

Institut Agro Rennes Angers, site de Rennes

Année universitaire : 2023-2024

Spécialité : Ingénieur agronome

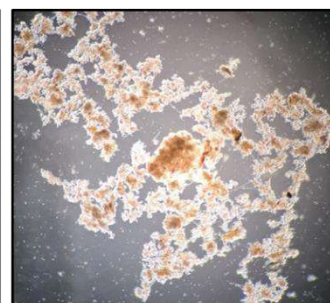
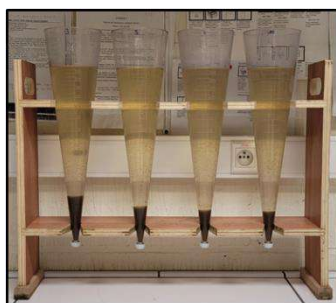
Spécialisation : Sciences halieutiques et aquacoles,
préparée à l'Institut Agro Rennes-Angers (Option
aquaculture)

**Mémoire de fin d'études de
l'ENSAT (Etudiant arrivé en M1)**

**Optimisation des performances de croissance en élevage biofloc
du tilapia du Nil (*Oreochromis niloticus*) : apport alimentaire
exogène et consommation des agrégats de floc *in situ***

Par : Amaël Bossan

Encadrement : Lydie Bambi



Soutenu à Rennes le 10 septembre 2024

Devant le jury composé de :

Président : Hervé Le Bris

Maître de stage : Carole Rougeot

Enseignant référent : Grégory Raymond

Jury extérieur : Joël Aubin

Les analyses et les conclusions de ce travail d'étudiant n'engagent que la responsabilité de son auteur et non celle de l'Institut Agro Rennes-Angers

Fiche de confidentialité et de diffusion du mémoire

Confidentialité

☒ Non ☐ Oui si oui : ☐ 1 an ☐ 5 ans ☐ 10 ans

Pendant toute la durée de confidentialité, aucune diffusion du mémoire n'est possible ⁽¹⁾.

Date et signature du maître de stage ⁽²⁾ : 13/08/2024, Prof. Carole Rougeot
(ou de l'étudiant-entrepreneur)



A la fin de la période de confidentialité, sa diffusion est soumise aux règles ci-dessous (droits d'auteur et autorisation de diffusion par l'enseignant à renseigner).

Droits d'auteur

L'auteur ⁽³⁾ **Bossan Amaël**

autorise la diffusion de son travail (immédiatement ou à la fin de la période de confidentialité)

☒ Oui ☐ Non

Si oui, il autorise

☐ la diffusion papier du mémoire uniquement⁽⁴⁾

☐ la diffusion papier du mémoire et la diffusion électronique du résumé

☒ la diffusion papier et électronique du mémoire (joindre dans ce cas la fiche de conformité du mémoire numérique et le contrat de diffusion)

(Facultatif) ☒ accepte de placer son mémoire sous licence Creative commons CC-BY-Nc-Nd (voir Guide du mémoire Chap 1.4 page 6)

Date et signature de l'auteur : 14/08/2024



Autorisation de diffusion par le responsable de spécialisation ou son représentant

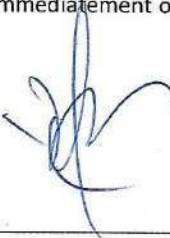
L'enseignant juge le mémoire de qualité suffisante pour être diffusé (immédiatement ou à la fin de la période de confidentialité)

☒ Oui ☐ Non

Si non, seul le titre du mémoire apparaîtra dans les bases de données.

Date et signature de l'enseignant :

10 sept 2024



Utilisation de l'Intelligence Artificielle (IA) pour la rédaction du mémoire

L'intelligence artificielle a été utilisée pour améliorer le texte ☐ Oui ☒ Non

Si oui, préciser pour quelle partie de texte et à quelles fins ?

Toute absence de déclaration précise sera considérée comme un manquement aux règles de l'éthique scientifique.

Date et Signature de l'auteur : 14/08/2024



(1) L'administration, les enseignants et les différents services de documentation de l'Institut Agro Rennes-Angers s'engagent à respecter cette confidentialité.

(2) Signature et cachet de l'organisme

(3). Auteur = étudiant qui réalise son mémoire de fin d'études

(4) La référence bibliographique (= Nom de l'auteur, titre du mémoire, année de soutenance, diplôme, spécialité et spécialisation/Option)) sera signalée dans les bases de données documentaires sans le résumé

Table des matières

REMERCIEMENTS.....	IV
LISTE DES TABLEAUX.....	V
LISTE DES FIGURES.....	VI
TABLE DES ABREVIATIONS	VII
INTRODUCTION	1
A. CONTEXTUALISATION.....	1
B. LA TECHNOLOGIE BIOFLOC	2
C. PRESENTATION DE L'ESPECE ELEVEE	5
D. PROBLEMATISATION	6
MATERIEL ET METHODES	7
A. DISPOSITIF EXPERIMENTAL	7
B. STABILISATION DU BIOFLOC.....	10
C. SUIVI ET GESTION DE PARAMETRES PHYSICO-CHIMIQUES DU MILIEU D'ELEVAGE.....	11
D. SUIVI DES PARAMETRES ZOOTECHNIQUES.....	15
E. ANALYSES STATISTIQUES	16
RESULTATS.....	16
A. QUALITE DE L'EAU ET CARACTERISTIQUES DU BIOFLOC	16
B. PERFORMANCES DE CROISSANCE	21
DISCUSSION	23
CONCLUSION.....	30
ANNEXES.....	VIII
BIBLIOGRAPHIE.....	XIV
RESUME.....	XX

Remerciements

Je souhaite remercier l'équipe de l'UGeRAA, dont les membres m'ont transmis leur passion pour la recherche et pour l'aquaculture et qui ont toutes et tous contribué à ce mémoire de fin d'études :

Madame Rougeot Carole qui m'a accompagné tout au long de ce projet de fin d'étude en sa qualité de maître de stage, et qui m'a offert l'opportunité de travailler dans cette formidable équipe. Madame Lydie Bambi, doctorante à l'UGeRAA, pour l'aide qu'elle m'a prodiguée dans les moments charnières.

Messieurs Prignon Christian, Neutjens Sacha et Gennotte Vincent pour leurs précieux conseils scientifiques et techniques. Mesdames Sabbe Justine et Noel Alicia, Messieurs Colson Dylan et Bossuyt Jiri pour leur soutien.

Je remercie aussi mes professeurs de l'Institut Agro Rennes, et en particulier Messieurs Sadoul Bastien et Le Bris Hervé pour la qualité de leur enseignement, sans quoi la réussite de ce travail de recherche aurait été compromise.

Enfin, je veux dédier ce travail à mon père, Philippe, qui aurait adoré lire et comprendre mon travail, et pour qui le dévouement à sa famille n'avait d'égal que sa passion pour la vie aquatique.

Liste des tableaux

Tableau 1. Résumé des différents traitements expérimentaux	8
Tableau 2. Valeurs limites et fréquences de mesure pour les paramètres du biofloc	14
Tableau 3. Valeurs limites et fréquences de mesure pour les paramètres du circuit ouvert	14
Tableau 4. Température (Temp.), oxygène dissous (DO), pH, alcalinité (Alca.) et conductivité (Cond.) pour l'élevage du tilapia du Nil (moyenne $\pm$ écart type, n=3)	17
Tableau 5. Ammonium (NH_4^+), nitrites (NO_2^-), nitrates (NO_3^-), matières en suspension (MES) et volume de floc (V_f) pour l'élevage du tilapia du Nil (moyenne $\pm$ écart type, n=3).	20
Tableau 6. Taux de survie (TS), taux de croissance spécifique (SGR), taux de conversion alimentaire (FCR), rendement (Rdt) et coefficient de Fulton (K) pour l'élevage du tilapia du Nil (moyenne $\pm$ écart type, n=3).	22

Liste des figures

Figure 1. Schéma présentant le fonctionnement global d'un système d'élevage en biofloc (adapté de Debbarma et al., 2023).....	4
Figure 2. Photographie des bio-balles utilisées (source personnelle, laboratoire UGeRAA le 15/06)	7
Figure 3. Plan de la salle d'expérimentation (non à l'échelle).....	8
Figure 4. Graphique présentant l'évolution des concentrations en NH_4^+ , NO_2^- et en agrégat de floc dans le milieu d'élevage en période pré-expérimentale (moyenne sur l'ensemble des traitements).....	11
Figure 5. Photographie de l'outil de mesure (cônes Imhoff) de la concentration en solides décantables (source personnelle, laboratoire UGeRAA le 11/06).....	12
Figure 6. Graphique présentant l'évolution du volume de floc au cours du temps dans les 4 traitements expérimentaux (moyenne $\pm$ écart-type, $n=3$).....	18
Figure 7. Graphique présentant l'évolution de la concentration en nitrates au cours du temps dans les 4 traitements expérimentaux (moyenne $\pm$ écart-type, $n=3$).....	19
Figure 8. Graphique présentant l'évolution de la concentration en nitrites au cours du temps dans les 4 traitements expérimentaux (moyenne $\pm$ écart-type, $n=3$).....	19
Figure 9. Graphique présentant l'évolution du taux de survie cumulé au cours du temps dans les 4 traitements expérimentaux (moyenne $\pm$ écart-type, $n=3$)	21
Figure 10. Graphique présentant l'évolution du poids corporel moyen au cours du temps dans les 4 traitements expérimentaux (moyenne $\pm$ écart type, $n=90$)	22
Figure 11. Photographies des agrégats de floc observés au microscope ($\times 400$) : unités expérimentales 3 (a) et 6 (b) (source personnelle, laboratoire UGeRAA le 14/07)	24

Table des abréviations

BFT : « BioFloc Technology », élevage biofloc

FAO : « Food and Agriculture Organization », Organisation pour l'alimentation et l'agriculture

OCDE : Organisation de Coopération et de Développement Economiques

ODD : Objectif de Développement Durable

FEWC : « Food-Energy-Water-Carbon », aliment-énergie-eau-carbone

RAS : « Recirculated Aquatic System », système aquacole recirculé

C/N : rapport Carbone/Azote

SGR : « Specific Growth Rate », taux de croissance spécifique

FCR : « Food Conversion Ratio », taux de conversion alimentaire

UGeRAA : Unité de Gestion des Ressources Aquatiques et Aquaculture

LED : « Light-Emitting Diode », diode électroluminescente

MES : Matières En Suspension

Introduction

A. Contextualisation

L'aquaculture est aujourd'hui l'un des secteurs majeurs de l'industrie alimentaire et se situe au cœur des enjeux actuels de lutte contre le déficit alimentaire et de développement durable. Que ce soit l'accroissement de la population, l'augmentation de la demande alimentaire ou la dégradation de l'environnement (Bank, Metian, Swarzenski 2020), l'aquaculture est souvent associée aux grands enjeux actuels, considérée comme une solution pour les uns et comme une cause pour les autres.

Avec l'augmentation de la demande en protéines animales (Henchion et al. 2017), la consommation mondiale d'aliment d'origine aquatique a quintuplée en presque 60 ans et en 2019, 17% des protéines animales étaient fournies par les produits de la pêche et de l'aquaculture. L'aquaculture connaît donc un développement conséquent avec des tonnages mondiaux qui ont augmenté de 204% entre 2000 et 2022 pour atteindre 130,9 millions de tonnes. Pour la première fois en 2022, la production des animaux aquatiques par l'aquaculture est devenue majoritaire en comparaison aux captures des pêches (51% de la production mondiale soit 94,4 millions de tonnes)(« The State of World Fisheries and Aquaculture 2024 », 2024).

Même si les projections réalisées par la FAO (Organisation pour l'Alimentation et l'Agriculture) prévoient un tassement de la croissance, nous devrions atteindre une production aquacole d'animaux aquatiques de 106 millions de tonnes en 2030 (augmentation de 12,2% par rapport à 2022). Ainsi, la part des espèces d'élevage aquacole dans la production halieutique devrait passer de 51% en 2022 à 53% en 2030 (« The State of World Fisheries and Aquaculture 2022 », 2022).

Toutefois, l'aquaculture fait face à des problématiques économiques et notamment celle du coût de l'aliment. En effet, l'aliment représente 30 à 60% des coûts de production dans la plupart des systèmes aquacoles (Shipton & Hasan 2013) et on constate depuis quelques années une augmentation du prix des farines et huiles de poisson (augmentation respective de 300% et 400% entre 2000 et 2020). Ces fortes variations sont liées à la raréfaction des ressources et l'augmentation de la demande, ce qui constitue un problème majeur au regard de l'importance des farines et huiles de poisson dans l'aliment utilisé en aquaculture conventionnelle (« Perspectives Agricoles de L'OCDE et de la FAO 2023-2032 », 2023).

Si l'aquaculture participe grandement à la sécurité alimentaire (ODD 2) et à d'autres objectifs de développement durable mis en place par l'Organisation des Nations Unies (ODD 14 « vie aquatique » notamment), son expansion fait toutefois émerger un ensemble de problématiques environnementales. Que ce soit par la consommation d'eau ou d'énergie, l'émission de gaz à effet de serre ou encore la pollution du milieu naturel par les effluents, la durabilité de l'aquaculture est régulièrement mise en cause (Martinez-Porchas & Martinez-Cordova, 2012 ; Belton et al., 2020). L'index de durabilité FEWC : « food-energy-water-carbon », réalisé par Jiang et al. (2022) accorde un score de 26/100 à l'aquaculture, faisant d'elle une activité peu durable écologiquement au regard de cet index.

Plus précisément, l'aquaculture semi-intensive et intensive sont souvent pointées du doigt en raison d'une consommation d'eau excessive que l'on estime à 122,6 km³ d'eau douce en 2018 (Jiang et al. 2022). Si le système aquacole recirculé (RAS) permet de réutiliser entre 90 et 99% de l'eau d'élevage (Murray et al, 2014), cette méthode ne répond pas à la problématique de consommation énergétique puisque selon d'Orbcastel, Blancheton et Aubin (2009), la consommation énergétique d'un système RAS (16 kWh/kg) est 24 à 40% supérieure à celle d'un système en circuit ouvert (10-12 kWh/kg). L'accumulation des effluents pose elle aussi question dans le cas d'un système RAS, tout comme la gestion des eaux rejetées chargées en composés azotés polluants selon Roques et al. (2021).

En réponse à ces enjeux considérables, de nouvelles techniques d'élevage apparaissent. Parmi ces systèmes émergents figurent l'aquaponie et la technologie biofloc (BFT). L'aquaponie est un système qui combine l'élevage d'animaux aquatiques en RAS et la culture de plantes. Ces dernières puisant les composés azotés dans l'eau issue de l'élevage des organismes aquatiques. Cette technique répond à la problématique de demande alimentaire tout en étant plus respectueuse de l'environnement (économie d'eau, gestion des déchets azotés)(Ibrahim et al. 2023). La technologie biofloc est basée sur la reconstitution d'un microenvironnement naturel, dans lequel les microorganismes (principalement les bactéries hétérotrophes) permettent une filtration plus économique de l'eau et apportent une source alimentaire complémentaire aux poissons. Lorsqu'on associe l'hydroponie à la technologie biofloc (qui remplace donc la filtration biologique classique d'un système RAS), cela permet d'obtenir un système que Pinho et al. (2020) ont récemment appelé système « floconique », encore peu étudié à ce jour. Le cœur de mon travail se centre sur ce système d'élevage en biofloc, qui selon Emerenciano et al. (2017) constitue la nouvelle « Blue Revolution » et offre certaines réponses aux problématiques évoquées ci-dessus. En effet, le BFT présente plusieurs avantages majeurs : (i) diminution drastique de la consommation d'eau et diminution des rejets d'effluents d'élevages riches en composés azotés polluants (ii) diminution de la consommation d'aliment par apport de protéines « *in situ* » (iii) diminution des risques liés aux pathogènes par compétition avec les microorganismes qui le composent (Emerenciano et al., 2017).

B. La technologie biofloc

1. *Définition et principe*

La technologie biofloc est un système d'élevage intensif en milieu fermé dans lequel l'eau est chargée d'agrégats (flocs) formés par des microorganismes (bactéries, algues, protozoaires, copépodes, etc.) associés à la matière organique résiduelle du système telle que des aliments non consommés et des fèces (Emerenciano et al., 2011, 2017).

La technologie biofloc permet, d'une part, un recyclage des déchets azotés via la nitrification réalisée par les bactéries autotrophes et, d'autre part, la production de protéines par les bactéries hétérotrophes dont le développement et l'activité dépendent en grande partie du rapport carbone/azote (C/N) au sein du milieu d'élevage (Emerenciano et al., 2017).

Les microorganismes occupent donc un rôle primordial dans le maintien de la qualité du milieu d'élevage en jouant le rôle de filtre biologique (nitrification des déchets azotés) et en produisant des agrégats digestibles consommables riches en protéines et en lipides (Hargreaves 2013)(figure 1).

Ce système est particulièrement adapté aux espèces capables de consommer et de digérer les particules de floc, c'est-à-dire ayant un régime alimentaire micro-filtreur. De plus, ces espèces doivent tolérer une concentration élevée de solides dans l'eau (turbidité) et des conditions physico-chimiques fluctuantes. Ainsi, les organismes fréquemment élevés en biofloc sont les différentes espèces de crevettes, de carpes et de tilapias (Azim & Little, 2008 ; Hargreaves, 2013).

Cette technologie appliquée à l'élevage de tilapia permet de réduire de 18% le taux de conversion alimentaire et d'augmenter le taux de croissance spécifique (SGR) de 112% en comparaison avec un système RAS (Luo et al. 2014), tout en limitant la consommation d'eau. De plus, la présence d'une communauté bactérienne au sein du biofloc assure la biosécurité du milieu en limitant la propagation des pathogènes (Emerenciano et al., 2017).

2. Fonctionnement

Les agrégats (flocs) constitués de matière organique et de microorganismes sont maintenus dans la colonne d'eau en limitant le renouvellement d'eau au maximum (0,5 à 1,5% par jour) tout en apportant une aération importante pour maintenir les agrégats en suspension, ce qui limite les risques de formation de zones anaérobies et permet d'éviter que les agrégats de flocs ne viennent colmater les branchies des poissons (Hargreaves 2013). Cette forte oxygénation permet aussi de répondre aux besoins en oxygène des animaux d'élevage et des microorganismes, notamment pour des poissons juvéniles qui consomment 2,5 fois plus d'oxygène que les adultes (Sparks et al., 2003).

Toutefois, une trop forte agitation peut entraîner la fragmentation des particules de floc, modifiant ainsi la valeur nutritionnelle du floc (réduction du taux de protéines)(Ekasari et al., 2014). Il convient donc de maintenir un équilibre entre mise en suspension et désagrégation du floc.

Afin d'assurer le bon fonctionnement du biofloc et le maintien de la qualité de l'eau, il convient de mesurer régulièrement les différents paramètres physico-chimiques du milieu : température, oxygène dissous, pH, alcalinité, conductivité, matières en suspension et volume de floc. Plus particulièrement, en plus du niveau d'oxygène dissous, l'excès de matière en suspension et les trop fortes concentrations en composés azotés, toxiques à partir d'une certaine concentration, sont les deux préoccupations majeures dans la gestion d'un système biofloc en raison de leurs impacts négatifs sur la santé et la croissance des poissons (López-Olmeda, Sánchez-Vázquez, Fortes-Silva 2021)

Par ailleurs, l'alcalinité dans le système biofloc peut parfois décroître brusquement en raison de l'utilisation du carbone inorganique comme source d'énergie par les bactéries autotrophes. Ces dernières utilisent 3,57 g d'alcalinité pour nitrifier 1 g d'ammonium. La diminution de l'alcalinité peut résulter en de brusques fluctuations du pH néfastes pour le biofloc et l'espèce élevée (Ebeling, Timmons, Bisogni 2006).

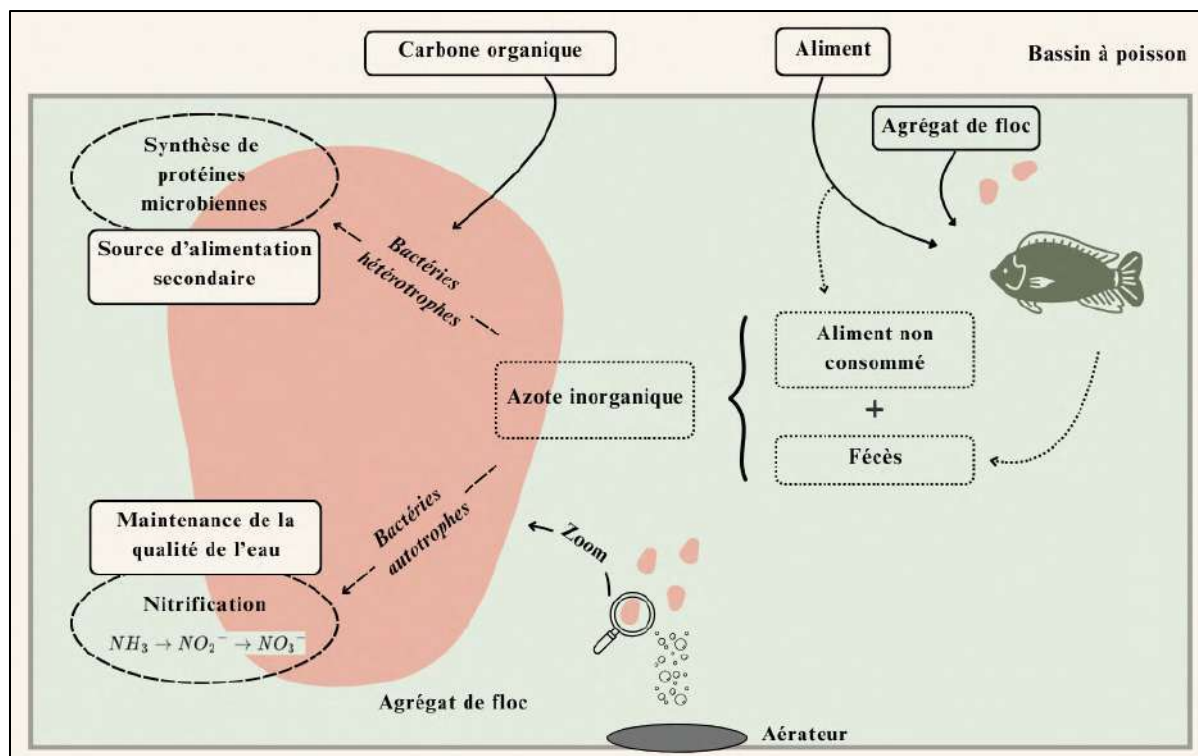


Figure 1. Schéma présentant le fonctionnement global d'un système d'élevage en biofloc
(adapté de Debbarma et al., 2023)

3. Rôle des microorganismes

Le biofloc est un milieu riche en microorganismes tels que les bactéries, le zooplancton, les copépodes et les protozoaires. Les 3 groupes les plus importants sont le phytoplancton, les bactéries autotrophes nitrifiantes et les bactéries hétérotrophes. Ils jouent trois rôles majeurs dans les bassins : (i) maintenance de la qualité de l'eau par la conversion des composés azotés toxiques en nitrates et en protéines consommables ; (ii) amélioration de l'efficacité du système d'élevage par diminution du FCR (taux de conversion alimentaire) et augmentation du taux de croissance ; (iii) amélioration de la biosécurité par compétition avec les pathogènes.

Les agrégats de flocs servent de substrats pour le développement des bactéries nitrifiantes (*Nitrobacter* et *Nitrosomonas*) qui jouent le rôle de filtre biologique en réalisant l'oxydation de l'ammonium en nitrite puis en nitrate. L'azote excrété est également utilisé par les bactéries hétérotrophes afin de produire des protéines microbiennes « *in situ* », consommables en permanence par le poisson. Ces agrégats constituent donc une source secondaire de nutrition pour le poisson puisqu'ils sont riches en protéines (25 à 50% de la matière sèche) et en lipides (0,5 à 15% de la matière sèche) et sont une bonne source de vitamines et de minéraux (Hargreaves 2013).

Afin de promouvoir l'activité des bactéries hétérotrophes, il est nécessaire d'entretenir un rapport C/N élevé au sein du milieu en ajoutant une source de carbone extérieure (Hargreaves 2013). Ceci permet également de maintenir l'alcalinité supérieure à 100 mg/l (Emerenciano et al., 2017).

4. Rapport C/N

Le rapport C/N au sein du milieu d'élevage est un paramètre important car il s'agit d'un moyen indirect de contrôle de la qualité de l'eau, et plus particulièrement le contrôle de la concentration en azote inorganique. En effet, les bactéries hétérotrophes du biofloc assimilent l'azote pour leur croissance et le carbone inorganique pour leur métabolisme (respiration, mouvement, digestion etc.), la croissance et la production de nouveaux matériaux cellulaires (Avnimelech 2009).

On quantifie le carbone inorganique présent dans l'eau à l'aide du ratio C/N. Ce dernier dépend de l'aliment utilisé, puisque moins un aliment est riche en protéines, plus son ratio C/ N est élevé. Ce ratio dépend également de la capacité des individus élevés à consommer et assimiler la nourriture distribuée (seulement 20 à 25% des protéines présentes dans l'alimentation sont assimilées par le poisson) et de la capacité des bactéries à assimiler l'azote inorganique présent dans le milieu d'élevage (Salin & Vinh 2023).

Pour favoriser l'assimilation de l'azote par la communauté bactérienne, il est donc nécessaire d'entretenir un rapport C/N élevé au sein du milieu en ajoutant une source de carbone extérieure. Cette source peut être diverse (amidon, mélasse, bagasse, etc.), mais on privilégiera des sucres simples afin d'obtenir des réponses rapides aux pics de composés azotés (Hargreaves 2013).

L'ajout de carbone, s'il permet de promouvoir l'activité des bactéries hétérotrophes et donc d'améliorer l'efficacité du système de recyclage des résidus azotés (McCusker et al. 2023), ne doit pas être excessif, sinon il peut entraîner un développement trop important des agrégats de floc pouvant causer un encombrement des branchies et une diminution de la disponibilité en O₂ (Hargreaves 2013).

La gestion de ce ratio est divisée en deux phases : (i) ratio C/N élevé (15-20:1) pendant la phase de formation du biofloc afin de stimuler le développement des communautés bactériennes (ii) ratio C/N entre 6:1 et 10:1 après la stabilisation du biofloc (Ebeling, Timmons, Bisogni 2006).

C. Présentation de l'espèce élevée

Le tilapia est la troisième espèce de poisson la plus élevée dans le monde avec 6,19 millions de tonnes en 2020 dont 90% de tilapia du Nil (*Oreochromis niloticus*, Linnaeus 1758). Si sa production a quadruplé au cours de la dernière décennie, c'est en grande partie grâce à sa capacité d'adaptation à une grande diversité de systèmes d'élevage, des plus extensifs aux plus intensifs, dans une large gamme de conditions environnementales (Wang & Lu, 2015 ; « The State of World Fisheries and Aquaculture 2022 », 2022).

Selon Mashai et al. (2016), le tilapia du Nil est capable de supporter des gammes de température et de pH très larges (respectivement 14°C-31°C et 5-11) et de faibles concentrations en oxygène dissous tout en continuant à croître (jusqu'à 3 mg/l). Il supporte également une forte concentration en solides dans l'eau, en ammonium, en nitrites, faisant de lui un candidat idéal pour le système biofloc. Son régime alimentaire microphage à tendance omnivore lui permettant de consommer les agrégats de floc et sa capacité à digérer les protéines microbiennes font de lui une espèce particulièrement adaptée à l'élevage en biofloc.

D. Problématisation

Nos travaux associent deux objectifs qui découlent directement des enjeux associés à l'aquaculture. Un défi de gestion de l'alimentation, afin d'optimiser la croissance et la productivité, et un défi de gestion du milieu d'élevage et de ses paramètres afin de maintenir la qualité du milieu. Ceci mène à la question suivante :

Pour le tilapia du Nil élevé en biofloc, quel rapport entre apport alimentaire exogène et consommation des agrégats de floc *in situ* permet d'obtenir des performances de croissances optimales ?

Ces objectifs seront atteints en étudiant différents niveaux d'apports alimentaires pour l'élevage de juvéniles de tilapia du Nil en système biofloc, par l'analyse des paramètres de performances de croissance des poissons, en relation avec la qualité et les caractéristiques du milieu d'élevage.

Matériel et méthodes

A. Dispositif expérimental

L'étude a été menée au laboratoire UGeRAA (Unité de Gestion des Ressources Aquatiques et Aquaculture) de l'Université de Liège, situé à Tihange, en Belgique, sur une période de 9 semaines, du 21 mai au 24 juillet 2024. Cette période comprend une semaine d'acclimatation et 8 semaines expérimentales.

1. Design expérimental

Le dispositif expérimental est constitué de 12 bacs de 130 litres en fibre de verre (polyester), de forme sub-carrée, recouverts d'un grillage afin d'éviter que les poissons ne sautent en dehors des bacs. Chaque bac est alimenté par de l'eau de puits (forage) ou en biofloc, selon le traitement. Dans les bacs en biofloc, 130 bio-balles (1 cm de diamètre) ont été ajoutés au début de la phase de stabilisation (figure 2) afin de favoriser le développement de la communauté bactérienne autotrophe.



Figure 2. Photographie des bio-balles utilisées (source personnelle, laboratoire UGeRAA le 15/06)

La température de l'air est maintenue à 26,5°C et la photopériode est fixée à 12L:12D à l'aide de lampes LED (diode électroluminescente) de 27 watts. Dans les bacs en biofloc, l'eau perdue lors des opérations de décantation de floc ou lors de soutirage est renouvelée. L'eau perdue par évaporation est renouvelée quotidiennement et représente 0,3% du volume de chaque bac par jour. Ce renouvellement (ajusté par mesure de la hauteur d'eau dans les bacs) est fait avec de l'eau de puits maintenue dans un bac de charge à 27°C. Dans les bacs en circuit ouvert, le taux de renouvellement est fixé à 30% par heure.

Un design aléatoire est utilisé pour réaliser les arrangements des bacs expérimentaux en définissant différents blocs basés sur le gradient de perturbation principal, à savoir l'ouverture de la porte. Cela a permis de limiter l'effet bloc au sein du design expérimental. L'intégration de ces objectifs et des contraintes liées à la disposition de salle a conduit au plan représenté dans la figure 3.

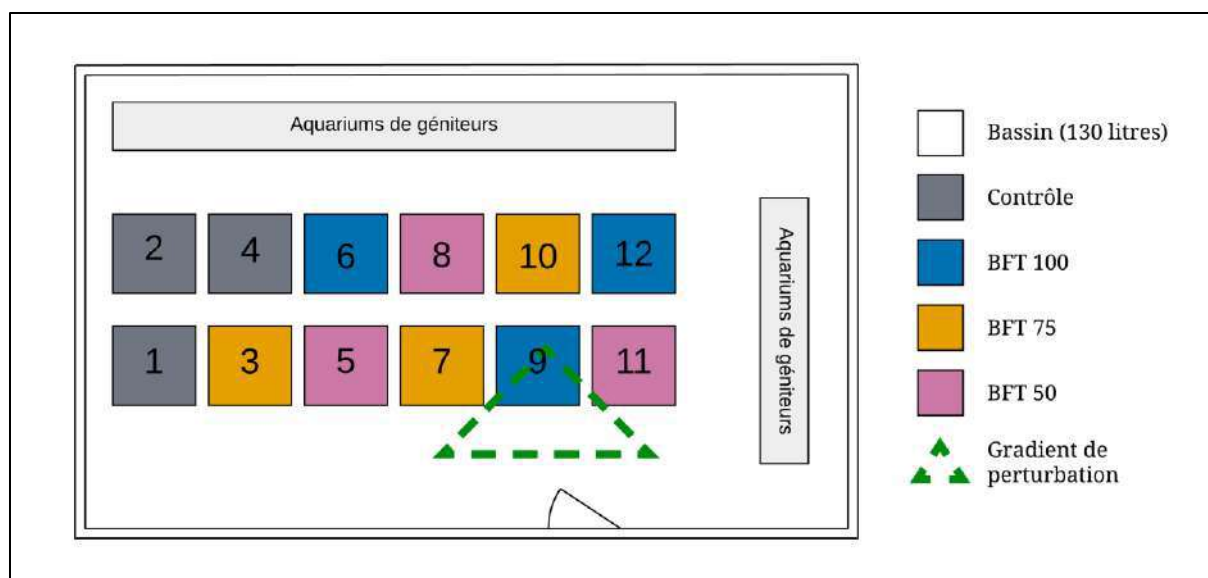


Figure 3. Plan de la salle d'expérimentation (non à l'échelle)

Au début de l'expérience, les alevins de tilapia (poids moyen initial = 11,4 g) sont placés dans chacun des bacs expérimentaux à une densité de 6,2 kg/m³, ce qui représente 70 individus par bac et 840 individus au total.

L'étude porte sur le facteur d'expérience « niveau d'apport alimentaire » décliné en 4 modalités traitées en triplica. Le tableau 1 reprend les différents traitements.

1. Traitement témoin en circuit ouvert : 100% de la ration alimentaire (bacs 1, 2 et 4)
2. BFT100 (traitement expérimental en biofloc) : 100% de la ration alimentaire (bacs 6, 12 et 9)
3. BFT75 (traitement expérimental en biofloc) : 75% de la ration alimentaire (bacs 3, 7 et 10)
4. BFT50 (traitement expérimental en biofloc) : 50% de la ration alimentaire (bacs 5, 8 et 11)

Tableau 1. Résumé des différents traitements expérimentaux

Traitement	Contrôle	BFT100*	BFT75*	BFT50*
Biomasse initiale (g)	800 ± 0,4	800 ± 0,4	800 ± 0,4	800 ± 0,4
Densité initiale (kg/m ³)	6,2	6,2	6,2	6,2
Nombre d'individus	70	70	70	70
Niveau d'apport alimentaire	100%	100%	75%	50%

Note : *BFT = Technologie biofloc

La quantité journalière de nourriture distribuée dans chaque bac est appelée "ration alimentaire". La ration initiale correspond à 3% de la biomasse du bac, réajustée tous les 14 jours (Azim & Little 2008) après la pêche de contrôle, multipliée par le niveau d'apport alimentaire correspondant au traitement. Cette valeur de 3% n'est pas fixe puisqu'elle dépend du comportement de nourrissage et des conditions physico-chimiques. Ainsi, après un mois d'expérience, nous avons diminué la ration à 2% de la biomasse (toujours pondérée par le niveau d'apport alimentaire) en raison de concentrations en ammonium et en nitrites trop élevées (respectivement 4 mg/l et 5 mg/l).

Par ailleurs, entre deux pêches contrôles, la ration alimentaire du jour n est augmentée quotidiennement (par rapport à la ration du jour $n-1$) afin de suivre la croissance du tilapia du Nil et ainsi d'éviter un réajustement trop brusque après la pêche contrôle (Mélard, 1986). La ration distribuée est calculée de la manière suivante :

Ration alimentaire initiale (RA_0) = $B \times 0,03 \times NAL$

- B : Biomasse du bac (g)
- NAL : Niveau d'apport alimentaire (%)

Ration alimentaire au jour n (RA_n) (g) = $RA_{n-1} + SGR \times RA_{n-1}$

- RA_{n-1} : Ration alimentaire au jour $n-1$ (g)
- SGR : Taux de croissance spécifique (%/j)

Tout au cours de l'expérience, les poissons sont nourris avec un aliment de granulométrie 2 mm (Advance, Alltech®Coppens) en accord avec les préconisations de la FAO (2024). Celui-ci est composé à 50% de protéines brutes et à 15% de lipides. La composition détaillée de cet aliment est reprise en annexe I. La ration est divisée en 3 parts égales distribuées respectivement à 9 heures, 13 heures et 16 heures.

2. *Matériel biologique*

La cohorte d'alevins utilisée est issue de deux pontes obtenues au sein du laboratoire UGeRAA (les 18 et 20 mars 2024) à partir de la souche UGeRAA - Chitralada par fécondation naturelle en aquarium. Les œufs, récoltés dans la bouche des femelles, sont incubés pendant 10 jours dans l'écloserie à bouteilles de Zug (27°C). Les 1044 alevins sont répartis dans 3 aquariums de 50 litres (le 28 mars 2024), à 27°C. Le tilapia présentant un dimorphisme sexuel de croissance important en faveur des mâles (supérieur à 50%) et afin d'éviter une hétérogénéité de croissance entre les mâles et les femelles, l'expérimentation sera réalisée avec des alevins 100% mâles (Chakraborty et al., 2011). Pour ce faire, une inversion de sexe est réalisée en utilisant de la 17 α -méthyltestostérone (60 mg/kg d'aliment) diluée dans de l'alcool éthylique (300 ml/kg d'aliment), mélangée à l'aliment pour alevins (granulométrie variable dans le temps : 0,2-0,3 mm, 0,3-0,5 mm, 0,5-0,8 mm) et laissé évaporé 24h avant l'utilisation.

L'aliment est distribué à satiété à raison de 7 à 8 nourrissages par jour. Les détails de la composition de cet aliment pré-expérimental sont présentés en annexe I. Le sexe-ratio à la suite de cette inversion est évaluée grâce à un sexage : 86% de tilapias mâles ont été obtenus.

B. Stabilisation du biofloc

Le biofloc expérimental utilisé est issu d'un biofloc solution mère qui est maintenu à l'UGeRAA depuis mars 2021. Le biofloc est inoculé dans les 9 bacs expérimentaux correspondants aux 3 traitements (BFT100, BFT75, BFT50) le 06/03/2024. Chaque bac est rempli de 120 litres d'eau du forage et de 10 litres d'eau de la solution mère de biofloc.

Pour stabiliser le milieu d'élevage, 5 tilapias (souche Chitralada) de 100 g (densité de 5 kg/m³) sont placés dans les bacs expérimentaux. Ces poissons ont pour rôle de favoriser la prolifération du biofloc, le développement des bactéries nitrifiantes et contribuent ainsi à la stabilisation initiale du biofloc (Emerenciano et al., 2011). Pendant les 4 premières semaines, 150 à 200 ml d'agrégats de floc de la solution mère sont ajoutés dans chaque bac afin de favoriser le développement du biofloc. Deux millilitres de bactéries nitrifiantes par bac (Bactuur Filter Start, Colombo®) sont ajoutés une à deux fois par semaine lorsque les valeurs de nitrites dépassent 3 mg/l.

Le nourrissage a démarré le 13/03/2024 à une ration de 0,3% de la biomasse. Cette ration est augmentée progressivement tout au long de la phase de stabilisation jusqu'à atteindre 3% de la biomasse. Selon Hargreaves (2013), il convient de ne pas augmenter trop rapidement le taux de nourrissage afin de limiter les pics de concentration des substances azotées toxiques à partir d'une certaine concentration. L'ajout quotidien de sucre, ici équivalent à 100% de la ration alimentaire au démarrage, puis progressivement réduite à un tiers de la ration alimentaire, permet de stimuler l'activité des bactéries hétérotrophes qui participent à la stabilisation du biofloc.

Cette phase de stabilisation dure 7 semaines (du 12/03/2024 au 20/05/2024) et a pour objectif de stabiliser les paramètres physico-chimiques du système. Plus précisément, cette stabilisation se caractérise par l'augmentation du volume de floc jusqu'à 25 ml/l et la stabilisation des concentrations en ammonium et en nitrites jusqu'à des concentrations inférieures à 1 mg/l pour ces deux composés (De Schryver et al., 2008 ; Emerenciano et al., 2017). Ce processus de stabilisation est mis en évidence sur la figure 4 ci-dessous.

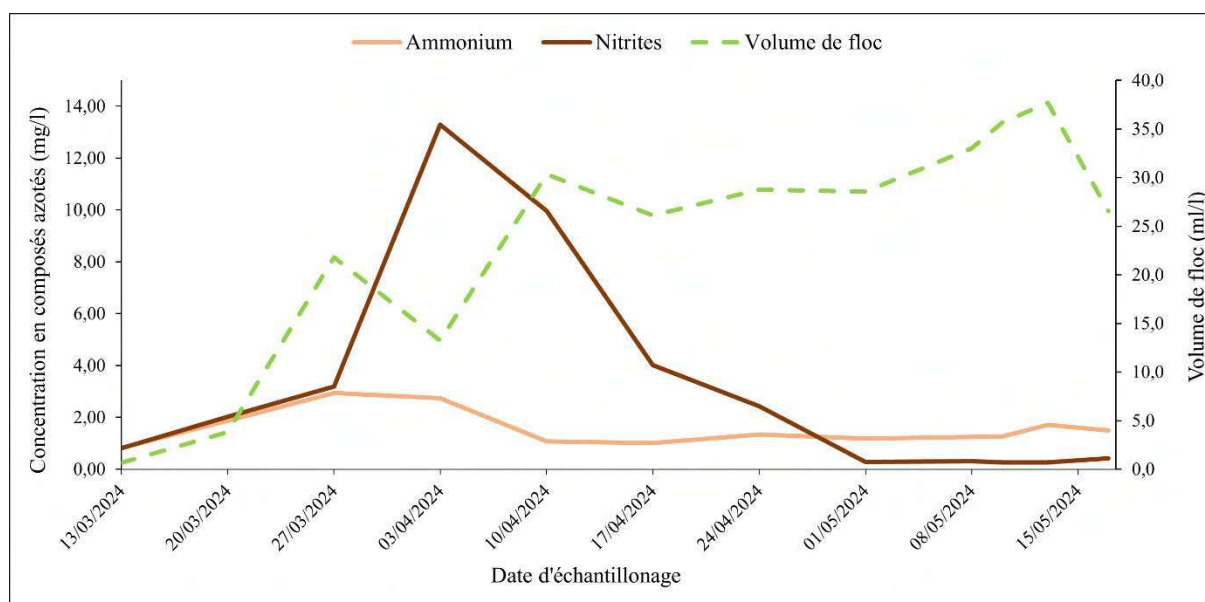


Figure 4. Graphique présentant l'évolution des concentrations en NH_4^+ , NO_2^- et en agrégat de floc dans le milieu d'élevage en période pré-expérimentale (moyenne sur l'ensemble des traitements)

C. Suivi et gestion de paramètres physico-chimiques du milieu d'élevage

Les mesures des différents paramètres de l'eau sont toutes effectuées entre 8 heures et 9 heures par le même opérateur, avec les mêmes instruments de mesures et à la même fréquence tout au long de l'expérience. Les valeurs limites de ces différents paramètres pour l'élevage en biofloc et le circuit ouvert sont présentées dans les tableaux 3 et 4. En plus de ces valeurs limites, on définit ci-dessous des valeurs ou gammes cibles pour les différents paramètres à partir de recherches bibliographiques et de communications personnelles.

1. *Température*

Chaque bac en biofloc est chauffé à l'aide d'une résistance de 100 watts contrôlée par un thermostat (PRO Heater - SuperFish®) réglé à 27°C. Dans les bacs témoins en circuit ouvert, l'eau est chauffée à 27°C dans le bac de charge associé au circuit. La température est mesurée quotidiennement à l'aide d'un oxy-thermomètre (Oxymètre 330 – Cellox 325 WTW®).

2. *Oxygène dissous et brassage du floc*

Chaque bac est équipé de deux aérateurs (Hi-Oxy Disk-SuperFish® 10 cm, 1,44 m³/h) afin de maintenir les particules de floes en suspension et la concentration en oxygène dissous supérieure à 6 mg/l (Hargreaves, 2013 ; López-Olmeda et al., 2021). La valeur de la concentration en oxygène dissous est mesurée quotidiennement à l'aide d'un oxy-thermomètre (Oxymètre 330 – Cellox 325 WTW®).

3. *Conductivité*

La conductivité doit être maintenue entre 1000 et 3000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et est mesurée quotidiennement à l'aide d'un conductimètre (Multimètre HQ40D – cellule de conductivité CDC401 Hach®).

Afin de freiner l'augmentation de la conductivité, une méthode de décantation est utilisée : 10 litres de l'eau du système est retirée, laissée decanter pendant une heure puis le surnageant (8 litres) est jeté tandis que les agrégats de floc sont réintroduits (2 litres)(Hargreaves 2013). Cette perte est compensée à l'aide de l'eau du puits.

4. Alcalinité et pH

L'alcalinité est mesurée 3 fois par semaine grâce à un titrage (Digital titrator Hach®) dont le protocole est présenté en annexe VI. Pour le circuit ouvert, la valeur cible est supérieure à 20 mg/l tandis que pour les bassins en biofloc, la valeur cible est entre 50 et 150 mg/l. Lorsque l'alcalinité est inférieure à la valeur seuil de 50 mg/l, le bicarbonate de soude (NaHCO_3) est utilisé pour tamponner le milieu : 250 g de bicarbonate par kilogramme d'aliment distribué lorsque le pH descend en dessous de 7. Le pH doit être maintenu entre 6,8 et 8. Les mesures de pH sont effectuées quotidiennement à l'aide d'un pH-mètre (pH-mètre 330 – électrode SenTix WTW®).

5. Concentration en solides décantables (volume de floc)

La concentration en solides décantables (ou volume de floc) est mesurée quotidiennement dans chacun des bacs en biofloc. Un litre du milieu d'élevage homogénéisé est prélevé, puis placé dans un cône Imhoff comme présenté en figure 5 (Hargreaves 2013). La solution est laissée à decanter 30 minutes puis le volume de floc est mesuré (figure 5). La valeur optimale à maintenir se situe entre 20 et 30 ml/l.

Afin de réduire le volume de floc (si supérieur à 30 ml/l), une méthode de décantation est utilisée afin d'en retirer une quantité suffisante : 10 litres de l'eau du système est retirée, laissée decanter pendant une heure puis le surnageant (8 litres) est réintroduit dans le bassin et les agrégats de floc sont jetés (2 litres)(Hargreaves 2013). Cette perte est compensée à l'aide de l'eau du puits.



Figure 5. Photographie de l'outil de mesure (cônes Imhoff) de la concentration en solides décantables (source personnelle, laboratoire UGeRAA le 11/06)

6. Concentrations en ammonium, nitrites et nitrates

Les concentrations en ammonium (spectrophotomètre DR/2010 Hach®, méthode Nessler) et en nitrites (spectrophotomètre DR/2010 Hach®, méthode diazotation) sont déterminées tous les 2 jours par spectrophotométrie. La concentration en nitrates est déterminée 1 fois par semaine par spectrophotométrie (spectrophotomètre DR/2010 Hach®, méthode réduction au cadmium). Les protocoles de ces trois mesures sont présentés respectivement en annexes III, IV et V. Pour l'ammonium et les nitrites, on cherche à maintenir les concentrations inférieures à 1 mg/l dans le circuit ouvert et dans les unités expérimentales en biofloc. Pour les nitrates, la concentration optimale est inférieure à 500 mg/l en biofloc et inférieure à 50 mg/l en circuit ouvert.

7. Matières en suspension (MES)

Les matières en suspension (MES) sont mesurées une fois par semaine à l'aide d'un protocole présenté en annexe II. Cela correspond à la masse sèche de solides en suspension dans un litre d'eau d'élevage. La valeur cible, en biofloc, se situe entre 200 et 500 mg/l et inférieure à 50 mg/l en circuit ouvert. Elles sont directement liées au volume de floc et sont donc gérées de la même manière.

8. Rapport C/N

La mélasse de canne sous forme liquide a été choisie comme source de carbone extérieure. La mélasse est un co-produit de l'industrie agro-alimentaire, facilement disponible et peu coûteuse. Elle est facilement dégradable et le sucre qui la compose est un sucre simple facilement assimilable. Elle doit cependant être ajoutée plus fréquemment qu'un sucre complexe, car elle se dégrade plus rapidement (Serra et al., 2015 ; Jamal et al., 2020). De plus, la mélasse se dissout facilement dans l'eau sans décanter trop rapidement (Khanjani, Mohammadi, Emerenciano 2022) et possède une teneur en carbone de 37,5% selon Serra et al. (2015).

La mélasse est ajoutée quotidiennement à 9 heures du matin dans chaque bac. La quantité distribuée correspond à un tiers de la masse de nourriture distribuée dans les bacs afin d'atteindre un ratio C/N environ égal à 12. La méthode de calcul utilisée est celle présentée dans les travaux d'Emerenciano et al. (2017).

Tableau 2. Valeurs limites et fréquences de mesure pour les paramètres du biofloc

Paramètres	Valeurs limites	Fréquences de mesure	Source(s)
Température (°C)	26-28	Journalière	Pinho et al., 2020
Oxygène dissous (mg/l)	> 6	Journalière	Hargreaves, 2013
pH	6,8-8	Journalière	Emerenciano et al., 2017
Conductivité (µs/cm)	1000-3000	Journalière	Pinho et al., 2020
Alcalinité (mg/l de CaCO ₃)	100-150	3×/semaine	Emerenciano et al., 2017, Hargreaves, 2013
Ammonium (mg/l)	< 1	3×/semaine	De Schryver et al., 2008
Nitrites (mg/l)	< 1	3×/semaine	Emerenciano et al., 2017
Nitrates (mg/l)	< 500	1×/semaine	Emerenciano et al., 2017
Volume de floc (ml/l)	25-50	Journalière	Emerenciano et al., 2017, Hargreaves, 2013
Matières en suspension (mg/l)	200-500	1×/semaine	Emerenciano et al., 2017, Hargreaves, 2013

Tableau 3. Valeurs limites et fréquences de mesure pour les paramètres du circuit ouvert

Paramètres	Valeurs limites	Fréquences de mesure	Source(s)
Température (°C)	28	Journalière	Emerenciano et al., 2021
Oxygène dissous (mg/l)	> 6	Journalière	Hargreaves, 2013
pH	7-9	Journalière	Emerenciano et al., 2017
Conductivité (µs/cm)	1000-2000	Journalière	Khanjani, Mohammadi, Emerenciano 2022
Alcalinité (mg/l de CaCO ₃)	> 20	3×/semaine	Communication personnelle
Ammonium (mg/l)	1	3×/semaine	Communication personnelle
Nitrites (mg/l)	1	3×/semaine	Communication personnelle
Nitrates (mg/l)	50	1×/semaine	Communication personnelle

D. Suivi des paramètres zootechniques

Les paramètres zootechniques calculés sont : le taux de survie (%), le gain de poids moyen (g), le taux de croissance spécifique (%/j), le taux de conversion alimentaire et le rendement (kg/m³/an). Des mesures de poids (balance PBS Kern®, e=0,01 g) et de longueur totale (règle à butée, ±1 mm) individuels sont réalisées tous les 14 jours afin de suivre l'évolution de la croissance, sur 30 individus dans chacune des unités expérimentales (communication personnelle). Les méthodes de calcul de ces différents paramètres sont reprises ci-dessous :

$$\textbf{Taux de survie (TS) (\%)} = \frac{N_f}{N_i} \times 100$$

- N_f : Nombre final de poissons
- N_i : Nombre initial de poissons

$$\textbf{Taux de croissance spécifique (SGR) (\%/j)} = \frac{\ln(M_{mf}) - \ln(M_{mi})}{t} \times 100$$

- M_{mf} : Masse moyenne finale (g)
- M_{mi} : Masse moyenne initiale (g)
- t : Temps d'expérience (jour)

$$\textbf{Taux de conversion alimentaire (FCR)} = \frac{RTD}{B_f - B_i}$$

- B_f : Biomasse finale (g)
- B_i : Biomasse initiale (g)
- RTD : Ration totale distribuée (g)

$$\textbf{Rendement (Rdt) (kg/m³/an)} = \frac{B_f - B_i}{V \times t} \times 365$$

- B_f : Biomasse finale (kg)
- B_i : Biomasse initiale (kg)
- V : Volume du bac (m³)
- t : Temps d'expérience (jour)

$$\textbf{Coefficient de condition de Fulton (K)} = \frac{M}{T^3}$$

- M : Masse de l'individu (g)
- T : Taille totale de l'individu (cm)

E. Analyses statistiques

Les différences entre les performances phénotypiques sur la croissance et les différences liées aux caractéristiques physico-chimiques du milieu d'élevage sont étudiées à l'aide d'une analyse de variance (ANOVA), une fois les hypothèses de normalité des résidus et de l'homogénéité des variances vérifiées (Sokal & Rohlf 2013). Dans le cas où l'hypothèse de normalité n'est pas vérifiée, un test de Krusk-Wallis est utilisé. Si les résultats sont significativement différents, les différences entre les traitements sont testées à l'aide d'un test post hoc que ce soit dans le cas de l'ANOVA ou de Krusk-Wallis (respectivement test de Tukey et test de Dunn Bonferroni). Un niveau de significativité $\alpha = 0,05$ est utilisé afin de déterminer la significativité des différences par paires dans le cas du test de Tukey. Un niveau de significativité $\alpha \approx 0,0083$ est utilisé pour le test de Dunn en accord avec la méthode de Bonferroni (Sokal & Rohlf 2013).

Résultats

A. Qualité de l'eau et caractéristiques du biofloc

1. *Température*

Conforme à la gamme proposée par Pinho et al. (2020) pour l'ensemble des traitements (26-28°C), la température est significativement plus faible pour le témoin (26,4°C) en comparaison aux traitements en biofloc. En outre, la température du traitement BFT75 (26,8°C) est significativement plus élevée que celle du traitement BFT100 (26,7°C), elle-même plus élevée que celle du BFT50 (26,6°C). Par ailleurs, on constate des variations de la température de l'eau au cours du temps, principalement entre 26,1°C et 27,2°C (90% des données).

2. *Oxygène dissous*

La concentration en oxygène dissous (DO) est significativement plus élevée dans le traitement BFT50 (7,3 mg/l) en comparaison aux traitements T0, BFT100 et BFT75 (moyenne des trois traitements à 7 mg/l). Pour chacun des traitements, la concentration moyenne en oxygène dissous est supérieure à 7 mg/l et se situe donc au-delà de la valeur limite inférieure proposée par Hargreaves (2013), qui est de 6 mg/l.

3. *Alcalinité et pH*

Concernant l'alcalinité, celle-ci est significativement plus élevée dans le témoin T0 en circuit ouvert (224 mg/l de CaCO_3) en comparaison aux traitements en biofloc (moyenne des 3 traitements à 52 mg/l). Par ailleurs, le niveau d'apport alimentaire n'a pas eu d'influence significative sur ce paramètre pour les traitements en biofloc. Même si la valeur moyenne pour les 3 traitements en biofloc est dans la gamme cible que définit au préalable (> 50 mg/l), on constate de brusques variations de l'alcalinité sur 24 heures de ± 40 mg/l pour les traitements en biofloc, avec une valeur minimale à 17 mg/l (BFT100).

De la même façon, le pH est significativement plus grand dans le témoin T0 (8,16) en comparaison aux traitements en biofloc, sans qu'il n'y ait de différences significatives entre les 3 traitements en biofloc. En élevage biofloc, on constate des variations assez brusques du pH, avec pour valeurs extrêmes 6,44 et 7,83 pour une valeur moyenne des 3 traitements à 7,45. Même si certaines de ces valeurs sont en dehors de la gamme proposée par Emerenciano et al. (2017)(6,8-8), cela reste assez rare (6 occurrences) et les valeurs moyennes pour chacun des traitements se situent bien dans cette même gamme.

4. Conductivité

La conductivité augmente de manière continue tout au long de l'expérience, de 1600 $\mu\text{S}/\text{cm}$ à 2300 $\mu\text{S}/\text{cm}$ environ. La conductivité est significativement plus faible (811 $\mu\text{S}/\text{cm}$) pour le témoin en circuit ouvert par rapport aux traitements en biofloc (moyenne des 3 traitements à 1963 $\mu\text{S}/\text{cm}$) et ne dépasse en aucun cas la valeur limite fixée au préalable par Pinho et al. (2020)(3000 $\mu\text{S}/\text{cm}$). Le niveau d'apport alimentaire en biofloc n'a pas eu d'effet significatif sur la conductivité.

Tableau 4. Température (Temp.), oxygène dissous (DO), pH, alcalinité (Alca.) et conductivité (Cond.) pour l'élevage du tilapia du Nil (moyenne $\pm$ écart type, n=3)

Traitement	Variable				
	Temp. ($^{\circ}\text{C}$)	DO (mg/l)	pH	Alca. (mg/l)	Cond. ($\mu\text{S}/\text{cm}$)
T0	26,4 $\pm$ 0,5 ^a	7,0 $\pm$ 0,5 ^a	8,16 $\pm$ 0,09 ^a	224 $\pm$ 12 ^a	811 $\pm$ 21 ^a
BFT100	26,7 $\pm$ 0,4 ^b	7,1 $\pm$ 0,4 ^a	7,48 $\pm$ 0,35 ^b	55 $\pm$ 28 ^b	1921 $\pm$ 269 ^b
BFT75	26,8 $\pm$ 0,3 ^c	7,0 $\pm$ 0,3 ^a	7,42 $\pm$ 0,31 ^{bc}	54 $\pm$ 24 ^b	1981 $\pm$ 256 ^b
BFT50	26,6 $\pm$ 0,4 ^d	7,3 $\pm$ 0,3 ^b	7,44 $\pm$ 0,22 ^c	47 $\pm$ 18 ^b	1987 $\pm$ 251 ^b
P-value	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001

Note : Dans chacune des colonnes, les moyennes accompagnées de lettres différentes sont significativement différentes entre elles selon le test de Dunn ($P < 0,0083$). L'absence de lettre indique une différence non significative.

5. Volume de floc et matières en suspension

Le niveau d'apport alimentaire a eu un effet significatif sur le volume de floc, puisque le celui-ci est significativement croissant avec l'augmentation du niveau d'apport alimentaire. On constate à l'aide de la figure 6 une forte instabilité du volume de floc, et ce quel que soit le traitement : celui-ci varie le plus souvent entre 20 et 34 ml/l (90% des données) et peut atteindre des valeurs extrêmes de 10 ml/l jusqu'à 42 ml/l dans certaines unités expérimentales.

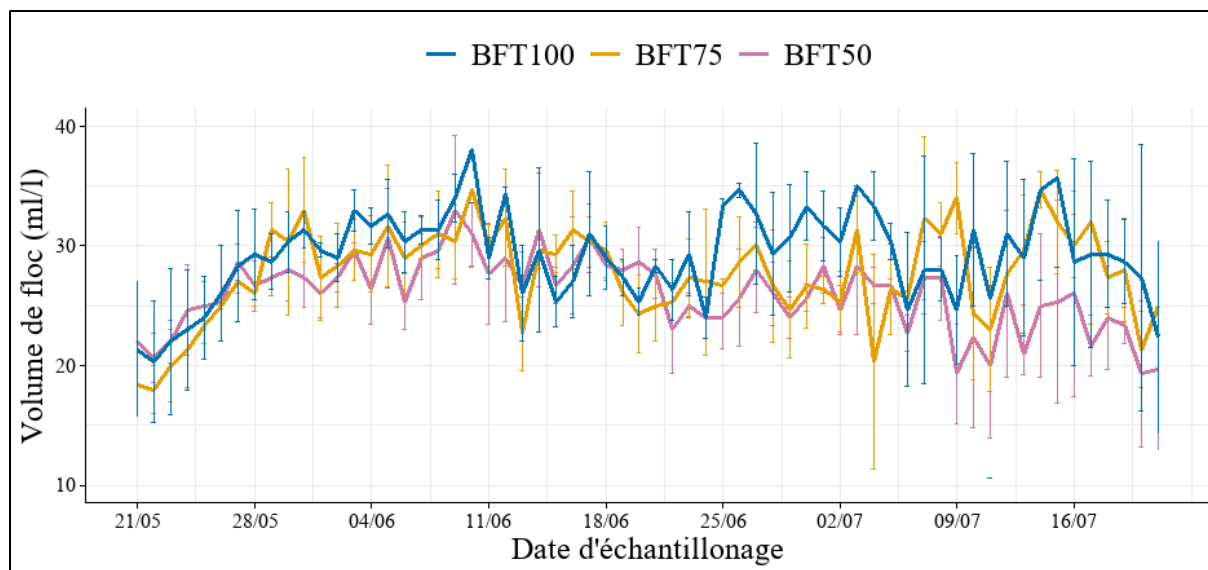


Figure 6. Graphique présentant l'évolution du volume de floc au cours du temps dans les 4 traitements expérimentaux (moyenne $\pm$ écart-type, $n=3$)

La concentration moyenne en MES est significativement plus élevée dans le traitement BFT100 (473 mg/l) en comparaison au traitement BFT50 (409 mg/l). Pour les MES, le traitement BFT75 ne diffère pas des deux autres traitements en biofloc (443 mg/l). De plus, la concentration en matières en suspension dans le circuit ouvert est significativement plus faible par rapport aux traitements en biofloc (16 mg/l). Si la concentration en matières en suspension est relativement stable au cours du temps dans les traitements BFT75, BFT50 et dans le témoin, le triplica BFT100 a connu de plus fortes variations avec une valeur moyenne à 288 mg/l et une valeur maximale à 688 mg/l.

6. Ammonium, nitrites et nitrates

Les concentrations en ammonium, en nitrites et en nitrates sont significativement plus faibles dans le témoin en circuit ouvert (respectivement 0,65 mg/l, 0,24 mg/l et 35 mg/l) en comparaison aux traitements expérimentaux en biofloc.

La concentration en ions ammonium du BFT100 n'est pas significativement différente des deux autres traitements en biofloc. Néanmoins, elle est significativement plus faible dans le traitement BFT50 en comparaison au traitement BFT75. Pour les concentrations moyennes en nitrites, elles ne diffèrent pas entre le traitement BFT50 et BFT100 tandis que celle du BFT75 est significativement plus élevée que les précédentes. Que ce soit pour l'ammonium ou les nitrites, les concentrations sont au-delà des valeurs limites tout au long de l'expérience (1 mg/l), et ce pour l'ensemble des traitements en biofloc (De Schryver et al., 2008; Emerenciano et al., 2017).

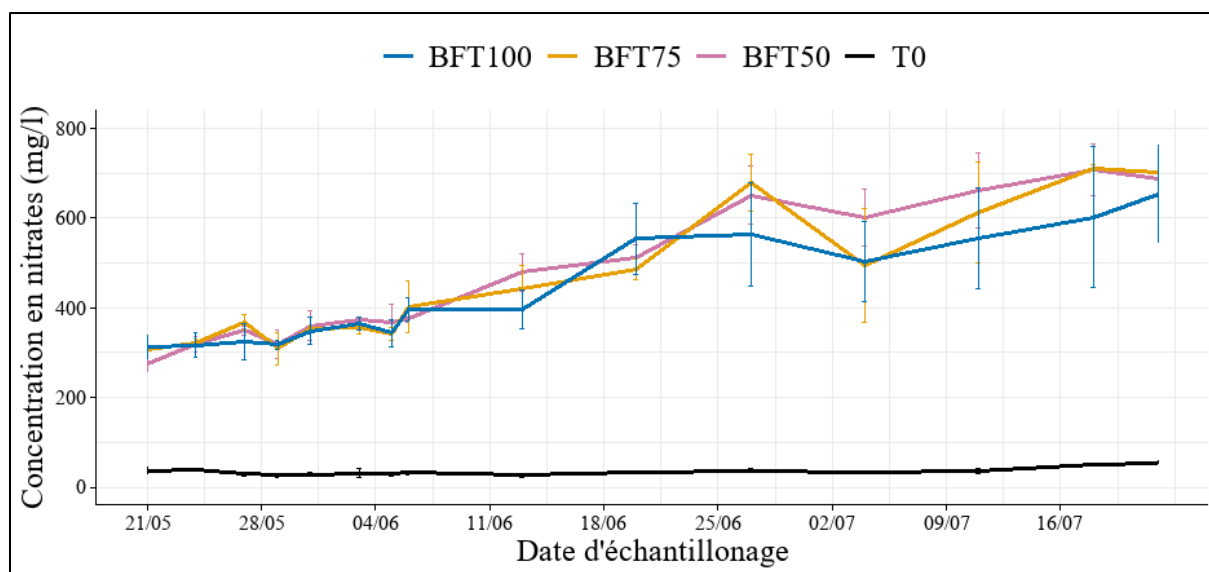


Figure 7. Graphique présentant l'évolution de la concentration en nitrates au cours du temps dans les 4 traitements expérimentaux (moyenne $\pm$ écart-type, n=3)

Le niveau d'apport alimentaire n'a pas eu d'effet significatif sur la concentration en nitrates pour les traitements en biofloc, et celle-ci n'a cessé de croître linéairement tout au long de l'expérience (figure 7). Nous avons dépassé la valeur limite de 500 mg/l dans l'ensemble des traitements en biofloc 5 semaines après le début de l'expérience pour atteindre 680 mg/l en fin d'expérience (moyenne des 3 traitements)(Emerenciano et al., 2017).

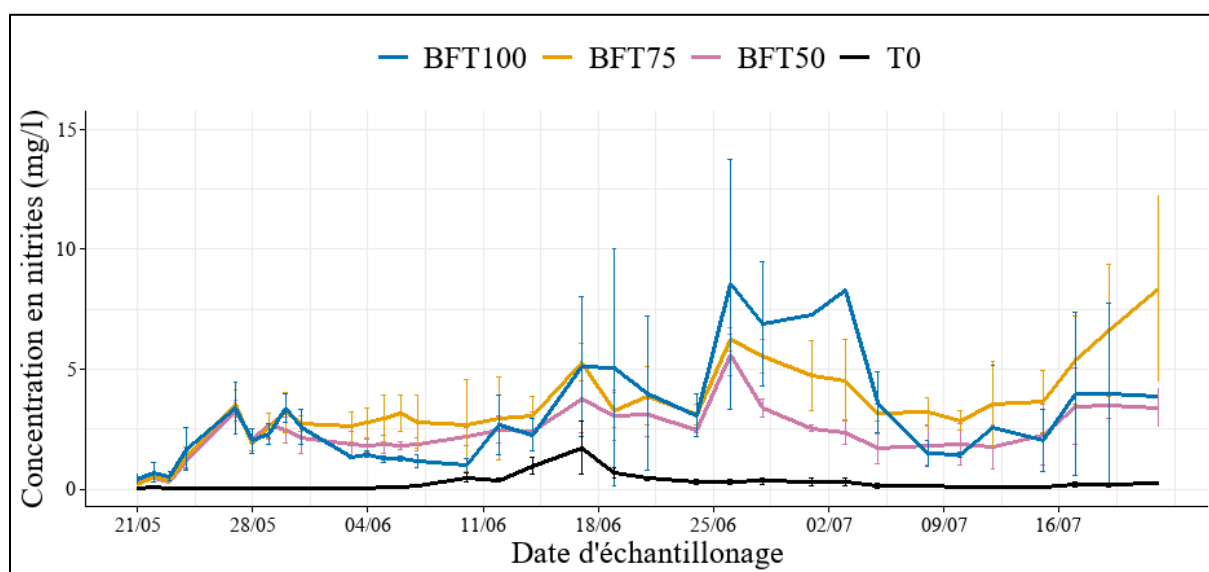


Figure 8. Graphique présentant l'évolution de la concentration en nitrites au cours du temps dans les 4 traitements expérimentaux (moyenne $\pm$ écart-type, n=3)

Pour l'ensemble des traitements en biofloc, on constate une stabilité des concentrations en NH_4^+ autour de la moyenne, avec toutefois des pics de concentration allant jusqu'à 4,68 mg/l pour le traitement sans restriction alimentaire (BFT100). Par ailleurs, la concentration en nitrites est très instable dans le temps, et ce pour l'ensemble des traitements en biofloc (figure 8). Cette instabilité se caractérise par de nombreux pics de concentrations en NO_2^- , qui sont toutefois plus intenses dans les traitements BFT100 et BFT75 puisqu'ils vont respectivement jusqu'à 8,55 mg/l et 8,34 mg/l au maximum. En outre, le témoin en circuit ouvert présente lui une stabilité des concentrations en composés azotés tout au long de l'expérience.

Tableau 5. Ammonium (NH_4^+), nitrites (NO_2^-), nitrates (NO_3^-), matières en suspension (MES) et volume de floc (V_f) pour l'élevage du tilapia du Nil (moyenne $\pm$ écart type, $n=3$).

Traitement	Variable				
	NH_4^+ (mg/l)	NO_2^- (mg/l)	NO_3^- (mg/l)	MES (mg/l)	V_f (ml/l)
T0	$0,65 \pm 0,19^a$	$0,24 \pm 0,38^a$	35 ± 9^a	16 ± 11^a	/
BFT100	$2,21 \pm 0,78^{bc}$	$3,05 \pm 3,43^b$	437 ± 133^b	473 ± 120^b	29 ± 6^a
BFT75	$2,25 \pm 0,63^b$	$3,42 \pm 2,01^c$	459 ± 152^b	443 ± 66^{bc}	28 ± 5^b
BFT50	$1,89 \pm 0,43^c$	$2,34 \pm 1,18^b$	469 ± 155^b	409 ± 67^c	26 ± 4^c
P-value	$< 0,0001$	$< 0,0001$	$< 0,0001$	$< 0,0001$	$< 0,0001$

Note : Dans chacune des colonnes, les moyennes accompagnées de lettres différentes sont significativement différentes entre elles selon le test de Dunn ($P < 0,0083$). L'absence de lettre indique une différence non significative.

B. Performances de croissance

1. Taux de survie

Le taux de survie moyen pour l'ensemble des traitements est de 96,5%. Celui-ci varie entre les différents traitements entre 98,1% et 92,9%, sans différence significative. Néanmoins, 68% des mortalités ont eu lieu dans les unités expérimentales 6, 9 et 8 donnant lieu à des taux de survie plus faibles dans ces dernières (respectivement 92,9%, 87,1% et 92,3%). L'évolution du taux de survie cumulé est présenté ci-dessous (figure 9).

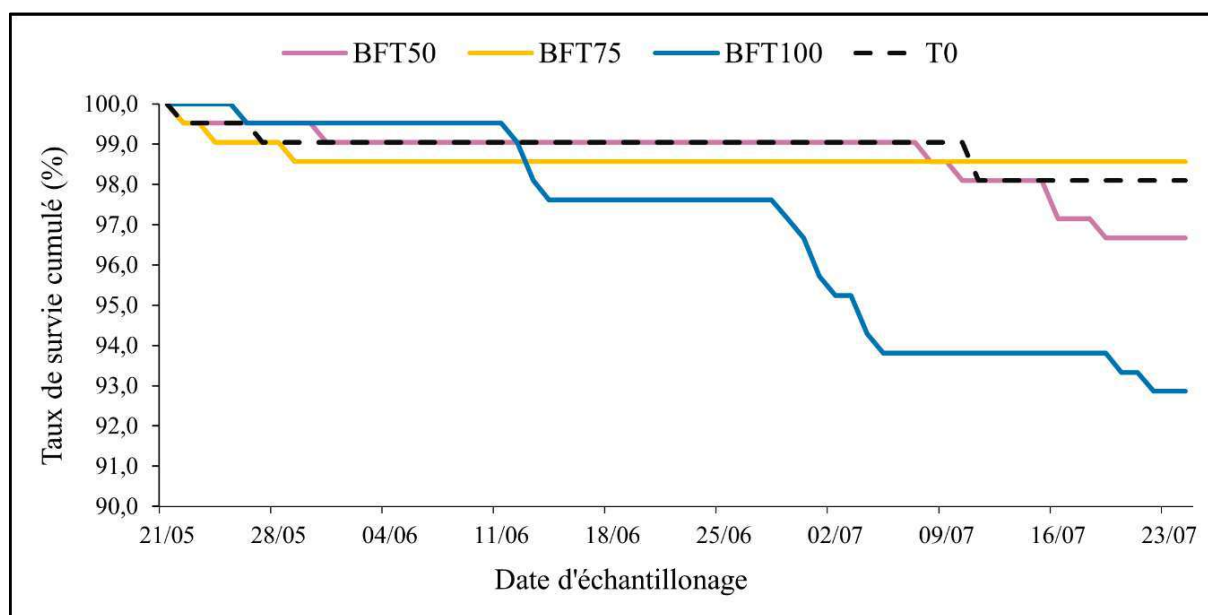


Figure 9. Graphique présentant l'évolution du taux de survie cumulé au cours du temps dans les 4 traitements expérimentaux

2. Taux de conversion alimentaire

Le taux de conversion alimentaire (FCR) du témoin en circuit ouvert (0,75) est significativement plus faible en comparaison aux traitements BFT100 et BFT50 mais n'est pas différent du taux de conversion alimentaire dans le BFT75 (0,89). Ce dernier n'est pas différent de celui du BFT100 (1,09). Le traitement le moins nourris, à savoir le BFT50, est significativement plus élevé pour le FCR en comparaison au traitement BFT75 (respectivement 1,13 et 0,89), mais il n'est pas différent du traitement sans restriction alimentaire.

3. Taux de croissance spécifique

Le taux de croissance spécifique (SGR) du témoin, sur 9 semaines d'expérience, est de 2,72 %/j. Il est significativement plus grand en comparaison aux traitements BFT100, BFT75 et BFT50 pour lesquels les SGR sont respectivement de 1,70 %/j et 1,92 %/j et 1,21 %/j. Le SGR du traitement le plus restrictif (BFT50) est significativement plus faible en comparaison aux deux autres traitements en biofloc (BFT100 et BFT75) pour lesquels le SGR n'est pas significativement différent. Les courbes de croissance réalisées à partir des mesures de poids sur 30 individus par unité expérimentale sont présentées ci-dessous (figure 10).

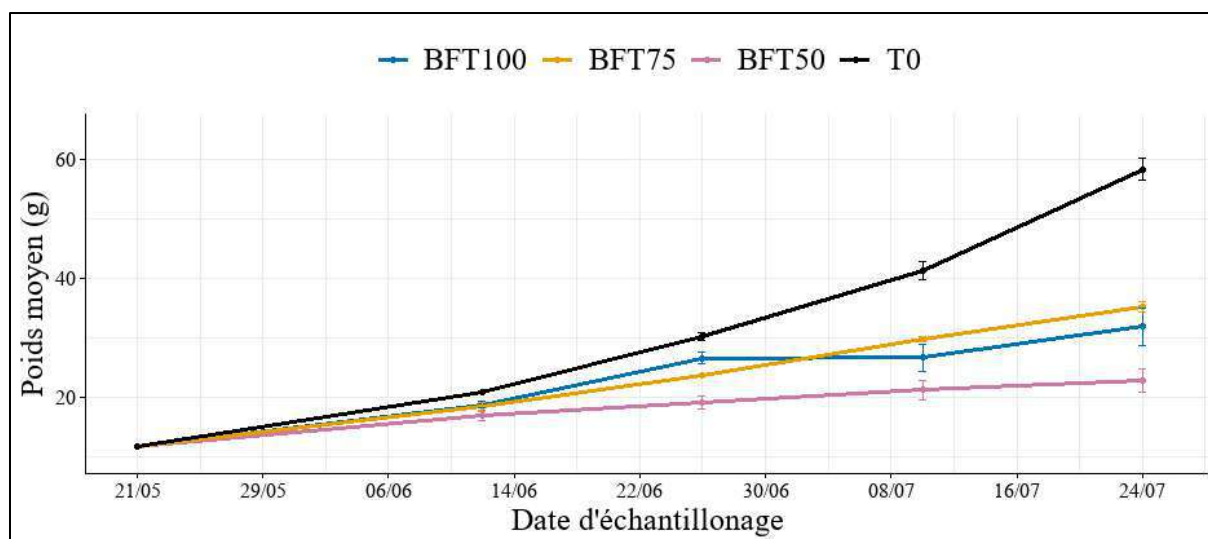


Figure 10. Graphique présentant l'évolution du poids corporel moyen au cours du temps dans les 4 traitements expérimentaux (moyenne $\pm$ écart type, n=90)

4. Rendement

Le rendement est significativement plus grand pour le témoin en circuit ouvert (151 kg/m³/an) en comparaison aux traitements en biofloc. Le niveau d'apport alimentaire réduit à 50% en biofloc a eu une influence sur le rendement puisque pour le traitement BFT50, le rendement est de 37,3 kg/m³/an et est significativement plus faible que ceux des traitements BFT100 et BFT75 (respectivement 59,2 kg/m³/an et 79,5 kg/m³/an).

5. Coefficient de condition de Fulton

Le coefficient de condition de Fulton (K) est un indicateur de l'embonpoint du poisson, c'est-à-dire de s'il est suffisamment nourri (Offem et al., 2007). Dans notre étude, le coefficient de condition ne diffère pas entre les 4 traitements et est compris entre 1,70 et 1,76.

Tableau 6. Taux de survie (TS), taux de croissance spécifique (SGR), taux de conversion alimentaire (FCR), rendement (Rdt) et coefficient de Fulton (K) pour l'élevage du tilapia du Nil (moyenne $\pm$ écart type, n=3).

Traitement	Variable				
	TS (%)	SGR (%/j)	FCR (%)	Rdt (kg/m ³ /an)	K
T0	98,1 $\pm$ 2,2	2,72 $\pm$ 0,02 ^a	0,75 $\pm$ 0,02 ^a	151,0 $\pm$ 7,70 ^a	1,74 $\pm$ 0,03
BFT100	92,9 $\pm$ 5,8	1,70 $\pm$ 0,13 ^b	1,09 $\pm$ 0,07 ^{bc}	59,2 $\pm$ 13,20 ^b	1,76 $\pm$ 0,03
BFT75	98,6 $\pm$ 0,0	1,92 $\pm$ 0,02 ^b	0,89 $\pm$ 0,02 ^{ac}	79,5 $\pm$ 1,34 ^b	1,74 $\pm$ 0,03
BFT50	96,5 $\pm$ 3,9	1,21 $\pm$ 0,12 ^c	1,13 $\pm$ 0,17 ^b	37,3 $\pm$ 6,35 ^c	1,70 $\pm$ 0,03
P-value	ns	< 0,0001	0,0029	< 0,0001	ns

Note : Dans chacune des colonnes, les moyennes accompagnées de lettres différentes sont significativement différentes entre elles selon le test de Tukey (P < 0,05). L'absence de lettre indique une différence non significative.

Discussion

Dans cette étude, l'objectif était de trouver le bon équilibre entre apport alimentaire exogène et consommation d'agrégat de floc « *in situ* », tout en optimisant les performances de croissance des tilapias du Nil élevés en biofloc.

La température, la concentration en oxygène dissous et la conductivité sont, pour l'ensemble des traitements, dans les gammes référencées dans les tableaux 2 et 3. Il existe quelques différences significatives pour ces paramètres entre les traitements mais celles-ci sont minimales et n'ont donc probablement pas d'influence sur les performances de croissance au cours de notre expérience. Les différences significatives qui existent entre le témoin et les traitements en biofloc pour la conductivité, l'alcalinité et le pH sont liées au renouvellement mis en place dans notre circuit ouvert (30%/h). Celui-ci a également permis de maintenir les concentrations moyennes en ions ammonium, en nitrites et en nitrates inférieures aux valeurs limites fixées au préalable pour le témoin (respectivement 1 mg/l, 1 mg/l et 50 mg/l). Dans le témoin, ces dernières sont stables tout au long de l'expérience et significativement plus faibles en comparaison aux traitements en biofloc. Grâce à ce protocole, ce témoin est relativement proche des normes d'un élevage intensif en circuit ouvert.

Afin de maintenir les conditions d'élevages en biofloc en accord avec les normes présentées dans le tableau 2, un renouvellement journalier a été appliqué dans l'ensemble des traitements : 4,1 %/j pour le BFT100, 3,6 %/j pour le BFT75 et 2,5 %/j pour le BFT50. L'absence de différence significative entre les traitements pour certains paramètres comme la conductivité et la concentration en nitrates est sûrement due aux taux de renouvellement plus élevés dans les traitements les moins restrictifs, entraînant un lessivage plus important des ions concentrés dans le milieu, et donc un rééquilibrage de la conductivité et de la concentration en NO_3^- .

Toutefois, le renouvellement n'a pas suffi à maintenir toutes les conditions physico-chimiques dans les normes prévues pour l'élevage biofloc (tableau 2) et une forte instabilité a été constatée tout au long de l'expérience. Par exemple, de brusques diminutions de l'alcalinité ont été constatées (diminution de 40 mg/l en 24 heures), en lien avec la consommation de carbonate de calcium (CaCO_3) par les bactéries nitrifiantes (Silva et al. 2019). Cette instabilité, témoignant de la perte de la capacité tampon du biofloc, peut expliquer les brusques variations de pH que nous avons observées. L'instabilité de l'alcalinité constatée ici en élevage biofloc (± 40 mg/l) a également été démontrée par Azim et Little (2008), avec des variations de l'alcalinité entre 8 et 250 mg/l sur de courtes périodes dans des conditions similaires. Afin de répondre à cette problématique, nous avons ajouté, tous les 1 à 2 jours, du bicarbonate de soude dans les traitements en biofloc (250 g par kg d'aliment distribué) afin de rehausser l'alcalinité et de réduire l'amplitude des variations du pH.

En dépit des conditions physico-chimiques instables dans le biofloc et des fortes concentrations en composés azotés, notre étude a démontré un taux de survie élevé (> 92,8%) quel que soit le traitement, confirmant ainsi la capacité du tilapia du Nil à survivre dans un élevage aux conditions physico-chimiques fluctuantes. En effet, les traitements en biofloc connaissent de fortes variations de la concentration en nitrites, avec des pics brusques jusqu'à 8,55 mg/l (BFT100), également observées dans l'étude menée par Azim & Little (2008). Plus particulièrement, l'intensité des pics est plus forte dans les traitements BFT100 et BFT75, en raison de l'apport plus important en azote par le biais d'une alimentation riche en protéine (50% de protéines brutes). Ces fortes concentrations en composés azotés peuvent affecter la santé des poissons élevés sur le long terme. Par ailleurs, une accumulation constante des nitrates jusqu'à une valeur moyenne de 680 mg/l en dernière semaine d'expérimentation, dans chacun des traitements en biofloc, a également été constatée dans les travaux menés par Long et al. (2015) et Silva et al. (2019). Elle peut s'expliquer par un haut niveau de nitrification et ce en dépit de l'ajout quotidien de mélasse afin de booster l'activité hétérotrophe du biofloc (Azim et al., 2008 ; Liu et al., 2018). Il est considéré qu'au-delà d'une concentration en nitrates de 500 mg/l, une exposition Deue durée peut s'avérer toxique sur le long terme (Monsees et al., 2016).

Le taux de survie moyen de 96,5% est similaire à ceux observés dans d'autres études (Rebouças et al., 2012 ; Pérez-Fuentes et al., 2018 ; Oliveira et al., 2021), une partie des mortalités ayant lieu à la suite des pêches contrôles en raison du stress lié aux manipulations et de l'anesthésie (benzocaïne à 0,4 ml/l). Par ailleurs, on a constaté un taux de survie de 92,9% dans le traitement BFT100, pour lequel les mortalités ont eu lieu principalement sur la 5^{ème} semaine d'expérience (figure 9) et semblent être due à une modification de la qualité du floc.

Cette détérioration de la qualité du floc a eu lieu dans l'ensemble des unités expérimentales du BFT100 et plusieurs indices indiquant une influence potentielle sur le bien être des poissons sont observés : ils ne s'alimentent plus, recherchent de l'air en surface et les mortalités se succèdent. Par ailleurs, le floc ne décante pas et la couleur de celui-ci est plus « laiteuse » que dans les autres bacs. Une observation au microscope (figure 11) des agrégats de floc a également été réalisée pour comprendre ce phénomène.

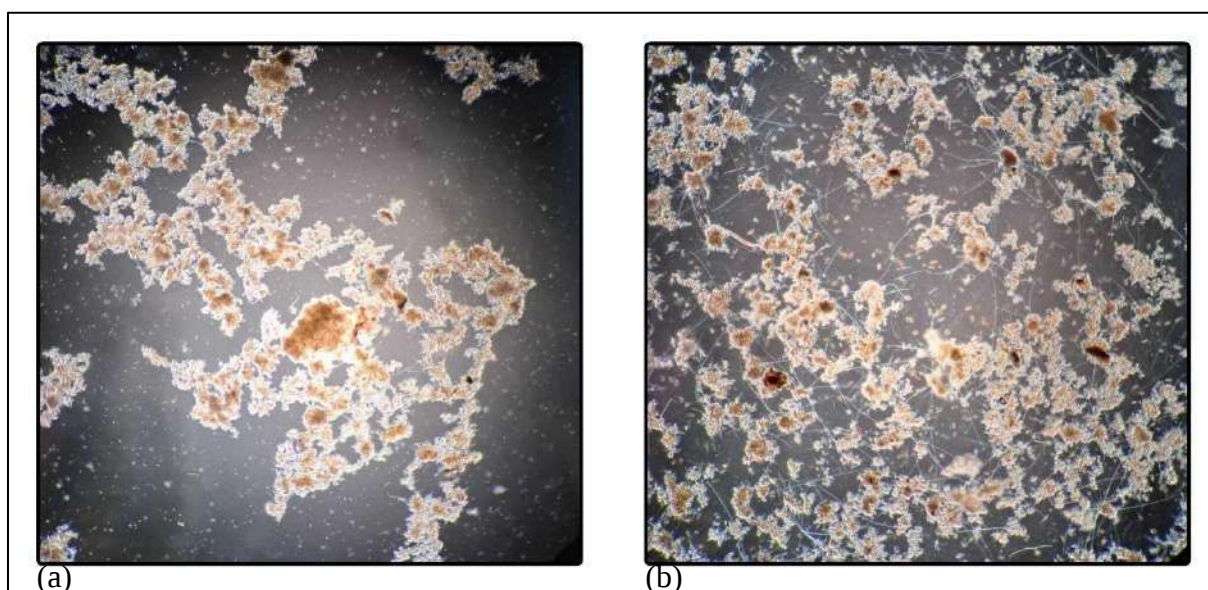


Figure 11. Photographies des agrégats de floc observés au microscope (x400) : unités expérimentales 3 (a) et 6 (b) (source personnelle, laboratoire UGeRAA le 14/07)

Sur la partie gauche de la figure 11(a), le biofloc du bac 3 qui se « comporte » normalement, sans problème de décantation ni d'effets sur l'appétit des poissons. Sur la partie droite (b), il est observé les agrégats de floccs du bac 6, dans lequel les agrégats de flocc ne décantent pas et dans lequel les poissons ne s'alimentent pas. Il est observé une nette différence de structure de flocc, avec sur la figure 11(b) des filaments abondants qui relient les agrégats de floccs entre eux. D'après un échange avec le prof. Célia Joaquim-Justo, directrice du Laboratoire d'Ecologie Animale et Ecotoxicologie (Université de Liège), ces microorganismes filamenteux seraient des mycètes unicellulaires.

Naturellement présentes dans le biofloc, ces mycètes peuvent se développer à outrance (phénomène de « filamentous bulking ») et ainsi entraîner une diminution de la capacité de décantation du flocc (Hargreaves, 2013). A forte concentration, ces filaments peuvent obstruer les branchies des poissons et donc entraîner une hypoxie et une mortalité importante sur le long terme, toujours selon Hargreaves (2013). Ces organismes unicellulaires entrent en concurrence avec les bactéries du biofloc et peuvent se développer à grande vitesse dans certaines conditions physico-chimiques. Même si nous n'avons pas déterminé la cause de ce développement filamenteux important, certains travaux font état de plusieurs facteurs possibles : (1) déséquilibre du ratio C/N (2) faible concentration en oxygène dissous (3) faible brassage au sein du biofloc (More et al., 2010).

Même si le taux de respiration est probablement plus élevé dans le traitement le plus nourri en raison du développement plus important des microorganismes aérobies (Long et al. 2015), le traitement qui connaît cette détérioration de la qualité du flocc (BFT100) n'est pas significativement plus faiblement concentré en oxygène, la concentration en oxygène dissous n'est donc probablement pas à l'origine du développement filamenteux. La concentration en oxygène dissous dans ce traitement (comme dans l'ensemble des traitements) reste par ailleurs dans la gamme cible ($> 6 \text{ mg/l}$) (Hargreaves 2013). Il connaît aussi le même brassage que les autres unités. L'hypothèse d'une charge en nutriments déséquilibrée est donc plausible, puisqu'il s'agit du traitement en biofloc le plus nourri.

Afin de contrôler le développement de microorganismes filamenteux, nous avons donc procédé à différentes manipulations : (1) arrêt du nourrissage et de l'apport de mélasse (2) fort renouvellement d'eau dans les bacs (3) décantation et soutirage plus régulier et plus conséquent du biofloc. Ce protocole a contribué à un renouvellement plus fort dans le traitement BFT100, qui est de $4,1 \text{ \% /j}$ pour le BFT100 contre $3,6 \text{ \% /j}$ pour le BFT75 et $2,5 \text{ \% /j}$ pour le BFT50. Nous avons ainsi réussi à freiner les mortalités (et même à les empêcher dans l'unité expérimentale 12) mais les comportements suggérant une hypoxie n'ont en revanche pas cessé (absence de prise alimentaire, recherche d'air en surface).

Néanmoins, il convient de rappeler que ces comportements suggérant l'hypoxie peuvent également être liés aux fortes concentrations en nitrites dans le traitement BFT100, avec une moyenne de $3,05 \text{ mg/l}$ bien au-delà de la valeur limite de 1 mg/l recommandée par Emerenciano et al. (2017), et ce tout au long de l'expérience. Une forte concentration en nitrites peut affecter le transport d'oxygène en se combinant avec l'hémocyanine pour former la méta-hémocyanine, complexe incapable de transporter l'oxygène, entraînant ainsi une hypoxie et une forte mortalité (Wasielesky et al., 2016).

Usuellement, le FCR décroît (et donc s'améliore) avec l'augmentation de la ration jusqu'à une valeur seuil que constitue la ration dite « optimale », qui maximise donc la conversion de l'aliment (Wang et al., 2019 ; Oliveira et al., 2021). Au-delà de cette ration, on constate une surcharge de l'estomac et des intestins, entraînant une diminution de la digestion et de l'absorption selon Liu et al. (2018). Dans notre étude, le taux de rationnement choisi afin de maintenir des conditions d'élevages convenables (concentrations en composés azotés, matières en suspension) est inférieur à la ration optimale pour le tilapia du Nil dans cette gamme de poids qui se situe entre 3% et 6% (FAO, 2024). Cela explique sans doute pourquoi le traitement BFT50 connaît un FCR significativement plus faible en comparaison au traitement BFT75 (1,13 contre 0,89), puisque les poissons élevés dans ce traitement sont sous-alimentés.

En outre, le taux conversion de l'aliment dans le traitement sans restriction (BFT100) est significativement plus élevé (1,09) que celui du témoin (0,75). Il s'agit d'un résultat contraire à la plupart des études portant sur le sujet, pour lesquelles le FCR en circuit ouvert est significativement plus élevé que le FCR en biofloc, pour une ration équivalente (Azim et al., 2008 ; Long et al., 2015). L'une des explications possibles à nos résultats est liée au taux de survie dans le BFT100 (92,9%), plus faible (non significativement) que dans les autres traitements, ce qui peut détériorer le FCR. En effet, l'aliment consommé par les poissons qui n'ont pas survécu rentre en compte dans le calcul du FCR, contrairement à leur biomasse. Cette influence est accentuée par le fait que ces mortalités interviennent tardivement dans l'expérience. Par ailleurs, le taux de conversion alimentaire peut être détérioré par la différence entre la quantité d'aliment distribuée et la quantité d'aliment réellement ingérée, assez difficile à évaluer en biofloc (Mengistu et al., 2019).

Nos résultats démontrent par ailleurs que le FCR du traitement BFT75, qui est de 0,89, n'est pas significativement différent du traitement BFT100 (1,09) même si on constate une tendance du FCR associé au BFT75 à être plus faible que celui du BFT100. En élevage biofloc, la diminution du FCR associée à la diminution du niveau d'apport alimentaire a été démontrée dans de nombreuses études (Rebouças et al., 2012 ; Pérez-Fuentes et al., 2018 ; Silva et al., 2019). Les travaux menés par Azim & Little (2008) et par Luo et al. (2014) démontrent en effet que la consommation d'agrégats de floc permet de réduire le taux de conversion alimentaire en favorisant la digestion via les enzymes digestives contenues dans les agrégats de floc (Long et al., 2015). Ici, rien ne confirme la consommation des agrégats de floc dans le traitement BFT75 et la quantité d'aliment réellement distribuée est 10% supérieure pour le BFT75 en comparaison au BFT100 en raison des problèmes de prise alimentaire dans le traitement sans restriction. Cela explique sans doute l'absence de différence entre ces deux traitements pour le FCR, en désaccord avec d'autres études.

Cependant, le FCR du traitement à 25% de restriction est le même que celui du témoin, et c'est un résultat intéressant puisque cela pourrait permettre de réduire la ration de 25% si un élevage biofloc est choisi plutôt qu'un circuit ouvert, sans pour autant détériorer le FCR. Cette réduction n'est pas négligeable dans un élevage aquacole puisque dans ceux-ci, l'aliment représente 30 à 60% des coûts de production selon Shipton & Hasan (2013).

Les valeurs observées pour le taux de conversion sont globalement assez faibles, notamment dans le circuit ouvert (0,75), et ce pour plusieurs raisons : (1) l'ajustement de la ration effectué tous les 14 jours permet d'éviter la détérioration du FCR, ce qui n'est pas le cas en élevage intensif où l'ajustement est moins régulier et moins précis (Cavalcante et al., 2017) (2) la densité utilisée dans notre étude ($6,2 \text{ kg/m}^3$ au démarrage) est plus faible que les densités conventionnelles en élevage biofloc, qui se situent autour de 9 kg/m^3 en moyenne pour des poissons entre 5 et 20 grammes (FAO, 2024) (3) le FCR est calculé en réalisant un rapport entre le poids humide des poissons et le poids sec des aliments (90% de matière sèche) (4) les poissons sont probablement sous-nourris puisque notre ration maximale est en dessous de la ration « optimale » (5) l'aliment utilisé est plus riche en protéines en comparaison à celui utilisé en élevage intensif (50% contre 35%), la quantité d'aliment nécessaire pour produire un kg de poisson est donc inférieur aux normes de l'élevage intensif (Mengistu et al., 2019) (6) la réalimentation des individus élevés en BFT100 à la suite d'une période de jeûne a peut-être causé un phénomène de croissance compensatoire, induisant une diminution du FCR (Luquet et al., 1995).

Dans notre cas, il s'agit probablement d'une combinaison de ces précédentes hypothèses qui améliore nos FCR en dépit des conditions physico-chimiques et des mortalités qui le détériorent. Il est donc nécessaire de nuancer nos résultats pour ce paramètre. Toutefois, les taux de conversion observés en élevage biofloc dans cette expérience (BFT100, BFT75 et BFT50) sont proches des valeurs commerciales en élevages biofloc qui se situent entre 0,9 et 1,25 et proches de ceux observés dans d'autres études similaires (Long et al., 2015 ; Cavalcante et al., 2017 ; Zimmermann et al., 2023).

Si certaines études démontrent une meilleure croissance en biofloc en comparaison à un circuit ouvert à ration équivalente (Long et al., 2015), nous obtenons le résultat inverse de meilleurs résultats de croissance sont obtenus dans le témoin en circuit ouvert en comparaison au traitement BFT100 (respectivement $2,72 \text{ \%}/\text{j}$ et $1,70 \text{ \%}/\text{j}$). Cette différence est liée au développement des microorganismes filamenteux qui ont largement perturbé la prise alimentaire des tilapias élevés à 100% de la ration en biofloc (ration 1,8 fois inférieure à la ration théorique). De plus, les concentrations en composés azotés significativement supérieures en biofloc en comparaison au témoin peuvent accentuer cet écart significatif sur le taux de croissance spécifique. En effet, les pics de concentrations en nitrites ($8,55 \text{ mg/l}$) et en nitrates (652 mg/l) que nous avons observés dans notre étude peuvent affecter les performances de croissance des individus élevés (Emerenciano et al., 2017 ; Monsees et al., 2016).

Par ailleurs, les problèmes de prise alimentaire dans le traitement BFT100 expliquent probablement que la croissance ne soit pas différente en comparaison au traitement BFT75, la quantité d'aliment distribuée étant finalement 10% supérieure pour le BFT75 en comparaison au BFT100. Le poids de cette hypothèse est accentué par les résultats de l'étude de Silva et al. (2019) portant sur le même sujet qui démontre un SGR croissant avec l'augmentation du taux de rationnement, pour les mêmes niveaux d'apports alimentaire que les nôtres. Par ailleurs, il est possible que la réalimentation des individus élevés en BFT100 à la suite des restrictions alimentaires ait causé un phénomène de croissance compensatoire, induisant un accroissement de la vitesse de croissance qui a pu améliorer le SGR du BFT100 dans les quelques jours précédents l'arrêt de l'expérience, faussant ainsi légèrement ce paramètre (Luquet et al., 1995).

Le niveau d'apport alimentaire a généré une autre différence significative sur le SGR puisque les poissons des traitements BFT75 et BFT50 connaissent une croissance journalière moyenne respective de 1,70 %/j et 1,21 %/j, inférieures au taux de croissance spécifique du témoin (2,72%/j). Ces résultats sont en accord avec un résultat établi par plusieurs études : au-delà de 20% de diminution de la ration, la consommation des agrégats de floc ne suffit plus à compenser la diminution de l'apport alimentaire (Avnimelech & Kochba, 2009 ; Pérez-Fuentes et al., 2018 ; Silva et al., 2019 ; Oliveira et al., 2021). Dans notre cas, il y a deux hypothèses possibles pour ces résultats : (1) il n'y a pas de consommation des agrégats de floc dans les traitements BFT75 et BFT50 (2) la consommation des agrégats existe mais elle est insuffisante pour compenser la diminution de la ration. Des recherches supplémentaires pourraient donc être menées en choisissant des niveaux d'apports alimentaires plus élevés et plus rapprochés les uns des autres (100%, 90% et 80% par exemple) et en intégrant dans le protocole une étude du marquage des isotopes stables de l'azote afin de confirmer ou d'infirmer l'hypothèse de la consommation des agrégats de floc (Avnimelech 2007).

Les courbes de croissance présentées à la figure 10 témoignent assez bien des résultats de notre étude concernant le SGR, et notamment de la détérioration du milieu d'élevage biofloc dans le BFT100 en 5^{ème} semaine d'expérience. Les taux de croissance spécifique observés en biofloc dans nos travaux sont relativement en accord avec les valeurs de références qui se situent entre 1,8 et 2,5 %/j selon Mélard (1986) dans le cas du BFT100 et du BFT75. Néanmoins, le SGR associé au traitement le plus restreint (1,21 %/j pour le BFT50) est largement inférieur à ces valeurs, remettant ainsi en cause la viabilité de ce niveau d'apport alimentaire en élevage intensif en biofloc. Il convient néanmoins de conserver du recul sur les comparaisons avec d'autres travaux et documents puisque les paramètres de croissance dépendent fortement des conditions physico-chimiques du milieu, des densités d'élevage employées et du type d'aliment utilisé.

Plusieurs auteurs s'accordent à dire que pour le même apport alimentaire, un système d'élevage en biofloc est plus productif qu'un système en circuit ouvert en raison de l'utilisation des agrégats de floc comme source d'alimentation et de la meilleure utilisation de l'aliment permise par les enzymes digestives du biofloc (Oliveira et al., 2021). Nos résultats diffèrent puisque le rendement du traitement en biofloc sans restriction est 2,5 fois inférieur à celui du témoin, et ce pour la même ration alimentaire théorique (respectivement 59,2 kg/m³/an et 151 kg/m³/an). Comme pour le taux de croissance, les problèmes de qualité du milieu d'élevage et l'absence partielle de prise alimentaire sont à l'origine de ce rendement plus faible dans le traitement BFT100 et expliquent aussi l'absence de différence entre le traitement BFT75 et le BFT100 pour ce paramètre. Le rendement observé dans le traitement doté de 50% de la ration alimentaire est quant à lui significativement inférieur aux deux autres traitements en biofloc, pour les mêmes raisons expliquant les différences en termes de taux de croissance spécifique.

Les rendements du BFT100, BFT75 et du BFT50 (respectivement 59,2, 79,5 et 37,3 kg/m³/an) se situent au-dessus des normes en élevage biofloc (20 à 30 kg/m³/an selon Zimmermann et al. (2023)). Ces bons résultats s'expliquent par les densités inférieures appliquées à notre expérience en comparaison aux élevages intensifs en biofloc (6,2 kg/m³ contre 9 kg/m³ pour des alevins entre 5 et 20 grammes) ainsi que par la composition de l'aliment utilisé, bien plus riche en protéines que les aliments utilisés en élevages biofloc pour cette gamme de poids (50% de protéines brutes contre 35% en moyenne)(Zimmermann et al., 2023 ; FAO, 2024).

Il pourrait être intéressant de rééditer cette expérience avec des densités supérieures et des aliments moins riches en protéines, afin de s'assurer de la viabilité de nos résultats dans des conditions similaires aux élevages intensifs en biofloc. Aussi, un dispositif automatique (cuve de décantation) pourrait être utilisé afin de contrôler le volume de floc de manière plus efficace afin d'éviter l'encombrement des branchies (Oliveira et al. 2021). En effet, l'instabilité du volume de floc au cours du temps (± 14 ml/l), présenté en figure 5, s'explique par les opérations de décantation quotidienne mises en place pour les traitements en biofloc, afin d'éviter que celui-ci ne dépasse la valeur cible que nous avons fixée au préalable, à savoir 30 ml/l. Malgré ce protocole, l'augmentation du volume de floc a été parfois compliquée à endiguer, sans pour autant que celui-ci ne dépasse la valeur critique de 50 ml/l fixé par Emerenciano et al. (2017). Dans la plupart des études portant sur la restriction alimentaire en élevage biofloc, on constate quasi systématiquement une accumulation des matières en suspension dans le milieu, jusqu'à 1000 mg/l après 8 semaines d'expérimentation, sans pour autant affecter la survie ou la croissance (Azim & Little, 2008 ; Long et al., 2015). En outre, l'accumulation y est significativement plus élevée dans les traitements avec des niveaux de restrictions plus faibles, de la même manière que dans notre étude (Cavalcante et al., 2017 ; Pérez-Fuentes et al., 2018 ; Silva et al., 2019).

Dans notre étude, le niveau d'apport alimentaire et le type de système aquacole (circuit ouvert ou élevage biofloc) n'ont pas eu d'influence sur le coefficient de condition (K). Ce résultat, similaire aux résultats de l'étude menée par Pérez-Fuentes et al. (2018), a tendance à indiquer que quel que soit le traitement, les tilapias élevés connaissent en moyenne le même embonpoint. La valeur de K dans l'ensemble des traitements (1,70-1,76) est relativement faible en comparaison aux valeurs déterminées par les travaux de Pérez-Fuentes et al. (2018) qui se situent entre 2,37 et 2,78. Selon Momi et al. (2020), pour des juvéniles tilapias du Nil, un poisson en excellent état physiologique est doté d'un facteur K aux alentours de 2,11 tandis que Timmons et Center (2013) situent le facteur de condition entre 2,08 et 2,50 pour une condition corporelle dans la norme. Cela indique sans doute que la ration que nous avons distribuée (3% puis 2% de la biomasse) est en dessous de la ration dite « optimale », causant une sous nutrition des tilapias élevés. Ces résultats vont donc dans le sens de l'hypothèse émise concernant le FCR. Toutefois, il convient de nuancer ces comparaisons puisque le facteur de condition est largement dépendant de l'âge du poisson, de son sexe ou encore du type d'aliment (Timmons & Center, 2013).

Conclusion

En définitive, nos résultats démontrent que les réductions de 25% et de 50% de la ration n'offrent pas de performances de croissance équivalentes au témoin en circuit ouvert, puisque la diminution n'est pas ou trop peu compensée par la consommation des agrégats de floc, si tant est qu'elle existe. En effet, les taux de croissance spécifique du BFT75 et du BFT50 sont inférieurs à celui du témoin, et les FCR sont respectivement équivalents et inférieurs. Ces résultats vont dans le sens d'autres études qui suggèrent qu'au-delà de 20% de réduction de l'aliment, la consommation de floc ne permet pas de compenser la restriction alimentaire. Il serait donc intéressant de réaliser un nouvel essai en appliquant des restrictions alimentaires moins fortes et plus proches les unes des autres (100%, 90% et 80% par exemple) et en réalisant une étude isotopique sur l'azote afin de vérifier si les tilapias élevés en biofloc consomment effectivement du biofloc.

En dépit d'une gestion rigoureuse et d'un suivi régulier de l'élevage biofloc, il a été difficile de maintenir les conditions physico-chimiques dans les gammes recommandées par la littérature. Plus particulièrement, les concentrations en matières en suspension, en nitrites et en nitrates témoignent de l'instabilité du biofloc tout au long de notre expérience. De par leur toxicité et leur influence sur le comportement alimentaire des individus élevés, ces paramètres constituent les facteurs critiques dont dépend la réussite d'un élevage en biofloc. Pour toutes ces raisons, le témoin en circuit ouvert offre de meilleurs résultats de croissance, de conversion de l'aliment et de survie en comparaison à l'élevage biofloc pour une ration équivalente (BFT100).

Même si les conditions physico-chimiques du biofloc ont été globalement instables tout au long des 9 semaines d'expérimentations, la réduction du niveau d'apport alimentaire en biofloc assure de meilleures conditions physico-chimiques pour l'élevage du tilapia du Nil (*Oreochromis niloticus*) en biofloc en comparaison au traitement sans restriction. En effet, le développement des microorganismes filamenteux a été constaté dans le traitement BFT100 et combiné à des concentrations en composés azotés au-delà des normes recommandées, cela a causé des mortalités en séries en 5^{ème} semaine d'expérience.

Le rapport C/N est l'un des paramètres majeurs de la gestion d'un élevage biofloc, puisqu'il détermine le type de communautés bactériennes dominant (autotrophes ou hétérotrophes) et par la même le mode de recyclage des composés azotés (nitrification ou assimilation en protéines « *in situ* »). Dans notre étude, le protocole mis en place ne permet de mesurer le rapport C/N dans le milieu, mais uniquement celui « apporté » via l'aliment riche en protéines et la mélasse riche en carbone. Ainsi, il est possible qu'un déséquilibre de ce rapport soit à l'origine de l'instabilité des conditions physico-chimiques et de développement des microorganismes filamenteux.

Il convient de nuancer l'ensemble de ces résultats au regard de la dégradation de l'état du biofloc dans le traitement sans restriction alimentaire qui a entraîné une forte mortalité, perturbant ainsi largement l'interprétation des résultats de cette étude.

Annexes

ANNEXE I : Composition des aliments utilisés dans le cadre de l'expérimentation

Constituants	Aliment pré-expérimental	Aliment expérimental
<i>Constituants analytiques (%)</i>		
Protéines	56,00	50,00
Lipides	15,00	15,00
Fibres	0,30	0,50
Cendres	11,30	8,70
Phosphore	1,77	1,15
Calcium	3,00	1,60
Sodium	0,90	0,40
<i>Additifs (mg/kg)</i>		
Vitamine A	5,00	3,50
Vitamine B	0,50	/
Vitamine D3	/	0,05
Fer	56,00	43,90
Iode	4,70	3,70
Cuivre	4,70	3,70
Manganèse	18,70	14,60
Zinc	56,00	43,90
Gallate de propyle	100,00	61,00
Hydroxyde butyle anisole	100,00	61,00

ANNEXE II : Matières en suspension (MES) (mg/l)

- **Matériels** : entonnoir magnétique de filtration 47 mm, filtres en fibre de verre 47 mm, Whatmann 934 – AH (1,5 micromètre de porosité) avec supports métalliques, balance analytique, étuve, dessiccateur, éprouvette graduée, pinces, pompe à vide, eau désionisée

- **Protocole** : cette méthode repose sur la répartition des MES de l'eau par filtration, suivi du séchage du filtre à 105°C pendant 5 heures.

- o Prélever 25mL de l'eau à analyser avec une éprouvette graduée ;
- o Peser le filtre avec son support à l'aide d'une balance analytique pour connaître M0 (mg)
- o Placer le filtre sur le support du cône de filtration, face quadrillée vers le haut et mettre en route le dispositif de filtration (pompe à vide) ;
- o Homogénéiser l'échantillon d'eau. Filtrer l'échantillon ;
- o Rincer l'éprouvette et le cône de filtration 3 fois à l'aide d'eau désionisée et filtrer l'eau du rinçage ;
- o Arrêter la filtration, retirer le filtre et le placer sur son support métallique ; Mettre le filtre et son support à l'étuve à 105°C pendant 2 heures ;
- o Après 2 heures, mettre le filtre dans un dessiccateur pour le laisser refroidir ;
- o Quand le filtre est à la température ambiante, peser le filtre à l'aide d'une balance analytique pour connaître M1 (mg)

➔ Calculer la concentration de MES (mg/l) = $\frac{(M1-M0)}{V}$

Référence : American Public Health Association (APHA), American water works association (AWWA), Water environment federation (WEF), Standard Methods for the Examination of water dans Wastewater, 21ème édition, 2005, 2540D, 2540D, 2540E.

ANNEXE III : Analyse d'ammoniac – ammonium NH_4^+ / NH_3 (mg/l) : méthode de Nessler

- **Matériels** : spectrophotomètre, pipette digitale, tubes à essai

- **Réactifs** : Stabilisateur, Nessler

- **Protocole** :

o Allumer le spectrophotomètre : programme 954 et appuyer sur Enter ;

o Régler la longueur d'onde à 425 nm (utiliser une mollette à droite) :

o Prélever 25ml d'échantillon avec une pipette et utiliser l'eau distillée comme le blanc ;

o Ajouter les réactifs :

- Stabilisateur, une goutte dans chaque échantillon et le blanc ;

- Nessler, dix gouttes dans chaque échantillon et le blanc.

o Appuyer sur shift, puis timer (attendre les minutes s'écouler) ;

o Dès que les minutes s'épuisent, placer en premier le témoin dans le spectrophotomètre et appuyer sur zéro ;

o Placer ensuite l'échantillon dans le spectrophotomètre et appuyer sur read ;

o Vider et rincer les tubes utilisés.

Référence : American Public Health Association (APHA), American water works association (AWWA), Water environment federation (WEF), Standard Methods for the Examination of water dans Wastewater, 21ème édition, 2005, 2540D, 2540D, 2540E.

ANNEXE IV : Analyse des nitrites (mg/l) : méthode Diazotation

- **Matériels** : spectrophotomètre, pipette digitale, tubes à essai (14mm de diamètre)

- **Réactifs** : Nitrite 1, Nitrite 2

- **Protocole** :

- o Appuyer sur « select program » ;
- o Appuyer 955 et enter ;
- o Régler la longueur d'onde à 540 nm et appuyer sur enter ;
- o Prélever 2 fois 5ml d'échantillon avec une pipette, l'un utiliser comme le blanc (pas d'ajout de réactifs) ;
- o Ajouter 10 gouttes de Nitrite 1 ;
- o Appuyer sur shift + timer (agiter et attendre le minuteur : 30 secondes) ;
- o Ajouter 10 gouttes de Nitrite 2 ;
- o Appuyer sur shift + timer (attendre le minuteur : 2 minutes) ;
- o Prendre le premier témoin, placer dans le spectrophotomètre et appuyer sur zéro ;
- o Prendre l'échantillon, placer dans le spectrophotomètre et appuyer sur read ;

N.B : si on ne sait pas lire la valeur « over range », il faudrait tout recommencer, tout en diluant la solution. La valeur trouvée sera multipliée fois la valeur de dilution.

Référence : American Public Health Association (APHA), American water works association (AWWA), Water environment federation (WEF), Standard Methods for the Examination of water dans Wastewater, 21ème édition, 2005, 2540D, 2540D, 2540E.

ANNEXE V : Analyse des nitrates

- **Matériels** : spectrophotomètre, pipette digitale, tubes

- **Réactifs** : HR nitrate

- **Protocole** :

- o Programme 355 + enter
- o Ajuster la longueur d'onde à 500nm
- o Exprimer les nitrates en NO₃ (régler l'unité avec les touches de directions)
- o Ajouter 5ml dans les tubes
- o Ajouter de l'eau distillée jusqu'à 25mL (voir la graduation du tube), comme on dilue 5x (la valeur finale sera multipliée par 5).
- o Ajouter le HR nitrate dans les échantillons, sauf le blanc
- o Appuyer sur shift + timer (mélanger la solution)
- o Une fois les minutes épuisées, appuyer encore sur shift + timer
- o Après le minuteur, placer le blanc et appuyer sur zéro
- o Placer le tube contenant l'échantillon + HR nitrate dans le spectrophotomètre et appuyer sur read et multiplier la valeur lue fois la valeur de dilution

Référence : American Public Health Association (APHA), American water works association (AWWA), Water environment federation (WEF), Standard Methods for the Examination of water dans Wastewater, 21ème édition, 2005, 2540D, 2540D, 2540E.

ANNEXE VI : Analyse de l'alcalinité (mg/l de CaCO₃)

- **Matériels** : Bécher, un alcalimètre digital (HACH 10-4000 mg/l Model AL-DT, contenant de l'acide sulfurique H₂SO₄, 1,6N), un indicateur coloré (vert de bromocrésol) permettant le titrage de l'alcalinité exprimé en quantité de CaCO₃(mg/l)

- **Protocole** :

- o Prélever 100ml de l'échantillon et placer dans un bécher ;
- o Ajouter un indicateur (vert bromocrésol) dans l'échantillon ;
- o Utiliser un digital titrator (contenant de H₂SO₄ à 1,6N) pour faire le titrage ;
- o La fin du titrage est marquée par le virement de couleur (de vert en rose) ;
- o La valeur lue dans le digital titrator correspond à la quantité de CaCO₃ en mg/l.

Référence : American Public Health Association (APHA), American water works association (AWWA), Water environment federation (WEF), Standard Methods for the Examination of water dans Wastewater, 21ème édition, 2005, 2540D, 2540D, 2540E.

Bibliographie

AVNIMELECH, Yoram, 2007. Feeding with microbial flocs by tilapia in minimal discharge bio-flocs technology ponds. *Aquaculture* [en ligne]. 1 avril 2007. Vol. 264, n° 1-4, pp. 140-147. DOI 10.1016/j.aquaculture.2006.11.025.

AVNIMELECH, Yoram, 2009. Biofloc technology. A practical guide book. The World Aquaculture Society. *ResearchGate* [en ligne]. 1 janvier 2009. Disponible à l'adresse : <https://www.researchgate.net/publication/308052605>

AVNIMELECH, Yoram et KOCHBA, Malka, 2009. Evaluation of nitrogen uptake and excretion by tilapia in bio floc tanks, using ¹⁵N tracing. *Aquaculture* [en ligne]. 1 février 2009. Vol. 287, n° 1-2, pp. 163-168. DOI 10.1016/j.aquaculture.2008.10.009.

AZIM, M.E., LITTLE, D.C. et BRON, J.E., 2008. Microbial protein production in activated suspension tanks manipulating C : N ratio in feed and the implications for fish culture. *Bioresource Technology* [en ligne]. 1 juin 2008. Vol. 99, n° 9, pp. 3590-3599. DOI 10.1016/j.biortech.2007.07.063.

AZIM, Mohammed Ekram et LITTLE, David Colin, 2008. The biofloc technology (BFT) in indoor tanks : Water quality, biofloc composition, and growth and welfare of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*). *Aquaculture* [en ligne]. 1 octobre 2008. Vol. 283, n° 1-4, pp. 29-35. DOI 10.1016/j.aquaculture.2008.06.036.

B, O Offem, Y, Akegbejo Samsons et OMONIYI, T, I, 2007. Biological assessment of *Oreochromis niloticus* (Pisces : Cichlidae ; Linne, 1958) in a tropical floodplain river. *AFRICAN JOURNAL OF BIOTECHNOLOGY* [en ligne]. 31 août 2007. Vol. 6, n° 16, pp. 1966-1971. DOI 10.5897/ajb2007.000-2300.

BANK, Michael S., METIAN, Marc et SWARZENSKI, Peter W., 2020. Defining Seafood Safety in the Anthropocene. *Environmental Science & Technology* [en ligne]. 9 juillet 2020. Vol. 54, n° 14, pp. 8506-8508. DOI 10.1021/acs.est.0c03505.

BELTON, Ben, LITTLE, David C., ZHANG, Wenbo, EDWARDS, Peter, SKLADANY, Michael et THILSTED, Shakuntala H., 2020. Farming fish in the sea will not nourish the world. *Nature Communications* [en ligne]. 16 novembre 2020. Vol. 11, n° 1. DOI 10.1038/s41467-020-19679-9.

CHAKRABORTY, Suman Bhusan, MAZUMDAR, Debasis, CHATTERJI, Urmi et BANERJEE, Samir, 2011. Growth of Mixed-Sex and Monosex Nile tilapia in different culture systems. *Turkish Journal Of Fisheries And Aquatic Sciences* [en ligne]. 1 janvier 2011. Vol. 11, n° 1. DOI 10.4194/trjfas.2011.0117.

DE HOLANDA CAVALCANTE, Davi, LIMA, Francisco Roberto Dos Santos, REBOUÇAS, Vanessa Tomaz et SÁ, Marcelo Vinícius Do Carmo E, 2017. < ; b> ; Nile tilapia culture under feeding restriction in bioflocs and bioflocs plus periphyton tanks. *Acta Scientiarum Animal Sciences* [en ligne]. 14 juillet 2017. Vol. 39, n° 3, pp. 223. DOI 10.4025/actascianimsci.v39i3.33574.

DE SCHRYVER, P., CRAB, R., DEFOIRDT, T., BOON, N. et VERSTRAETE, W., 2008. The basics of bio-flocs technology : The added value for aquaculture. *Aquaculture* [en ligne]. 1 juin 2008. Vol. 277, n° 3-4, pp. 125-137. DOI 10.1016/j.aquaculture.2008.02.019.

DEBBARMA, Reshmi, SINGH, Soibam Khogen, WAIKHOM, Gusheinzed, BISWAS, Pradyut, MEENA, D.K. et CHOUDHARY, B.K., 2023. Biofloc technology : a strategic way to waste recycling in aquaculture. In : *Elsevier eBooks* [en ligne]. pp. 395-419.

D'ORBCASTEL, Emmanuelle Roque, BLANCHETON, Jean-Paul et AUBIN, Joël, 2009. Towards environmentally sustainable aquaculture : Comparison between two trout farming systems using Life Cycle Assessment. *Aquacultural Engineering* [en ligne]. 1 mai 2009. Vol. 40, n° 3, pp. 113-119. DOI 10.1016/j.aquaeng.2008.12.002.

EBELING, James M., TIMMONS, Michael B. et BISOGNI, J.J., 2006. Engineering analysis of the stoichiometry of photoautotrophic, autotrophic, and heterotrophic removal of ammonia–nitrogen in aquaculture systems. *Aquaculture* [en ligne]. 1 juin 2006. Vol. 257, n° 1-4, pp. 346-358. DOI 10.1016/j.aquaculture.2006.03.019.

EKASARI, Julie, ANGELA, Deasy, WALUYO, Setiyo Hadi, BACHTIAR, Taufiq, SURAWIDJAJA, Enang Harris, BOSSIER, Peter et DE SCHRYVER, Peter, 2014. The size of biofloc determines the nutritional composition and the nitrogen recovery by aquaculture animals. *Aquaculture* [en ligne]. 1 avril 2014. Vol. 426-427, pp. 105-111. DOI 10.1016/j.aquaculture.2014.01.023.

EMERENCIANO, Mauricio Gustavo Coelho, MARTÍNEZ-CÓRDOVA, Luis Rafael, MARTÍNEZ-PORCHAS, Marcel et MIRANDA-BAEZA, Anselmo, 2017. Biofloc Technology (BFT) : A Tool for Water Quality Management in Aquaculture. In : *InTech eBooks* [en ligne].

EMERENCIANO, Mauricio, CUZON, Gerard, GOGUENHEIM, Jean et GAXIOLA, Gabriela, 2011. Floc contribution on spawning performance of blue shrimp *Litopenaeus stylirostris*. *Aquaculture Research* [en ligne]. 30 novembre 2011. Vol. 44, n° 1, pp. 75-85. DOI 10.1111/j.1365-2109.2011.03012.x.

FAO : Tilapia du nil - accueil, [consulté le 18/06/2024]. [en ligne]. Disponible à l'adresse : <https://www.fao.org/fishery/affris/profil-des-especes/nile-tilapia/tilapia-du-nil-accueil/fr/>

HARGREAVES, John A., 2013. Biofloc production systems for aquaculture. *Biofloc Technology, A Practical Guidebook Third Edition* [en ligne]. 1 janvier 2013. Disponible à l'adresse : <https://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=US201700000014>

HENCHION, Maeve, HAYES, Maria, MULLEN, Anne Maria, FENELON, Mark et TIWARI, Brijesh, 2017. Future Protein Supply and Demand : Strategies and Factors Influencing a Sustainable Equilibrium. *Foods* [en ligne]. 20 juillet 2017. Vol. 6, n° 7, pp. 53. DOI 10.3390/foods6070053.

IBRAHIM, Lubna A., SHAGHALEH, Hiba, EL-KASSAR, Gamal Mohamed, ABU-HASHIM, Mohamed, ELSADEK, Elsayed Ahmed et HAMOUD, Yousef Alhaj, 2023. Aquaponics : A Sustainable Path to Food Sovereignty and Enhanced Water Use Efficiency. *Water* [en ligne]. 18 décembre 2023. Vol. 15, n° 24, pp. 4310. DOI 10.3390/w15244310.

JAMAL, Mamdoh T., BROOM, Mohammed, AL-MUR, Bandar A., HARBI, Mamdouh Al, GHANDOURAH, Mohammed, OTAIBI, Ahmed Al et HAQUE, Md Fazlul, 2020. Biofloc Technology : Emerging Microbial Biotechnology for the Improvement of Aquaculture Productivity. *Polish Journal Of Microbiology* [en ligne]. 1 janvier 2020. Vol. 69, n° 4, pp. 401-409. DOI 10.33073/pjm-2020-049.

JIANG, Qutu, BHATTARAI, Nishan, PAHLOW, Markus et XU, Zhenci, 2022. Environmental sustainability and footprints of global aquaculture. *Resources Conservation And Recycling* [en ligne]. 1 mai 2022. Vol. 180, pp. 106183. DOI 10.1016/j.resconrec.2022.106183.

KHANJANI, Mohammad Hossein, MOHAMMADI, Alireza et EMERENCIANO, Maurício Gustavo Coelho, 2022. Microorganisms in biofloc aquaculture system. *Aquaculture Reports* [en ligne]. 1 octobre 2022. Vol. 26, pp. 101300. DOI 10.1016/j.aqrep.2022.101300.

LIU, Wenchang, LUO, Guozhi, CHEN, Wei, TAN, Hongxin, WU, Shengkai, ZHANG, Nan et YU, Yongxia, 2018. Effect of no carbohydrate addition on water quality, growth performance and microbial community in water-reusing biofloc systems for tilapia production under high-density cultivation. *Aquaculture Research* [en ligne]. 29 avril 2018. Vol. 49, n° 7, pp. 2446-2454. DOI 10.1111/are.13704.

LONG, Lina, YANG, Jing, LI, Yuan, GUAN, Chongwu et WU, Fan, 2015. Effect of biofloc technology on growth, digestive enzyme activity, hematology, and immune response of genetically improved farmed tilapia (*Oreochromis niloticus*). *Aquaculture* [en ligne]. 1 novembre 2015. Vol. 448, pp. 135-141. DOI 10.1016/j.aquaculture.2015.05.017.

LÓPEZ-OLMEDA, José Fernando, SÁNCHEZ-VÁZQUEZ, Francisco Javier et FORTES-SILVA, Rodrigo, 2021. *Biology and Aquaculture of Tilapia* [en ligne].

LUO, Guozhi, GAO, Qi, WANG, Chaohui, LIU, Wenchang, SUN, Dachuan, LI, Li et TAN, Hongxin, 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* [en ligne]. 1 février 2014. Vol. 422-423, pp. 1-7. DOI 10.1016/j.aquaculture.2013.11.023.

LUQUET, P., OTEME, Z.J. et CISSE, A., 1995b. Mise en évidence et valorisation de la croissance compensatrice chez *Heterobranchus longifilis*. [en ligne]. 1995. Disponible à l'adresse : <https://hal.inrae.fr/hal-02707389>

MARTINEZ-PORCHAS, Marcel et MARTINEZ-CORDOVA, Luis R., 2012. World Aquaculture : Environmental Impacts and Troubleshooting Alternatives. *The Scientific World JOURNAL* [en ligne]. 1 janvier 2012. Vol. 2012, pp. 1-9. DOI 10.1100/2012/389623.

MASHAI, Nassrin, RAJABIPOUR, Farhad, MOHAMMADI, Mohamad, SARSANGI, Habib, BITARAF, Ahmad, HOSSEIN-ZADEH, Homayun et SHARIF-ROHANI, Mostafa, 2016. Reproduction of Nile tilapia, *Oreochromis niloticus* in brackish water. *Journal Of Applied Aquaculture* [en ligne]. 2 janvier 2016. Vol. 28, n° 1, pp. 1-8. DOI 10.1080/10454438.2015.1104943.

MCCUSKER, Stephen, WARBERG, Majbritt Bolton, DAVIES, Simon J., DE SOUZA VALENTE, Cecilia, JOHNSON, Mark P., COONEY, Ronan et WAN, Alex H. L., 2023. Biofloc technology as part of a sustainable aquaculture system : A review on the status and innovations for its expansion. *Aquaculture Fish And Fisheries* [en ligne]. 12 juin 2023. Vol. 3, n° 4, pp. 331-352. DOI 10.1002/aff2.108.

MENGISTU, Samuel Bekele, MULDER, Han A., BENZIE, John A. H. et KOMEN, Hans, 2019. A systematic literature review of the major factors causing yield gap by affecting growth, feed conversion ratio and survival in Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*). *Reviews In Aquaculture* [en ligne]. 18 mars 2019. Vol. 12, n° 2, pp. 524-541. DOI 10.1111/raq.12331.

MÉLARD, Charles, 1986. *Les bases biologiques de l'élevage intensif du Tilapia du Nil* [en ligne]. Disponible à l'adresse : <https://babordplus.u-bordeaux.fr/notice.php?q=id:1028909>

MONSEES, Hendrik, KLATT, Laura, KLOAS, Werner et WUERTZ, Sven, 2016. 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* [en ligne]. 6 août 2016. Vol. 48, n° 7, pp. 3482-3492. DOI 10.1111/are.13174.

MORE, T T, YAN, S, TYAGI, R D et SURAMPALLI, R Y, 2010. Potential use of filamentous fungi for wastewater sludge treatment. *Bioresource Technology* [en ligne]. 1 octobre 2010. Vol. 101, n° 20, pp. 7691-7700. DOI 10.1016/j.biortech.2010.05.033.

MURRAY, Francis, BOSTOCK, John et FLETCHER, David, 2014. Review of Recirculation Aquaculture System Technologies and their Commercial application. *Agricultural And Food Sciences, Business, Environmental Science* [en ligne]. 1 mars 2014. Disponible à l'adresse : https://dspace.stir.ac.uk/bitstream/1893/21109/1/HIE_RAS_Study_Final_Updated.pdf

OLIVEIRA, Luciana Kelly, PILZ, Leticia, FURTADO, Plínio Schmidt, BALLESTER, Eduardo Luís Cupertino et DE ALMEIDA BICUDO, Álvaro José, 2021. Growth, nutritional efficiency, and profitability of juvenile GIFT strain of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) reared in biofloc system on graded feeding rates. *Aquaculture* [en ligne]. 1 août 2021. Vol. 541, pp. 736830. DOI 10.1016/j.aquaculture.2021.736830.

PÉREZ-FUENTES, Jorge Alberto, PÉREZ-ROSTRO, Carlos Iván, HERNÁNDEZ-VERGARA, Martha Patricia et DEL CARMEN MONROY-DOSTA, María, 2018b. 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* [en ligne]. 14 septembre 2018. Vol. 49, n° 11, pp. 3658-3668. DOI 10.1111/are.13834.

Perspectives agricoles de l'OCDE et de la FAO 2023-2032, 2023. [en ligne]. Disponible à l'adresse : <https://doi.org/10.1787/a187ca6c-fr>

PINHO, Sara M., DAVID, Luiz Henrique C., GODDEK, Simon, EMERENCIANO, Maurício G. C. et PORTELLA, Maria Célia, 2020. Integrated production of Nile tilapia juveniles and lettuce using biofloc technology. *Aquaculture International* [en ligne]. 6 octobre 2020. Vol. 29, n° 1, pp. 37-56. DOI 10.1007/s10499-020-00608-y.

REBOUÇAS, Vanessa Tomaz, CALDINI, Nayara Nunes, DE HOLANDA CAVALCANTE, Davi, DA SILVA, Francisco Jackes Rodrigues et SÁ, Marcelo Vinícius Do Carmo E, 2012. Interaction between feeding rate and area for periphyton in culture of Nile tilapia juveniles - doi : 10.4025/actascianimsci.v34i2.12469. *Acta Scientiarum Animal Sciences* [en ligne]. 22 mars 2012. Vol. 34, n° 2. DOI 10.4025/actascianimsci.v34i2.12469.

ROQUES, Jonathan A. C., MICOLUCCI, Federico, HOSOKAWA, Suguru, SUNDELL, Kristina et KINDAICHI, Tomonori, 2021. Effects of Recirculating Aquaculture System Wastewater on Anammox Performance and Community Structure. *Processes* [en ligne]. 7 juillet 2021. Vol. 9, n° 7, pp. 1183. DOI 10.3390/pr9071183.

SALIN, Krishna R. et VINH, Nguyen Tien, 2023. Biofloc technology in aquaculture. In : *Elsevier eBooks* [en ligne]. pp. 69-88.

SERRA, Fabiane P., GAONA, Carlos A. P., FURTADO, Plínio S., POERSCH, Luis H. et WASIELESKY, Wilson, 2015. Use of different carbon sources for the biofloc system adopted during the nursery and grow-out culture of *Litopenaeus vannamei*. *Aquaculture International* [en ligne]. 11 février 2015. Vol. 23, n° 6, pp. 1325-1339. DOI 10.1007/s10499-015-9887-6.

SHIPTON, Thomas A et HASAN, Mohammad R, 2013. An overview of the current status of feed management practices. *On-farm Feeding And Feed Management In Aquaculture*, 583, pp 3-20. [en ligne]. Disponible à l'adresse : <https://www.cabdirect.org/cabdirect/abstract/20143141767> [consulté le 9 avril 2024].

SILVA, Marcos Antônio, ALVARENGA, Érika Ramos, DA COSTA, Franklin Fernando Batista, TURRA, Eduardo Maldonado, DE OLIVEIRA ALVES, Gabriel Francisco, MANDUCA, Ludson Guimarães, SALES, Suellen Cristina Moreira, LEITE, Namíbia Rizzari, BEZERRA, Vinícius Monteiro, DA SILVA MORAES, Stefani Grace et DE ALENCAR TEIXEIRA, Edgar, 2019. Feeding management strategies to optimize the use of suspended feed for Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) cultivated in bioflocs. *Aquaculture Research* [en ligne]. 26 novembre 2019. Vol. 51, n° 2, pp. 605-615. DOI 10.1111/are.14408.

SOKAL, Robert R. et ROHLF, F. James, 2013. Biometry : the principles and practice of statistics in biological research / Robert R. Sokal and F. James... *ResearchGate* [en ligne]. 27 avril 2013. Disponible à l'adresse : <https://www.researchgate.net/publication/44554870>

SPARKS, Russell T., SHEPHERD, Brian S., RON, Benny, RICHMAN, N. Harold, RILEY, Larry G., IWAMA, George K., HIRANO, Tetsuya et GRAU, E. Gordon, 2003. Effects of environmental salinity and 17 α -methyltestosterone on growth and oxygen consumption in the tilapia, *Oreochromis mossambicus*. *Comparative Biochemistry And Physiology Part B Biochemistry And Molecular Biology* [en ligne]. 1 décembre 2003. Vol. 136, n° 4, pp. 657-665. DOI 10.1016/s1096-4959(03)00245-8.

The State of World Fisheries and Aquaculture 2022, 2022. [en ligne]. Disponible à l'adresse : <https://doi.org/10.4060/cc0461fr>

The State of World Fisheries and Aquaculture 2024, 2024. [en ligne]. Disponible à l'adresse : <https://doi.org/10.4060/cd0683en>

TIMMONS, Michael Ben et CENTER, Northeastern Regional Aquaculture, 2013. *Recirculating aquaculture*.

WANG, Miao et LU, Maixin, 2015. Tilapia polyculture : a global review. *Aquaculture Research* [en ligne]. 30 janvier 2015. Vol. 47, n° 8, pp. 2363-2374. DOI 10.1111/are.12708.

WANG, Yuyu, XU, Pao, NIE, Zhijuan, LI, Quanjie, SHAO, Nailin, GAO, Jiancao et XU, Gangchun, 2019. Effects of Feeding Rates on Growth, Digestive Enzyme Activity, Serum Biochemical Parameters, and Body Composition of Juvenile, Genetically Improved, Farmed Nile Tilapia Reared in an In-Pond Raceway Recirculating Culture System. *North American Journal Of Aquaculture* [en ligne]. 15 octobre 2019. Vol. 82, n° 1, pp. 75-83. DOI 10.1002/naaq.10124.

WASIELESKY, W. J., POERSCH, L. H., MARTINS, T. G. et MIRANDA-FILHO, K. C., 2016. Chronic effects of nitrogenous compounds on survival and growth of juvenile pink shrimp. *Brazilian Journal Of Biology* [en ligne]. 24 octobre 2016. Vol. 77, n° 3, pp. 558-565. DOI 10.1590/1519-6984.18415.

ZIMMERMANN, Sergio, KIESSLING, Anders et ZHANG, Jiasong, 2023. The future of intensive tilapia production and the circular bioeconomy without effluents : Biofloc technology, recirculation aquaculture systems, bio-RAS, partitioned aquaculture systems and integrated multitrophic aquaculture. *Reviews In Aquaculture* [en ligne]. 1 février 2023. Vol. 15, n° S1, pp. 22-31. DOI 10.1111/raq.12744.

Résumé

L'effet de différents niveaux d'apport alimentaire sur les performances de croissance des tilapias du Nil (*Oreochromis niloticus*) en élevage biofloc (BFT) a été évalué dans cette étude pour une durée de 9 semaines. Un témoin en circuit ouvert et trois traitements en biofloc ont été testés : BFT100 qui correspond à la ration complète, BFT75 qui correspond à 75% de la ration complète, BFT50 qui correspond à 50% de la ration complète et un témoin en circuit ouvert alimenté avec la ration complète. Chacun des traitements a été évalué en triplica dans des bassins de forme sub-carré (130 litres) à une densité de 6.2 kg/m³ par unité expérimentale. Tous les 14 jours, des pêches contrôles ont été effectuées afin de mesurer la biomasse totale du bassin et de peser et mesurer individuellement 30 individus par unité expérimentale. Les performances de croissance ont été affectées par le taux de rationnement ($P < 0,05$), contrairement à la survie ($P > 0,05$). Les diminutions du taux de rationnement à 75% et 50% ont significativement amélioré les conditions physico-chimiques, on a toutefois constaté une détérioration de la qualité du floc en distribuant la ration maximale (BFT100). Par ailleurs, les restriction alimentaire de 25% et de 50% n'ont pas été compensée par la consommation des agrégats de floc « *in situ* » si cette consommation existe, puisque la croissance y est plus faible en comparaison au témoin ($P < 0,05$) et que le FCR y est respectivement équivalent ($P > 0,05$) et plus faible ($P < 0,05$).

The effect of different levels of feed intake on the growth performance of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) in biofloc culture (BFT) was evaluated in this study over a period of 9 weeks. A clean water control and three biofloc treatments were tested : BFT100 corresponding to the full ration, BFT75 corresponding to 75% of the full ration, BFT50 corresponding to 50% of the full ration and a control fed with the full ration. Each treatment was evaluated in triplicate in sub-square tanks (130 litres) at a density of 6.2 kg/m³ per experimental unit. Every 14 days, control fisheries were carried out to measure the total biomass of the tank and to individually weigh and measure 30 individuals per experimental unit. Growth performance was affected by feeding rate ($P < 0.05$), while survival was not ($P > 0.05$). Decreasing the feeding rate to 75% and 50% significantly improved physico-chemical conditions, but there was a deterioration in floc quality when the maximum ration (BFT100) was distributed. In addition, the 25% and 50% feed restrictions were not compensated for by the consumption of floc aggregates 'in situ', if such consumption exists, since growth there was lower than in the control ($P < 0.05$) and the RCF was equivalent ($P > 0.05$) and lower respectively ($P < 0.05$).