	6,60
Déviatoin standard	0,29	0,22	0,21	0,15

	Normalité	Homogénéité variances	Comparaison moyennes
Test	Shapiro-Wilk	Hartley-Bartlett	ANOVA
$p < 0.05$	0.3	0,88	0,136

3- pH

Bac	BFT 14	BFT17	BFT20	C
1	7,73	7,82	7,85	8,04
2	7,71	7,81	7,83	8,05
3	7,71	7,82	7,86	8,04
Moyenne	7,72	7,82	7,85	8,04
Déviation standard	0,01	0,01	0,01	0,005

	Normalité	Homogénéité variances	Comparaison moyennes
Test	Shapiro-Wilk	Hartley-Bartlett	ANOVA
$p < 0.05$	0.052	0.51	0,000000

Test Tukey		{1}	{2}	{3}	{4}
1	C		0,000231	0,000231	0,000231
2	BFT14	0,000231		0,000238	0,000231
3	BFT17	0,000231	0,000238		0,044711
4	BFT20	0,000231	0,000231	0,044711	

4- Ammonium (mg/L)

Bac	C	BFT 14	BFT 17	BFT 20
1	0,11	0,27	0,18	0,15
2	0,09	0,22	0,17	0,13
3	0,13	0,27	0,20	0,14
Moyenne	0,11	0,25	0,18	0,14
Ecart-type	0,019	0,029	0,013	0,007

	Normalité	Homogénéité variances	Comparaison moyennes
Test	Shapiro-Wilk	Hartley-Bartlett	ANOVA
$p < 0.05$	0.52	0.39	0,000066

Test Tukey	Var1	{1}	{2}	{3}	{4}
1	BFT14		0,009651	0,000558	0,000260
2	BFT17	0,009651		0,077297	0,004042
3	BFT20	0,000558	0,077297		0,191182
4	C	0,000260	0,004042	0,191182	

5- Nitrites (mg/L)

Bac	C	BFT 14	BFT 17	BFT 20
1	0,11	0,28	0,17	0,12
2	0,10	0,27	0,17	0,11
3	0,15	0,31	0,20	0,08
Moyenne	0,12	0,29	0,18	0,10
Déviation standard	0,025	0,020	0,016	0,018

	Normalité	Homogénéité variances	Comparaison moyennes
Test	Shapiro-Wilk	Hartley-Bartlett	ANOVA
$p < 0.05$	0.123	0.94	0,000016

Test Tukey	Var1	{1}	{2}	{3}	{4}
1	BFT14		0,001112	0,000237	0,000246
2	BFT17	0,001112		0,007692	0,024301
3	BFT20	0,000237	0,007692		0,815547
4	C	0,000246	0,024301	0,815547	

6- Nitrates (mg/L)

Bac	T	BFT 14	BFT 17	BFT 20
1		7,14	137,14	68,57
2		6,57	151,43	82,86
3		7,86	137,43	79,57
moyenne		7,19	142,00	77,00
Déviation standard		0,644	8,167	7,482

	Normalité	Homogénéité variances	Comparaison moyennes
Test	Shapiro-Wilk	Hartley-Bartlett	ANOVA
$p < 0.05$	0.17	0.098	0,000000

Test Tukey	Var1	{1}	{2}	{3}	{4}
1	BFT14		0,000232	0,000231	0,000231
2	BFT17	0,000232		0,001482	0,000231
3	BFT20	0,000231	0,001482		0,000644
4	C	0,000231	0,000231	0,000644	

7- Matières en suspension (mg/L)

Bac	BFT 14	BFT 17	BFT 20
1	497,03	603,44	744,63
2	455,37	611,25	783,25
3	445,36	644,60	723,75
moyenne	465,92	619,76	750,54
Déviation standard	27,402	21,863	30,188

	Normalité	Homogénéité variances	Comparaison moyennes
Test	Shapiro-Wilk	Hartley-Bartlett	ANOVA
$p < 0.05$	0.43	0.91	0,000039

Test Tukey	Var1	{1}	{2}	{3}
1	BFT14		0,001173	0,000238
2	BFT17	0,001173		0,002511
3	BFT20	0,000238	0,002511	

8- Alcalinité (mg/L)

Bac	C	BFT 14	BFT 17	BFT 20
1	180,40	160,30	166,30	170,80
2	174,90	161,00	166,90	167,70
3	177,20	157,80	162,80	167,80
moyenne	177,50	159,70	165,33	168,77
Déviation standard	2,762	1,682	2,214	1,762

	Normalité	Homogénéité variances	Comparaison moyennes
Test	Shapiro-Wilk	Hartley-Bartlett	ANOVA
$p < 0.05$	0.17	0.09	0,000000

Test Tukey	Var1	{1}	{2}	{3}	{4}
1	BFT14		0,000232	0,000231	0,000231
2	BFT17	0,000232		0,001482	0,000231
3	BFT20	0,000231	0,001482		0,000644
4	T	0,000231	0,000231	0,000644	

9- Volume du floc (ml/L)

Bac	BFT 14	BFT 17	BFT 20
1	42,87	50,80	57,87
2	42,87	51,33	61,47
3	42,00	54,53	59,00
moyenne	42,58	52,22	59,44
Déviation standard	0,500	2,019	1,841

	Normalité	Homogénéité variances	Comparaison moyennes
Test	Shapiro-Wilk	Hartley-Bartlett	ANOVA
$p < 0.05$	0.25	0.27	0,000042

Test Tukey	Var1	{1}	{2}	{3}
1	BFT14		0,000961	0,000239
2	BFT17	0,000961		0,003752
3	BFT20	0,000239	0,003752	

Annexe 08. Données brutes et analyses statistiques chapitre III, Performances zootechniques**1- Gain moyen quotidien du poids GMQ (g/j)**

Bac	J30				J62			
	C	BFT 14	BFT 17	BFT 20	C	BFT 14	BFT 17	BFT 20
1	0,67	0,58	0,58	0,57	0,87	0,75	0,60	0,64
2	0,60	0,61	0,58	0,63	0,87	0,81	0,77	0,66
3	0,62	0,63	0,57	0,52	0,78	0,75	0,73	0,54
Moyenne	0,63	0,61	0,58	0,57	0,84	0,77	0,70	0,61
DS	0,03	0,025	0,007	0,053	0,055	0,035	0,091	0,068

Test	Normalité		Homogénéité variances		Comparaison moyennes	
	Shapiro-Wilk		Hartley-Bartlett		ANOVA	
J30	$p < 0.05$	0.413		0.18		0.18
J62	$p < 0.05$	0.69		0.69		0.015

Test Tukey (J62)		{1}	{2}	{3}	{4}
1	BFT 14		0,584453	0,069578	0,608642
2	BFT 17	0,584453		0,400124	0,122249
3	BFT 20	0,069578	0,400124		0,012370
4	C	0,608642	0,122249	0,012370	

2- Taux de croissance spécifique TCS (%/j)

Bac	J30				J62			
	C	BFT 14	BFT 17	BFT 20	C	BFT 14	BFT 17	BFT 20
1	2,02	1,81	1,79	1,78	1,89	1,73	1,49	1,57
2	1,86	1,87	1,80	1,92	1,89	1,82	1,76	1,60
3	1,90	1,92	1,78	1,66	1,76	1,72	1,71	1,39
Moyenne	1,93	1,86	1,79	1,79	1,85	1,75	1,65	1,52
Déviati on standard	0,082	0,053	0,011	0,134	0,073	0,052	0,142	0,115

Test	Normalité		Homogénéité variances		Comparaison moyennes	
	Shapiro-Wilk		Hartley-Bartlett		ANOVA	
J30	$p < 0.05$	0.22		0.08		0.2
J62	$p < 0.05$	0.5		0.61		0.022

Test Tukey (J62)	Var1	{1}	{2}	{3}	{4}
1	BFT 14		0,626723	0,087883	0,694810
2	BFT 17	0,626723		0,443197	0,168031
3	BFT 20	0,087883	0,443197		0,018868
4	C	0,694810	0,168031	0,018868	

3- Densité finale de stockage FSD (kg/m³)

Bac	J30				J62			
	C	BFT 14	BFT 17	BFT 20	C	BFT 14	BFT 17	BFT 20
1	4,46	4,17	4,06	4,00	7,85	7,08	6,16	6,21
2	4,23	4,11	4,17	4,29	7,79	7,24	7,23	6,32
3	4,29	4,34	4,11	3,99	7,24	7,10	6,95	5,74
Moyenne	4,32	4,21	4,11	4,09	7,63	7,14	6,78	6,09
DS	0,12	0,12	0,06	0,17	0,34	0,09	0,56	0,31

	Test	Normalité	Homogénéité variances	Comparaison moyennes
		Shapiro-Wilk	Hartley-Bartlett	ANOVA
J30	$p < 0.05$	0.14	0.64	0.16
J62	$p < 0.05$	0.66	0.25	0.005

Test Tukey (J62)	Var1	{1}	{2}	{3}	{4}
1	BFT 14		0,625784	0,030718	0,409084
2	BFT 17	0,625784		0,172038	0,079361
3	BFT 20	0,030718	0,172038		0,003778
4	C	0,409084	0,079361	0,003778	

4- Indice de conversion IC

Bac	J30				J62			
	C	BFT 14	BFT 17	BFT 20	C	BFT 14	BFT 17	BFT 20
1	0,87	0,93	1,02	1,02	0,99	1,04	1,13	1,04
2	0,96	0,97	0,94	0,88	0,95	0,97	0,98	1,06
3	0,95	0,86	0,97	1,02	1,08	1,04	1,04	1,25
Moyenne	0,93	0,92	0,98	0,97	1,00	1,02	1,05	1,11
DS	0,05	0,05	0,04	0,08	0,07	0,04	0,08	0,12

	Test	Normalité	Homogénéité variances	Comparaison moyennes
		Shapiro-Wilk	Hartley-Bartlett	ANOVA
J30	$p < 0.05$	0.14	0.76	0.56
J62	$p < 0.05$	0.09	0.62	0.4

Annexe 08. Données brutes et analyses statistiques chapitre III, Activité enzymatique

1. Protéases dans le foie et le tube digestif (U/mg protéines)

Bac	Foie				Tube digestif			
	C	BFT 14	BFT 17	BFT 20	C	BFT 14	BFT 17	BFT 20
1	0,36	0,77	0,16	0,30	62,2	53,1	41,7	63,9
2	0,26	0,08	0,25	1,08	63,3	54,7	49,9	47,7
3	0,57	0,55	0,83	0,09	42,5	46,8	59,6	50,2
Moyenne	0,39	0,46	0,41	0,49	56,01	51,55	50,42	53,94
DS	0,16	0,35	0,36	0,52	11,70	4,20	8,93	8,71

		Normalité	Homogénéité variances	Comparaison moyennes
	Test	Shapiro-Wilk	Hartley-Bartlett	ANOVA
Foie	$p < 0.05$	0.14	0.6	0.49
Tube digestif	$p < 0.05$	0.87	0.74	0.22

2. Alpha-amylase dans le foie et le tube digestif (U/mg protéines)

Foie					Tube digestif			
Bac	C	BFT 14	BFT 17	BFT 20	C	BFT 14	BFT 17	BFT 20
1	4,09	3,62	3,09	3,02	4,51	5,40	3,81	4,54
2	3,76	3,67	5,09	5,37	5,13	4,39	3,72	4,12
3	3,53	3,13	4,56	5,09	4,33	4,68	4,69	4,18
Moyenne	3,79	3,47	4,25	4,49	4,66	4,82	4,07	4,28
DS	0,28	0,30	1,03	1,28	0,42	0,52	0,53	0,23

		Normalité	Homogénéité variances	Comparaison moyennes
	Test	Shapiro-Wilk	Hartley-Bartlett	ANOVA
Foie	$p < 0.05$	0.28	0.56	0.98
Tube digestif	$p < 0.05$	0.37	0.68	0.86

3. Catalase et SOD (U/mg protéines)

Catalase					SOD			
Bac	C	BFT 14	BFT 17	BFT 20	C	BFT 14	BFT 17	BFT 20
1	110,7	171,9	185,9	160,5	85,4	73,8	74,8	82,9
2	260,3	191,4	221,2	236,5	71,4	77,3	70,8	85,4
3	210,5	152,3	185,9	171,9	78,9	76,7	77,2	57,3
Moyenne	193,84	171,87	197,68	189,62	78,58	75,96	74,26	75,23
DS	76,14	19,54	20,41	40,99	7,00	1,88	3,24	15,54

		Normalité	Homogénéité variances	Comparaison moyennes
	Test	Shapiro-Wilk	Hartley-Bartlett	ANOVA
Catalase	$p < 0.05$	0.99	0.25	0.9
SOD	$p < 0.05$	0.15	0.066	0.93

Annexe 10. Données brutes et analyses statistiques chapitre IV, Paramètre du milieu dans les bacs de stockage des géniteurs

1- Température (°C), oxygène (mg/L), pH

Bac	Température			Oxygène dissous			pH		
	BFT 12	BFT 18	C	BFT 12	BFT 18	C	BFT 12	BFT 18	C
1	25,84	25,88	26,17	7,18	6,54	6,88	7,95	8,01	7,97
2	26,15	25,97	26,14	6,79	6,45	6,71	7,97	7,99	7,94
3	25,94	25,84	26,13	6,58	6,25	6,52	7,81	7,95	7,88
Moyenne	25,79	25,89	26,15	6,85	6,41	6,70	7,91	7,98	7,93
DS	25,84	25,88	26,17	0,31	0,14	0,18	0,091	0,029	0,047

	Test	Normalité	Homogénéité variances	Comparaison moyennes
		Shapiro-Wilk	Hartley-Bartlett	ANOVA
Température	$p < 0.05$	0.06	0.08	0.056
Oxygène dissous	$p < 0.05$	0.08	0.59	0.12
pH	$p < 0.05$	0.08	0.36	0.39

2- Ammonium, nitrites, nitrates (mg/L)

Bac	NH ₄ ⁺			NO ₂ ⁻			NO ₃ ⁻		
	BFT 12	BFT 18	C	BFT 12	BFT 18	C	BFT 12	BFT 18	C
1	0,81	0,57	0,131	0,69	0,37	0,061	60	38,3	21,1
2	0,46	0,23	0,0895	0,30	0,17	0,024	57,8	28,3	18,4
3	0,33	0,18	0,0905	0,34	0,23	0,019	51,7	30,6	23,8
Moyenne	0,53	0,33	0,10	0,44	0,25	0,03	56,48	32,41	21,11
DS	0,250	0,210	0,024	0,211	0,101	0,023	4,32	5,25	2,67

	Test	Normalité	Homogénéité variances	Comparaison moyennes
		Shapiro-Wilk	Hartley-Bartlett	ANOVA
Ammonium	$p < 0.05$	0.17	0.062	0.0022
Nitrites	$p < 0.05$	0.27	0.068	0.028
Nitrates	$p < 0.05$	0.19	0.7	0.00013

Ammonium				
Test Tukey	Var1	{1}	{2}	{3}
1	BFT12		0,428671	0,071424
2	BFT18	0,428671		0,377465
3	C	0,071424	0,377465	

Nitrites				
Test Tukey	Var1	{1}	{2}	{3}
1	BFT12		0,277533	0,024066
2	BFT18	0,277533		0,198914
3	C	0,024066	0,198914	

Nitrates				
Test Tukey	Var1	{1}	{2}	{3}
1	BFT12		0,001218	0,000322
2	BFT18	0,001218		0,038658
3	C	0,000322	0,038658	

4. Alcalinité, MES, volume du floc

Bac	ALC			VF		
	BFT 12	BFT 18	C	BFT 12	BFT 18	C
1	160,3	170,4	156,2	42,5	51,2	-
2	159,3	172,1	156,3	34,7	41,5	-
3	156,4	172,5	156,6	36,5	37,6	-
Moyenne	158,65	171,65	156,33	37,93	43,40	-
DS	2,04	1,12	0,22	4,08	6,99	-

	Test	Normalité	Homogénéité variances	Comparaison moyennes
		Shapiro-Wilk	Hartley-Bartlett	ANOVA
Alcalinité	$p < 0.05$	0.007	0.07	0,000018
Volume du floc	$p < 0.05$	0.11	0.46	0,00064

Alcalinité				
Test Tukey	Var1	{1}	{2}	{3}
1	BFT12		0,00025	0,170875
2	BFT18	0,00025		0,000233
3	C	0,170875	0,00023	

Volume du floc			
Test Tukey	Var1	{1}	{2}
1	BFT12		0,00025
2	BFT18	0,00025	

Annexe 11. Données brutes et analyses statistiques chapitre IV, Paramètre zootechniques**1- Taux de croissance spécifique (% / j) ; Gain moyen quotidien du poids (g/j) et Indice de conversion alimentaire (Bacs males + femelles)**

Bac	TCS			GMQ			IC		
	BFT 12	BFT 18	C	BFT 12	BFT 18	C	BFT 12	BFT 18	C
1	1,33	1,14	1,34	1,33	1,08	1,39	1,21	1,26	1,18
2	1,46	1,21	1,40	1,53	1,11	1,40	1,07	1,32	1,18
3	1,32	1,33	1,42	1,97	1,91	2,09	1,12	1,13	1,21
Moyenne	1,37	1,23	1,39	1,61	1,37	1,63	1,13	1,24	1,19
DS	0,08	0,09	0,04	0,32	0,47	0,40	0,07	0,10	0,02

	Test	Normalité	Homogénéité variances	Comparaison moyennes
		Shapiro-Wilk	Hartley-Bartlett	ANOVA
TCS	$p < 0.05$	0.45	0.61	0.066
GMQ	$p < 0.05$	0.3	0.89	0.69
IC	$p < 0.05$	0.97	0.22	0.27

2- Taux de croissance spécifique (% / j) ; Gain moyen quotidien du poids (g/j) et Indice de conversion alimentaire (Bacs femelles)

Bac	TCS			GMQ			IC		
	BFT 12	BFT 18	C	BFT 12	BFT 18	C	BFT 12	BFT 18	C
1	1,33	1,14	1,34	1,33	1,08	1,39	1,21	1,26	1,18
2	1,46	1,21	1,40	1,53	1,11	1,40	1,07	1,32	1,18
Moyenne	1,40	1,18	1,37	1,43	1,10	1,39	1,14	1,29	1,18
DS	0,09	0,05	0,04	0,14	0,03	0,01	0,10	0,04	0,002

	Test	Normalité	Homogénéité variances	Comparaison moyennes
		Shapiro-Wilk	Hartley-Bartlett	ANOVA
TCS	$p < 0.05$	0.71	0.78	0.066
GMQ	$p < 0.05$	0.43	0.17	0.045
IC	$p < 0.05$	0.9	0.09	0.18

Test Fisher LSD	Var1	{1}	{2}	{3}
1	BFT12		0,025823	0,692863
2	BFT18	0,025823		0,034505
3	C	0,692863	0,034505	

Annexe 12. Données brutes et analyses statistiques chapitre IV, Paramètre de reproduction**1. Fécondité absolue œufs/femelle et fécondité relative œufs/ g de femelle**

Ponte	Fécondité absolue		Fécondité relative	
	BFT	C	BFT	C
1	400	862	2,53	5,07
2	179	306	1,48	1,89
3	157	567	2,06	4,17
4	288	500	3,79	2,99
5	833	494	1,78	4,80
6	410	365	4,61	1,74
7	931	425	2,40	3,29
8	249	212	2,44	1,22
9	456	386	2,55	1,80
10	366	260	2,64	2,11
11	314	274	2,62	2,28
12		424		2,00
Moyenne	416,6	422,9	2,63	2,78
Déviat ion standard	249,3	174,8	0,88	1,28

	Test	Normalité	Comparaison moyennes
		Shapiro-Wilk	Mann-Whitney
Fécondité absolue	$p < 0.05$	0.005	0.85
Fécondité relative	$p < 0.05$	0.019	0.53

2. Taux d'éclosion (%), taux de survie en phase larvaire (%)

	Taux d'éclosion		Taux de survie larvaire	
	BFT	C	BFT	C
	75,7	81,2	88,07	84,93
	58,4	75,3	83,23	60,64
	88,1	64,6	68,75	85,28
	70,1	40,0	48,85	39,52
	90,2	47,8	56,52	77,97
	92,0	67,4	92,14	74,55
	52,6	94,1	56,10	70,00
	96,5	56,6	71,59	50,83
	72,8	94,3		80,22
		89,4		59,59
Moyenne	77,37	71,06	70,66	68,35
Déviat ion standard	15,45	19,16	16,10	15,31

	Test	Normalité	Homogénéité variances	Comparaison moyennes
		Shapiro-Wilk	Levene	t-Student
Taux d'éclosion	$p < 0.05$	0.24	0.44	0.44
Taux de survie larvaire	$p < 0.05$	0.9	0.88	0.76

3. Biométrie : Diamètre et volume des œufs, Longueur des larves à J1 post-éclosion (L₁) et Longueur larves à J5 post-éclosion (L₅)

	Diamètre œufs		Volume œufs		L ₁ larves		L ₅ larves	
	BFT	C	BFT	C	BFT	C	BFT	C
	2,30	2,46	5,63	7,17	5,6	5,50	9,03	9,00
	2,29	2,26	5,65	4,96	6,1	5,98	9,43	9,02
	2,26	2,44	5,48	6,93	6,1	5,44	9,34	9,17
	2,55	2,50	7,95	7,56	5,7	5,61	9,19	9,41
	2,95	2,55	12,53	7,94	6,5	4,84	9,41	9,79
	2,71	2,65	9,68	8,94	5,4	5,78	9,36	
	2,46	2,28	7,20	5,69	4,7	6,56	10,45	
	2,39	2,72	6,53	9,73	6,7		9,70	
	2,83	2,79	11,07	10,61	6,2			
	2,53		7,76		5,4			
Moyenne	2,53	2,52	7,95	7,73	5,85	5,67	9,49	9,28
DS	0,24	0,20	2,43	1,94	0,60	0,53	0,44	0,33

	Test	Normalité	Homogénéité variances	Comparaison moyennes
		Shapiro-Wilk	Levene	t-Student
Diamètre œufs	$p < 0.05$	0.26	0.44	0.9
Volume œufs	$p < 0.05$	0.29	0.4	0.82
L ₁ larves	$p < 0.05$	0.67	0.53	0.54
L ₅ larves	$p < 0.05$	0.22	0.8	0.37

Annexe 13. Données brutes et analyses statistiques du chapitre V, Paramètres du milieu

1- Température, oxygène dissous, pH, Alcalinité

Aquarium	T °C		OD		pH		ALC	
	BFT	C	BFT	C	BFT	C	BFT	C
1	26,05	26,01	7,27	7,34	8,02	8,10	151,88	152,88
2	25,95	25,88	7,29	7,34	8,02	8,07	150,88	155,13
3	25,47	26,03	7,35	7,31	7,99	8,10	159,13	156,75
Moyenne	25,82	25,97	7,31	7,33	8,01	8,09	153,96	154,92
DS	0,31	0,08	0,04	0,02	0,01	0,02	4,50	1,95

	Test	Normalité	Homogénéité variances	Comparaison moyennes
		Shapiro-Wilk	Levene	t-Student
Température	$p < 0.05$	0.15	0.059	0.46
Oxygène dissous	$p < 0.05$	0.62	0.14	0.39
pH	$p < 0.05$	0.24	0.66	0.0025
Alcalinité	$p < 0.05$	0.77	0.12	0.175

2- Ammonium, nitrites, nitrates

Aquarium	Ammonium		Nitrites		Nitrates	
	BFT	C	BFT	C	BFT	C
1	1,26	0,57	0,411	0,078	23,00	17,50
2	0,94	0,51	0,551	0,084	25,83	16,00
3	1,33	0,4775	0,262	0,087	29,00	16,17
Moyenne	1,18	0,52	0,41	0,08	25,94	16,56
DS	0,21	0,05	0,14	0,005	3,00	0,82

	Normalité		Homogénéité variances		Comparaison moyennes	
	Test	Shapiro-Wilk	Levene	t-Student		
Ammonium	$p < 0.05$	0.14	0.051	0.0058		
Nitrites	$p < 0.05$	0.14	0.12	0.0178		
Nitrates	$p < 0.05$	0.27	0.22	0.0064		

Annexe 14. Données brutes et analyses statistiques chapitre V, Paramètres zootechniques

1- TCS (%/j), GMQ (g/j), IC après 20 jours d'élevage larvaire (J20)

J20	TCS (%/j)		GMQ (mg/j)		IC	
	BFT	C	BFT	C	BFT	C
1	16,60	15,42	11,33	8,76	0,75	0,86
2	15,65	14,69	10,71	8,49	0,79	0,88
3	16,56	15,32	10,84	8,06	0,82	0,93
Moyenne	16,27	15,14	10,96	8,44	0,79	0,89
DS	0,54	0,40	0,32	0,36	0,04	0,04

	Normalité		Homogénéité variances		Comparaison moyennes	
	Test	Shapiro-Wilk	Levene	t-Student		
TCS (%/j)	$p < 0.05$	0.45	0.44	0.043		
GMQ (mg/j)	$p < 0.05$	0.19	0.9	0,000825		
IC	$p < 0.05$	0.99	0.9	0.026		

2- TCS (%/j), GMQ (g/j), IC, k, CV poids (%), CV tailles (%) après 43 jours d'élevage larvaire (J43)

J43	TCS		GMQ		IC		k		CV poids		CV tailles	
	BFT	C	BFT	C	BFT	C	BFT	C	BFT	C	BFT	C
1	12,22	12,53	37,68	42,56	0,91	0,91	1,55	1,50	28,91	24,28	9,42	8,01
2	12,00	12,10	39,53	40,03	0,88	1,02	1,58	1,53	25,72	20,84	8,09	6,29
3	12,52	12,66	41,40	42,28	0,84	0,97	1,50	1,55	23,85	32,86	7,69	10,61
Moyenne	12,25	12,43	39,53	41,62	0,88	0,96	1,54	1,53	26,16	26,00	8,40	8,30
DS	0,26	0,29	1,86	1,39	0,04	0,05	0,04	0,03	2,56	6,19	0,90	2,17

	Normalité		Homogénéité variances		Comparaison moyennes	
	Test	Shapiro-Wilk	Levene	t-Student		
TCS (%/j)	$p < 0.05$	0.43	0.74	0.46		
GMQ (mg/j)	$p < 0.05$	0.66	0.8	0.19		
IC	$p < 0.05$	0.91	0.67	0.07		
k	$p < 0.05$	0.92	0.43	0.61		
CV poids	$p < 0.05$	0.8	0.17	0.96		
CV tailles	$p < 0.05$	0.83	0.26	0.94		

Annexe 15. Données brutes et analyses statistiques chapitre V, Activité enzymatique (U/mg protéines)

1- Activité enzymatique à J20 des protéases, alpha-amylase, catalase et SOD

J20	Protéases		Alpha-amylase		Catalase		SOD	
	BFT	C	BFT	C	BFT	C	BFT	C
Aquarium								
1	6,99	6,59	2,52	1,84	222,9	213,3	17,08	19,13
2	4,11	5,03	2,13	1,98	245,4	214,9	14,75	15,61
3	6,50	5,48	2,45	1,72	255,6	200,2	18,28	19,45
Moyenne	5,86	5,70	2,37	1,85	241,29	209,46	16,70	18,06
DS	1,54	0,80	0,20	0,13	16,73	8,08	1,80	2,13

	Test	Normalité	Homogénéité variances	Comparaison moyennes
		Shapiro-Wilk	Levene	t-Student
Protéases	$p < 0.05$	0.59	0.2	0.88
Alpha-amylase	$p < 0.05$	0.93	0.35	0.021
Catalase	$p < 0.05$	0.58	0.25	0.041
SOD	$p < 0.05$	0.54	0.62	0.44

2- Activité enzymatique à J43 des protéases, alpha-amylase, catalase et SOD

J43	Protéases		Alpha-amylase		Catalase		SOD	
	BFT	C	BFT	C	BFT	C	BFT	C
Aquarium								
1	4,61	3,76	2,22	1,44	150,7	143,6	7,74	6,85
2	4,13	3,58	1,65	1,74	210,6	133,3	6,04	8,80
3	2,59	2,09	1,72	1,45	145,4	177,2	8,26	6,53
Moyenne	3,78	3,14	1,86	1,54	168,92	151,38	7,35	7,39
DS	1,05	0,92	0,31	0,17	36,21	22,92	1,16	1,23

	Test	Normalité	Homogénéité variances	Comparaison moyennes
		Shapiro-Wilk	Levene	t-Student
Protéases	$p < 0.05$	0.73	0.79	0.47
Alpha-amylase	$p < 0.05$	0.19	0.20	0.19
Catalase	$p < 0.05$	0.18	0.29	0.51
SOD	$p < 0.05$	0.79	0.86	0.96

Annexe 16. Liste des productions scientifiques

- 2017 : Participation au 2eme Workshop international sur l'écotoxicologie marine à l'ENSSMAL avec un POSTER : Biofloc preparation phase ; evolution of water quality parameters in Tilapia culture.
- 2020 : Participation au séminaire international à l'université de Ouargla «SIAQUA2019» avec un POSTER : Elevage du Tilapia du Nil « Oreochromis niloticus » en milieu biofloc : effet sur les paramètres de la croissance et de la nutrition.
- 2022 : Publication d'article scientifique dans la revue « Turkish Journal of Fisheries & Aquatic Science ». Titre: Effects of C/N Ratio on Water Quality, Growth Performance, Digestive Enzyme Activity and Antioxidant Status of Nile tilapia Oreochromis niloticus (Linnaeus, 1758) in Biofloc Based Culture System.
- 2023 : Article accepté pour publication dans La revue « Journal of Applied Aquaculture ». Titre: Biofloc technology application in Nile tilapia (Oreochromis niloticus, L.) hatcheries: Effect on the reproductive performance, offspring quality, growth performance and physiological parameters of fry.
- 2023 : Article en cours de publication dans la revue « HIPPOCAMPUS: Algerian journal of fisheries and aquaculture research ». Titre : Elevage du tilapia du Nile (Oreochromis niloticus) en système biofloc : suivi des paramètres du milieu et des performances zootechniques.