

## Effets trophiques et zootechniques de la technologie biofloc appliquée à l'élevage de tilapia du Nil (*Oreochromis niloticus*)

**Auteur :** Chambenoit, Hippolyte

**Promoteur(s) :** Rougeot, Carole; Lepoint, Gilles

**Faculté :** Faculté des Sciences

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

**Année académique :** 2024-2025

**URI/URL :** <http://hdl.handle.net/2268.2/23836>

---

### Avertissement à l'attention des usagers :

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

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

---

Université de Liège

Laboratoire



**Département : Biologie, écologie, évolution, Faculté des sciences.**

Encadré par : **Pr. Carole Rougeot,**

**Lydie Bambi Langa, Justine Sabbe**



**Effets trophiques et zootechniques de la technologie biofloc  
appliquée à l'élevage de tilapia du Nil (*Oreochromis niloticus*).**

**Mémoire réalisé par : Hippolyte Chambenoit**

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

Année académique 2024-2025



# Table des matières

|                                                                                 |    |
|---------------------------------------------------------------------------------|----|
| REMERCIEMENTS .....                                                             | 5  |
| RÉSUMÉ .....                                                                    | 6  |
| ABSTRACT .....                                                                  | 7  |
| LISTE DES FIGURES .....                                                         | 8  |
| LISTE DES TABLEAUX .....                                                        | 10 |
| 1. INTRODUCTION .....                                                           | 11 |
| 1.1 GÉNÉRALITÉS SUR LA SITUATION MONDIALE DE LA PÊCHE ET DE L'AQUACULTURE       | 11 |
| 1.2 ÉTAT ET PERSPECTIVES DE L'AQUACULTURE .....                                 | 11 |
| 1.3 DESCRIPTION DE LA TECHNOLOGIE BIOFLOC (BFT) .....                           | 12 |
| 1.3.1 Définition, composition et structure du biofloc .....                     | 12 |
| 1.3.2 Formation du biofloc .....                                                | 14 |
| 1.3.3 Principes et fonctionnement du système de production aquacole en BFT..... | 16 |
| 1.3.4 Les avantages de BFT.....                                                 | 19 |
| 1.3.5 Applications du BFT.....                                                  | 22 |
| 1.4 LE TILAPIA DU NIL ( <i>OREOCHROMIS NILOTICUS</i> ) .....                    | 23 |
| 1.5 PROBLÉMATIQUE ET OBJECTIFS .....                                            | 25 |
| 2. MATÉRIELS ET MÉTHODES .....                                                  | 26 |
| 2.1 OBTENTION DES JUVÉNILES MONOSEXES MÂLES. ....                               | 26 |
| 2.2 DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL .....                                               | 26 |
| 2.3 STABILISATION DU SYSTÈME EXPÉRIMENTAL .....                                 | 29 |
| 2.4 GESTION DE LA QUALITÉ DE L'EAU .....                                        | 32 |
| 2.4.1 Température.....                                                          | 32 |
| 2.4.2 Oxygène dissous.....                                                      | 32 |
| 2.4.3 pH et Alcalinité.....                                                     | 32 |
| 2.4.4 Conductivité.....                                                         | 33 |
| 2.4.5 Composés azotés.....                                                      | 33 |
| 2.4.6 Volumes de floccs.....                                                    | 33 |
| 2.4.7 Matières en suspension (MES).....                                         | 34 |
| 2.4.8 Rapport C:N .....                                                         | 34 |
| 2.5 ÉVALUATION DES PARAMÈTRES ZOOTECHNIQUES.....                                | 34 |
| 2.6 ANALYSES STATISTIQUES .....                                                 | 35 |
| 3. RÉSULTATS.....                                                               | 36 |
| 3.1. GESTION DE LA QUALITÉ DE L'EAU .....                                       | 36 |
| 3.1.1. Température.....                                                         | 36 |
| 3.1.2. Oxygène dissous .....                                                    | 36 |
| 3.1.3. pH et alcalinité .....                                                   | 37 |

|        |                                                     |    |
|--------|-----------------------------------------------------|----|
| 3.1.4. | <i>Conductivité</i> .....                           | 37 |
| 3.1.5. | <i>Composés azotés</i> .....                        | 38 |
| 3.1.6. | <i>Volumes de floes</i> .....                       | 41 |
| 3.1.7. | <i>Matières en suspension (MES)</i> .....           | 43 |
| 3.2.   | ÉVALUATION DES PARAMÈTRES ZOOTECHNIQUES .....       | 45 |
| 3.2.1. | <i>Taux de survie (TS)</i> .....                    | 45 |
| 3.2.2. | <i>Taux de croissance spécifique (SGR)</i> .....    | 45 |
| 3.2.3. | <i>Taux de conversion alimentaire (FCR)</i> .....   | 45 |
| 3.2.4. | <i>Rendement (Rdt)</i> .....                        | 45 |
| 3.2.5. | <i>Coefficient de condition de Fulton (K)</i> ..... | 45 |
| 3.3.   | CROISSANCE .....                                    | 46 |
| 4.     | DISCUSSION .....                                    | 49 |
| 4.1.   | SURVIE ET CROISSANCE DES TILAPIAS .....             | 49 |
| 4.1.1. | <i>Survie</i> .....                                 | 49 |
| 4.1.2. | <i>Croissance</i> .....                             | 50 |
| 4.2.   | pH , ALCALINITÉ ET CONDUCTIVITÉ .....               | 52 |
| 4.3.   | COMPOSÉS AZOTÉS.....                                | 53 |
| 4.4.   | DYNAMIQUE DU BIOFLOC ET MATIÈRES EN SUSPENSION..... | 55 |
| 4.5.   | TAUX DE CONVERSION ALIMENTAIRE (FCR) .....          | 57 |
| 4.6.   | RENDEMENT GLOBAL DU SYSTÈME .....                   | 58 |
| 4.7.   | LIMITES MÉTHODOLOGIQUES.....                        | 58 |
| 4.8.   | PERSPECTIVES D'AMÉLIORATION .....                   | 60 |
| 5.     | CONCLUSION .....                                    | 61 |
| 6.     | BIBLIOGRAPHIE.....                                  | 62 |
| 7.     | ANNEXE.....                                         | 75 |

## Remerciements

Je souhaiterais sincèrement remercier le Pr. Carole Rougeot, qui m'a offert la chance de me dépêtrer d'une situation inconfortable en m'accueillant à bras ouverts dans son chaleureux laboratoire. Je lui suis profondément reconnaissant pour sa présence et son suivi rapproché, qui m'ont été d'une aide précieuse lors de mes manipulations et de la rédaction de ce mémoire. Ses corrections, souvent couvertes de rouge (tout était à refaire !), m'ont permis de progresser tout au long de cette dernière année d'étudiant.

Je tiens tout particulièrement à remercier Lydie Bambi Langa pour son soutien indéfectible, ses conseils avisés et sa réactivité face à mes nombreuses, TROP NOMBREUSES, questions, toujours traitées avec patience et sans jamais rester sans réponse. Merci également pour toutes les connaissances que tu m'as transmises, qui seront des bases solides pour débiter ma carrière en aquaculture.

Il est évident que je remercie chaleureusement tout le personnel du laboratoire de l'UGeRAA pour son accueil, son aide et sa bonne humeur. Notamment Justine Sabbe pour sa joie de vivre et son soutien précieux dans les moments où j'en avais le plus besoin. Christian Prignon pour ses conseils techniques, son investissement dans chacune de mes manipulations et son humour qui a détendu bien des situations. Vincent Gennotte et Jiri Bossuyt, pour leur implication et leurs conseils. Dylan Colson, pour ses pêches toujours très fructueuses. Et bien sûr, comment oublier Bodelaire, pour nos discussions pas toujours très sérieuses et ses conseils en entrepreneuriat.

Si j'en suis là aujourd'hui, c'est évidemment grâce à ma mère et mon père. Merci mille fois pour votre soutien et votre confiance inébranlable durant ces interminables années. Oui, j'ai pris mon temps, mais la vie d'étudiant, c'est plutôt agréable... alors j'ai voulu prolonger un peu. Je vous aime énormément. Merci du fond du cœur à Fred, pour ton soutien, mais surtout pour avoir rendu ma mère heureuse, si elle l'est, je ne peux que l'être aussi. Merci à ma Iza, pour tes appels FaceTime interminables, ta nonchalance, ton aversion pour la biologie et ton humour à la Michael Scott, qui a su me redonner le sourire dans mes moments les plus difficiles. Un infini de mercis à ma mamie Capote, qui a fait de moi la personne que je suis aujourd'hui. Une personne aussi incroyable que toi a forcément déteint sur moi, et je t'en suis infiniment reconnaissant. Je suis profondément heureux d'avoir la famille que j'ai, toujours souriante, qui me fait confiance, me réconforte et m'aide peu importe les situations.

Comment ne pas remercier mes meilleurs amis, avec qui j'ai fait les 400 coups, vécu des voyages inoubliables et partagé ma vie pendant ces sept, trop courtes, années. Mais rassurez-vous, je n'en ai pas encore fini avec vous, je ne vous lâcherai pas de sitôt.

Enfin, je ne peux terminer sans remercier la musique et The Office. Sans quoi, ma vie aurait été bien terne et sans saveur. Ils m'ont surtout permis de tenir bon dans une période particulièrement sombre de ma vie.

## Résumé

Ce travail avait pour objectif d'évaluer les effets de différents niveaux d'apports protéiques à partir de l'aliment distribué sur la croissance et les performances zootechniques du tilapia du Nil élevé en système biofloc. Ce système repose sur la valorisation de la biomasse microbienne et des déchets d'origine animale (bioflocs), permettant d'offrir une source nutritionnelle complémentaire en recyclant les déchets azotés tout en réduisant potentiellement la dépendance aux protéines d'origine animale.

Nous avons testé quatre conditions expérimentales réalisées en triplicats, l'un en circuit ouvert et recevant un aliment à 38% de protéines brutes (T0) et les trois autres en système biofloc recevant un aliment à 38% (T1), 32% (T2) et 28% (T3) de protéines brutes. Les paramètres zootechniques suivants ont été évalués dans chacun des lots : taux de survie, taux de croissance spécifique (SGR), taux de conversion alimentaire (FCR), rendement et coefficient de condition de Fulton (K). Ces paramètres étaient accompagnés des mesures physico-chimiques de l'eau et des flocs. Les résultats nous ont montré que la réduction du taux de protéines à 32% (T2) n'affectait pas négativement la croissance, ni les paramètres zootechniques par rapport à un aliment contenant 38% de protéines (T0 et T1). Par contre, une diminution à 28% a induit une baisse significative de la croissance et une dégradation des paramètres zootechniques chez les poissons élevés en T3, ce qui confirme l'existence d'un seuil minimum d'apport protéique pour maintenir des conditions et une production optimales.

En conclusion, nos résultats ont mis en lumière la compensation alimentaire partielle par la consommation des bioflocs lors d'une diminution modérée en protéines dans l'alimentation, offrant ainsi une perspective intéressante pour réduire les coûts alimentaires et l'impact environnemental d'un élevage de tilapia, à condition que la qualité des flocs et leur disponibilité restent optimales pour maximiser les performances de la compensation alimentaire, d'où l'importance de réaliser un suivi de leur composition chimique et nutritionnelle dans le futur.

## Abstract

This study aimed to evaluate the effects of different dietary protein levels, provided through the distributed feed, on the growth and zootechnical performances of Nile Tilapia reared in a biofloc system. This system relies on the valorization of microbial biomass and animal-origin wastes (bioflocs), providing an additional nutritional source by recycling nitrogenous waste and potentially reducing dependence on exogenous protein sources.

Four treatments were tested, each in triplicate: one in a flow-through system receiving a diet containing 38% of crude protein (T0), and three in a biofloc system fed with 38% (T1), 32% (T2), and 28% (T3) of crude protein. The following zootechnical parameters were calculated for each treatment: survival rate, specific growth rate (SGR), feed conversion ratio (FCR), yield, and Fulton's condition factor (K). These parameters were accompanied by water physicochemical measurements and floc management monitoring. Results showed that reducing the protein content to 32% (T2) did not negatively affect growth or zootechnical performances compared to a 38% protein diet (T0 and T1). However, decreasing the protein content to 28% resulted in a significant decrease in growth and a deterioration of zootechnical parameters in fish reared under T3, confirming the existence of a minimum protein intake percentage to maintain optimal conditions and production.

In conclusion, our results highlight the partial dietary compensation achieved through biofloc consumption under moderate dietary protein reduction, offering an interesting perspective for lowering feed costs and the environmental footprint of tilapia farming. However, floc quality and availability appear to be essential for maximizing dietary compensation performance, emphasizing the importance of monitoring their chemical and nutritional composition.

## Liste des Figures

|                                                                                                                                                                                                                                                                                 |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figure 1 : Image d'une particule de biofloc d'un système de production expérimental indoor, échelle à 100µm (Hargreaves, 2013).....                                                                                                                                             | 13 |
| Figure 2 : Schéma simplifié du mécanisme de formation du biofloc (Yu et al., 2023). ....                                                                                                                                                                                        | 15 |
| Figure 3 : Voies de conversion de l'ammoniaque, des nitrites et des nitrates en système biofloc (Yu et al., 2023). ....                                                                                                                                                         | 18 |
| Figure 4 : Schéma comparant les rôles des micro-organismes et l'utilisation de l'azote entre un système biofloc et un système en circuit ouvert (Liu et al., 2019; Jamal et al., 2020). ....                                                                                    | 21 |
| Figure 5 : Plan de l'installation expérimentale (non à l'échelle). BFT : biofloc, PB : protéines brutes .....                                                                                                                                                                   | 28 |
| Figure 6 : Étapes d'avancement (de gauche à droite) de la formation du biofloc au lancement de la phase de stabilisation. A : bassin vide présentant les différentes composantes, B : remplissage de l'eau de puits, C : bassin biofloc.....                                    | 30 |
| Figure 7 : Graphique de l'évolution des concentrations moyennes (mg/l) en $\text{NH}_4^+$ (en orange) et $\text{NO}_2^-$ (en bleu) et des volumes de flocs moyens (ml/l) (en vert) dans les bacs en système biofloc pendant la première phase de stabilisation. ....            | 31 |
| Figure 8 : Graphique de l'évolution des concentration moyennes (mg/l) en $\text{NH}_4^+$ (en orange) et $\text{NO}_2^-$ (en bleu) et des volumes de flocs moyens (ml/l) (en vert) dans les bacs en système biofloc pendant la deuxième phase de stabilisation. ....             | 31 |
| Figure 9 : Graphique de l'évolution de la concentration moyenne±écarts-types en ammonium ( $\text{NH}_4^+$ ) (mg/l) dans les différents traitements durant la phase expérimentale (42 jours).CO : circuit ouvert, BFT : biofloc. ....                                           | 39 |
| Figure 10 : Graphique de l'évolution de la concentration moyenne±écarts-types en nitrites ( $\text{NO}_2^-$ ) (mg/l) dans les bassins contrôles (T0) et les bassins en Biofloc (T1 à T3) au cours de la phase expérimentale (42 jours).CO : circuit ouvert, BFT : biofloc. .... | 40 |
| Figure 11 : Graphique de l'évolution de la concentration moyenne±écarts-types en nitrates ( $\text{NO}_3^-$ ) (mg/l) dans les bassins contrôles (T0) et les bassins en Biofloc (T1 à T3) au cours de la phase expérimentale (42 jours).CO : circuit ouvert, BFT : biofloc. .... | 41 |
| Figure 12 : Évolution des volumes de flocs (ml/l) moyens par condition expérimentale durant la phase expérimentale (42 jours), cadre orange : probable dysfonctionnement des conditions biofloc. BFT : biofloc. ....                                                            | 42 |

|                                                                                                                                                                                                                  |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figure 13 : Variabilité (écarts-types) des volumes de floes (ml/l) par condition expérimentale pendant la phase expérimentale (42 jours). Spearman, $p=0,33$ . BFT : biofloc. ....                               | 43 |
| Figure 14 : Graphique de la corrélation entre les matières en suspension (mg/l) et les volumes de floes (ml/l). Spearman, $p=0,08$ . BFT : biofloc.....                                                          | 44 |
| Figure 15 : Graphique de l'évolution des poids moyens $\pm$ écarts-types (g) par condition expérimentale durant la phase expérimentale (42 jours). CO : circuit ouvert, BFT : biofloc.                           | 47 |
| Figure 16 : Graphique de l'évolution des biomasses moyennes $\pm$ écarts-types (g) par condition expérimentale durant la phase expérimentale (42 jours). CO : circuit ouvert, BFT : biofloc.                     | 47 |
| Figure 17 : Graphiques présentant la croissance individuelle (poids en g) des poissons pit-tagués par condition expérimentale durant la phase expérimentale (42 jours). CO : circuit ouvert, BFT : biofloc. .... | 48 |

## Liste des Tableaux

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tableau 1 : Valeurs des principaux paramètres physico-chimiques au cours de l'élevage de tilapia du Nil en Biofloc (T1 à T3) et en CO = circuit ouvert (T0) : température, oxygène dissous, pH, alcalinité et conductivité. Moyenne $\pm$ EC.....                                                           | 38 |
| Tableau 2 : Moyennes $\pm$ écarts-types des mesures des composés azotés et des floes (V = volume, MES = matière en suspension), en élevage de tilapia du Nil. CO : circuit ouvert, BFT : biofloc.....                                                                                                       | 44 |
| Tableau 3 : Moyennes $\pm$ écarts-types des mesures des paramètres zootechniques taux de survie (%) ; taux de Croissance Spécifique (SGR, %/j) ; taux de Conversion Alimentaire (FCR) ; Rendement (Rdt, kg/m <sup>3</sup> /an) ; coefficient de condition de Fulton (K), en élevage de Tilapia du Nil. .... | 46 |

# **1. Introduction**

## **1.1 Généralités sur la situation mondiale de la pêche et de l'aquaculture**

Dans un contexte de croissance démographique mondiale, la demande alimentaire suit une trajectoire similaire. La consommation mondiale de produits aquatiques a ainsi doublé entre les années 1990 et 2022, passant de 81,6 à 164,6 millions de tonnes (Martinez-Porchas & Martinez-Cordova, 2012; FAO, 2024). Parallèlement, les protéines animales d'origine aquatique occupent une place de plus en plus importante dans l'alimentation humaine : la consommation annuelle moyenne par habitant est passée de 14,4kg à 20,7kg en 30 ans. Cette tendance pourrait se poursuivre jusqu'à atteindre 21,4kg d'ici 2030 selon les projections de l'OCDE (OCDE & Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture, 2022; FAO, 2024). Pour répondre à cette demande, la production globale de produits aquatiques, par l'aquaculture, s'est intensifiée, atteignant 185,4 millions de tonnes en 2022, contre 110,7 millions dans les années 1990. Près de 89% de cette production est destinée à l'alimentation humaine, le reste étant principalement transformé en farine ou en huile de poisson (FAO, 2024).

Jusqu'au début des années 2000, la pêche était perçue comme une solution d'avenir pour subvenir aux besoins en protéines animales (Belton et *al.*, 2020). Cependant, la surexploitation des ressources marines et la baisse continue des stocks halieutiques ont remis en question ce modèle. L'aquaculture a alors émergé comme une alternative plus durable, capable de répondre aux enjeux du changement climatique et à la pression croissante sur les ressources naturelles (Troell et *al.*, 2014; Jiang et *al.*, 2022). Pour la première fois en 2022, la production aquacole a dépassé celle issue de la pêche marine, avec respectivement 94 et 91 millions de tonnes d'animaux aquatiques produits (FAO, 2024). Elle représente également un levier de développement économique pour les pays en voie de développement, en favorisant les échanges commerciaux et la valorisation de certaines espèces à forte valeur ajoutée, comme les crevettes au Vietnam (Martinez-Porchas & Martinez-Cordova, 2012).

## **1.2 État et perspectives de l'aquaculture**

Bien qu'elle soit souvent perçue comme une alternative inévitable à la pêche, l'aquaculture présente plusieurs impacts environnementaux qui remettent en cause sa durabilité (Frankic & Hershner, 2003). Parmi les principaux problèmes identifiés figurent la surconsommation d'eau et d'énergie, les émissions de gaz à effet de serre, la destruction d'écosystèmes pour

l'implantation des fermes aquacoles, la pollution des eaux douces et l'abandon des sites de production devenus inexploitable (Martinez-Porchas & Martinez-Cordova, 2012; Troell et al., 2014; Meng & Feagin, 2019; MacLeod et al., 2020; Jiang et al., 2022). En 2018, la production aquacole mondiale consommait déjà d'importantes quantités d'eau et d'énergie, et cette tendance s'est poursuivie avec la hausse de la production observée jusqu'en 2022 (Jiang et al., 2022). Malgré cela, les pays en développement consomment souvent plus de ressources pour produire moins, en raison de l'absence d'infrastructures modernes et durables.

Face à ces défis, des solutions émergent. La transformation bleue, portée par la FAO, vise à promouvoir une production alimentaire plus durable et résiliente, notamment dans les pays en développement. L'approche nexus, quant à elle, propose une gestion intégrée tenant compte des interactions entre eau, énergie, alimentation et environnement (J. Liu et al., 2018).

Enfin, des innovations « technologiques » comme l'aquaponie, le multitrophisme et le système biofloc, offrent une perspective de réponse concrète aux problématiques environnementales et économiques. Dans cet optique, notre travail se focalise sur la technologie Biofloc.

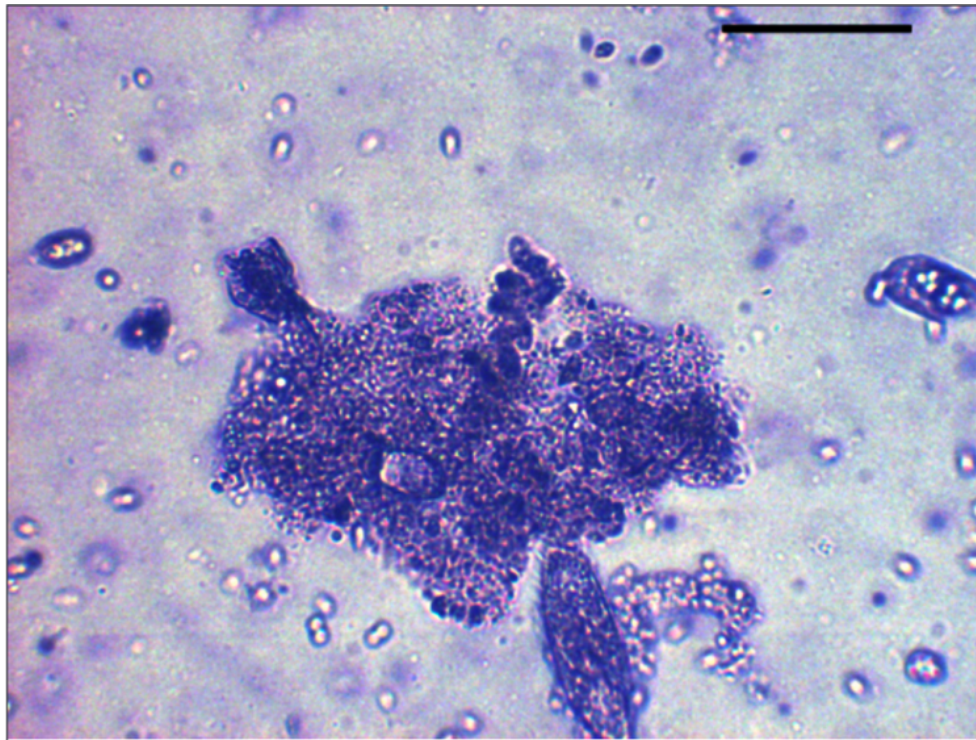
### **1.3 Description de la technologie Biofloc (BFT)**

#### **1.3.1 Définition, composition et structure du biofloc**

Initialement développé dans les années 1970 en France par l'IFREMER, puis dans les années 90' adapté aux crevettes (*Litopenaeus vannamei*) en Caroline du Sud (Hopkins JS, 1993), et en Israël sur le tilapia du Nil (*Oreochromis niloticus*) (Avnimelech Y, 1994), ce système limite les besoins en renouvellement d'eau, même en élevage intensif, valorisant les déchets organiques pour nourrir les poissons (Avnimelech, 1999; Hargreaves, 2013; H. Liu et al., 2019; Yu et al., 2023). Le biofloc est défini par Hargreaves (2013) comme un « agrégat d'algues, de bactéries, de protozoaires et d'autres particules organiques (fèces, nourriture non consommée) associées à des zooplanctons et à des nématodes, formant un écosystème intégré et interdépendant » (Hargreaves, 2013; Jamal et al., 2020).

Il s'agit donc d'agrégats irréguliers et relativement fragiles de matière organique, maintenus ensemble dans une matrice par diverses forces physiques. Cette cohésion est assurée par des sécrétions bactériennes (notamment issues d'actinobactéries, importantes dans la structuration

du floc), par des réseaux de bactéries filamenteuses (éléments structuraux majeurs du floc), ainsi que par des forces d'attraction électrostatiques (De Schryver *et al.*, 2008; Hargreaves, 2013; Samocha *et al.*, 2019; H. Liu *et al.*, 2019). Ces flocs présentent des tailles variables, de 50 à 200µm, et une densité légèrement supérieure à 1g/ml en poids sec, ce qui leur permet de rester en suspension dans la colonne d'eau et de sédimenter lentement (Figure 1) (Hargreaves, 2013; Samocha *et al.*, 2019).



**Figure 1 :** Image d'une particule de biofloc d'un système de production expérimental indoor; échelle à 100µm (Hargreaves, 2013).

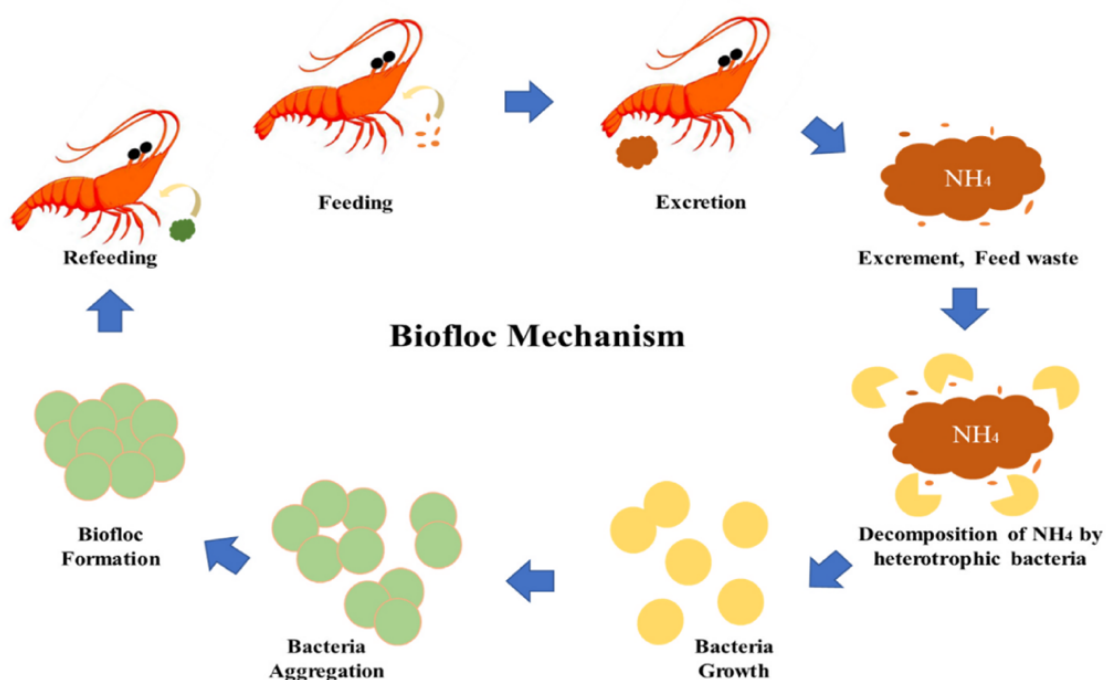
Leur valeur nutritionnelle est notable, car ils contiennent vitamines et minéraux, bien que leur composition reste variable. Par exemple, leur teneur en protéines peut représenter entre 25 et 50% de leur masse (Hargreaves, 2013). Les micro-organismes qui les composent sont nombreux, et leurs rôles (développés *infra* au point 1.3.3) sont à différents degrés connus. Parmi les plus importants pour le recyclage de la matière organique et des déchets azotés, nous retrouvons (par ordre décroissant d'importance) : les bactéries hétérotrophes (les plus diversifiées et abondantes), les bactéries nitrifiantes (chémoautotrophes), les phytoplanctons (principalement des chlorophytes, cyanophycées et diatomées), ainsi que des champignons, levures, et divers groupes de zooplancton (protozoaires tels que les ciliés, rotifères, copépodes : à forte valeur nutritionnelle, cladocères et nématodes) (Emerenciano *et al.*, 2017).

Tous ces organismes interagissent et constituent un écosystème microbien complexe. Ces interactions (comme le mutualisme ou le commensalisme) sont responsables de la stabilité et de la valeur écologique du système. Par exemple, certaines bactéries profitent du carbone des parois de diatomées, tandis que d'autres peuvent cohabiter entre elles sans subir de préjudices. En l'absence de renouvellement d'eau, des biofilms se développent autour des agrégats de substrats, hébergeant des microorganismes comme les bactéries hétérotrophes (utilisant le carbone de la matière organique) et les bactéries nitrifiantes (convertissant les composés azotés toxiques en formes moins nocives par nitrification). Ces biofilms attirent les ions inorganiques, favorisant ainsi l'activité microbienne et contribuant au maintien de la qualité de l'eau (Emerenciano et *al.*, 2017).

### **1.3.2 Formation du biofloc**

Dans un biofloc extérieur, les bassins sont d'abord colonisés par des microalgues, ce qui confère à l'eau une teinte verdâtre : nous parlons alors de « greenwater ». En milieu intérieur, à la suite de l'ajout de matière organique, les bactéries se développent en premier, suivies des organismes zooplanctoniques, conférant cette fois une teinte brunâtre à l'eau, appelée « brown-water » (Hargreaves, 2013; Khanjani & Sharifinia, 2020; Chutia et *al.*, 2022; McCusker et *al.*, 2023; Yu et *al.*, 2023).

Le processus de formation du biofloc peut ainsi être envisagé comme un cycle reposant sur les interactions entre les différents niveaux trophiques présents dans le bassin. L'aliment exogène est ingéré par l'organisme cultivé, qui rejette ensuite une partie des macro- et micronutriments non assimilés, principalement via les fèces. Ces déchets, ainsi que la nourriture non consommée, sont décomposés et recyclés par les bactéries hétérotrophes. Celles-ci se développent alors, notamment grâce à l'absence de renouvellement d'eau, formant des biofilms puis des bioflocs, d'où le nom de la technologie (Figure 2) (Yu et *al.*, 2023).



*Figure 2 : Schéma simplifié du mécanisme de formation du biofloc (Yu et al., 2023).*

Le développement bactérien doit être stimulé par l'ajout de matière organique telle que la mélasse, utilisée comme source de carbone. Les bactéries hétérotrophes l'utilisent comme substrat énergétique pour croître. Cependant, il est essentiel de surveiller activement le rapport carbone:azote (C:N) en contrôlant les apports en mélasse (carbone) et en aliment (azote). Une augmentation trop rapide de ces apports peut entraîner une accumulation de composés azotés toxiques, mais aussi augmenter la quantité de solides en suspensions pouvant induire une consommation élevée en oxygène dissous ou encore une occlusion des branchies des animaux produits (Avnimelech, 1999; De Schryver et al., 2008; Hargreaves, 2013; M. G. C. Emerenciano et al., 2017; Samocha et al., 2019).

Les bioflocs, malgré leur formation naturelle, forment un écosystème microbien complexe qui nécessite un contrôle rigoureux pour éviter les déséquilibres et maximiser leur potentiel. L'élevage en biofloc ne se limite pas à l'élevage d'une seule espèce, mais implique la gestion d'un écosystème interconnecté. Il est donc primordial d'effectuer un suivi rigoureux des paramètres physico-chimiques afin de garantir le bon fonctionnement du système. La température, l'oxygène dissous, le pH (ou l'alcalinité), la concentration en matière organique, l'intensité lumineuse et la puissance d'aération doivent non seulement être maîtrisés pour

assurer le développement du biofloc, mais également être compatibles avec les besoins physiologiques de l'espèce cultivée (De Schryver et *al.*, 2008; Ogello et *al.*, 2014; Samocha et *al.*, 2019). Un déséquilibre peut entraîner une chute de l'activité microbienne, une dégradation de l'environnement aquatique et une prolifération de pathogènes, susceptibles d'infecter les espèces élevées (McCusker et *al.*, 2023).

Souvent, une température entre 28 et 30°C est recommandée afin de préserver la croissance des communautés microbiennes et la stabilité trophique (Emerenciano et *al.*, 2017). Le pH devrait être maintenu entre 6,8 et 8 pour les espèces d'eau douce, et entre 7,8 et 8,4 pour celles d'eau saumâtre ou marine, afin d'éviter des perturbations physiologies ou chimiques. Un pH trop élevé favorise la conversion de l'ammonium ( $\text{NH}_4^+$ ) en ammoniac ( $\text{NH}_3$ ), forme toxique. Le pH est régulé via l'alcalinité, qui confère au système un pouvoir tampon. En cas de baisse, nous pouvons ajouter du bicarbonate de sodium. Par ailleurs, les bactéries consomment de l'alcalinité lors du traitement des déchets azotés : il convient donc de la maintenir au-dessus de 100mg/l (Wilén et *al.*, 2000; Emerenciano et *al.*, 2013; Emerenciano et *al.*, 2017; McCusker et *al.*, 2023). Concernant les nitrates ( $\text{NO}_3^-$ ), un seuil maximal (variable selon l'espèce élevée) a été proposé, car un dépassement peut entraîner une baisse des taux de croissance et de survie, ainsi que des malformations (Hargreaves, 2013).

### **1.3.3 Principes et fonctionnement du système de production aquacole en BFT**

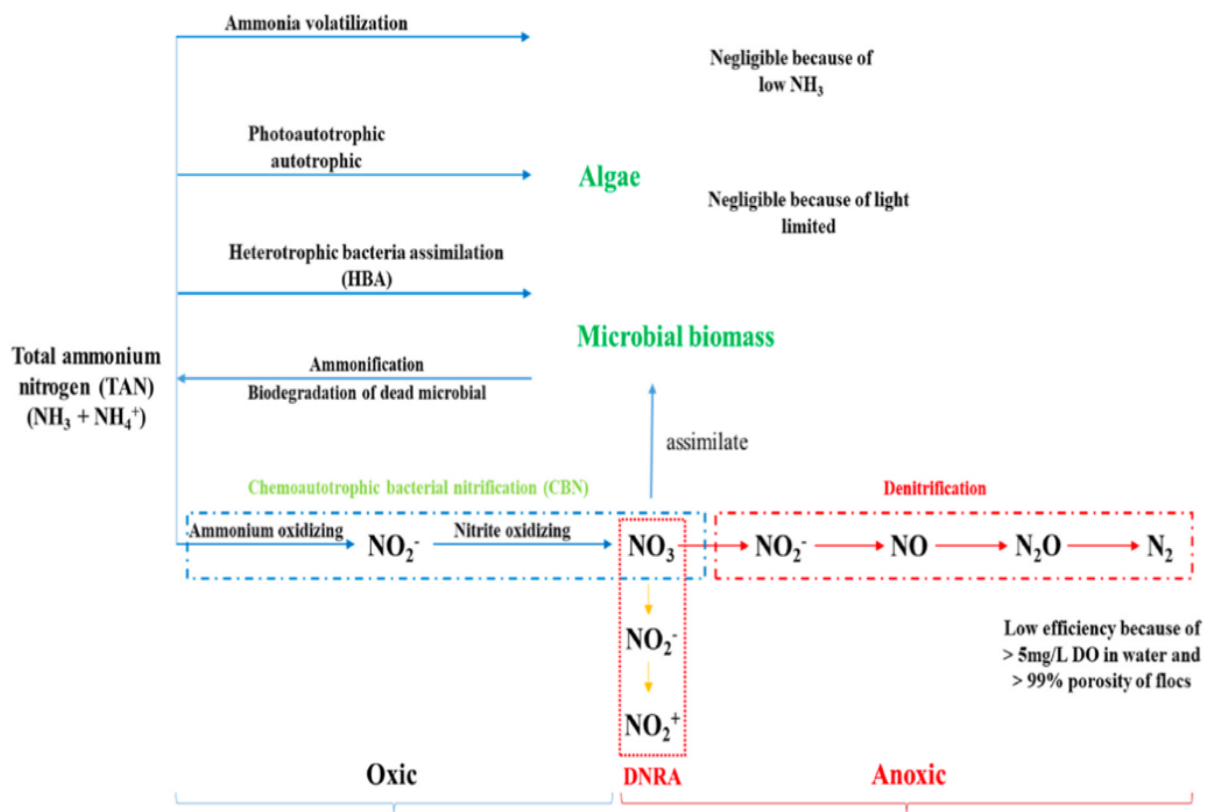
Le Biofloc Technology System (BFT) repose sur une faible circulation d'eau et une forte activité microbienne, permettant à la fois le traitement des déchets et l'amélioration de la qualité de l'eau. D'après Jamal et *al.* (2020), il représente même « le meilleur système pour l'utilisation de l'eau et le traitement des déchets ». Cette approche peut sembler contre-intuitive, car elle va à l'encontre des principes de gestion conventionnels utilisés en aquaculture en circuit ouvert ou recirculé. En effet, elle limite tout renouvellement de l'eau et favorise l'accumulation de matière organique en suspension (Hargreaves, 2013; Yu et *al.*, 2023). Or traditionnellement, l'élimination des déchets azotés, potentiellement toxiques, impliquait un renouvellement constant de l'eau selon un débit adapté à l'espèce élevée.

Le BFT repose sur deux principes clés. D'une part, la prédigestion des aliments par les bactéries améliore leur valeur nutritionnelle, optimisant leur assimilation et réduisant le taux de conversion alimentaire (FCR). D'autre part, le recyclage des matières fécales et des aliments non digérés en nutriments assimilables permet de maintenir une bonne qualité de l'eau tout en produisant des protéines bactériennes bénéfiques pour la croissance des espèces élevées, leur bien-être, et la lutte contre certains pathogènes (Avnimelech, 1999; Ray et *al.*, 2017; Emerenciano et *al.*, 2017; Liu et *al.*, 2019; Yu et *al.*, 2023).

Outre la transformation de l'azote en acides aminés puis en protéines digestibles, les microorganismes du biofloc enrichissent le système en acides gras (essentiels comme le DHA et l'EPA), en vitamines et en micronutriments (Emerenciano et *al.*, 2017; Liu et *al.*, 2019). Étant donné l'importance des communautés bactériennes, il est essentiel de contrôler précisément leur croissance, qui dépend du rapport carbone:azote (C:N). Ce rapport est ajusté par l'ajout de sources de carbone (ex. : mélasse, sucre), dont le choix dépend du coût et de la concentration en carbone. Ce paramètre est déterminant car il influence directement la structure des communautés bactériennes. Par exemple, un rapport C:N de 20:1 favorise les bactéries hétérotrophes, plus rapides à se développer. À l'inverse, un rapport inférieur à 9:1 limitera la croissance des hétérotrophes et favorisera la nitrification par les organismes photoautotrophes et autotrophes. Un environnement mixotrophe, où coexistent hétérotrophes et chémoautotrophes, est obtenu avec un ratio compris entre 9:1 et 15:1 (Yu et *al.*, 2023).

L'azote suit différents chemins de transformation dans le BFT, en conditions aérobies. L'ammonification libère l'ammonium par dégradation de la matière organique, puis quatre autres voies assurent la transformation de l'azote : l'assimilation par les microalgues (limitée par la lumière), par les bactéries hétérotrophes (via la dégradation des sucres et matières organiques), la nitrification et la volatilisation de l'ammoniaque (Figure 3). Les copépodes, organismes détritivores de niveau trophique supérieur, consomment ces bactéries riches en protéines (jusqu'à 49% de la matière sèche) et en acides aminés indispensables, constituant ainsi une nourriture de qualité pour les poissons (Støttrup and McEvoy, 2003; Van Der Meeren et *al.*, 2008; McCusker et *al.*, 2023).

La nitrification, processus central, repose sur l'action successive de deux types de bactéries chémoautotrophes : les bactéries oxydant de l'ammoniac du genre *Nitrosomonas* (AOB), qui transforment l'ammoniac en nitrites, puis les *Nitrobacter* (NOB), convertissant les nitrites en nitrates, forme la moins toxique. Sur le long terme, les nitrates peuvent facilement être éliminés du système par un faible renouvellement d'eau ou, en conditions anaérobiques, par dénitrification, qui les transforme en azote gazeux évacué par évaporation (Emerenciano et *al.*, 2017; Yu et *al.*, 2023).



**Figure 3 :** Voies de conversion de l'ammoniaque, des nitrites et des nitrates en système biofloc (Yu et *al.*, 2023).

Le zooplancton, en particulier les copépodes, profite de l'accumulation de biomasse microbienne et algale pour croître. Ces organismes constituent à leur tour une ressource alimentaire hautement nutritive pour les espèces élevées (Emerenciano et *al.*, 2013; Hargreaves, 2013; Samocha et *al.*, 2019; McCusker et *al.*, 2023; Debbarma et *al.*, 2023). Cette dernière constitue un facteur déterminant dans la réussite d'un élevage en biofloc, car elle doit être capable de tolérer les conditions spécifiques imposées par ce type de système. Il est donc essentiel qu'un équilibre dynamique s'instaure entre les besoins de l'espèce élevée et les exigences du biofloc lui-même : l'espèce doit non seulement pouvoir tirer profit des produits

issus du biofloc, mais aussi fournir la matière organique nécessaire à l'entretien de la communauté microbienne (Ogello et *al.*, 2014). Cela implique de choisir des espèces capables de répondre à plusieurs critères.

D'après Debbarma et *al.* (2023), trois conditions principales doivent être remplies pour qu'une espèce soit adaptée au BFT : elle doit supporter de fortes concentrations en matières en suspension, survivre dans une eau de qualité inférieure à celle des systèmes classiques, et être capable de tirer parti des produits du biofloc en tant que ressource alimentaire (Emerenciano et *al.*, 2013; Debbarma et *al.*, 2023). Certaines espèces remplissent ces conditions, notamment plusieurs crustacés comme *Litopenaeus vannamei*, ainsi que certaines carpes (ex : *Cyprinus carpio*) et le tilapia du Nil (*Oreochromis niloticus*), ce dernier représentant plus de 90% de la production mondiale de tilapia (Wang & Lu, 2016; Khanjani et *al.*, 2022).

#### **1.3.4 Les avantages de BFT**

Le système Biofloc repose sur plusieurs mécanismes clés qui présentent des avantages directs pour l'élevage, mais également des effets indirects bénéfiques pour l'environnement :

a) L'absence de renouvellement en eau :

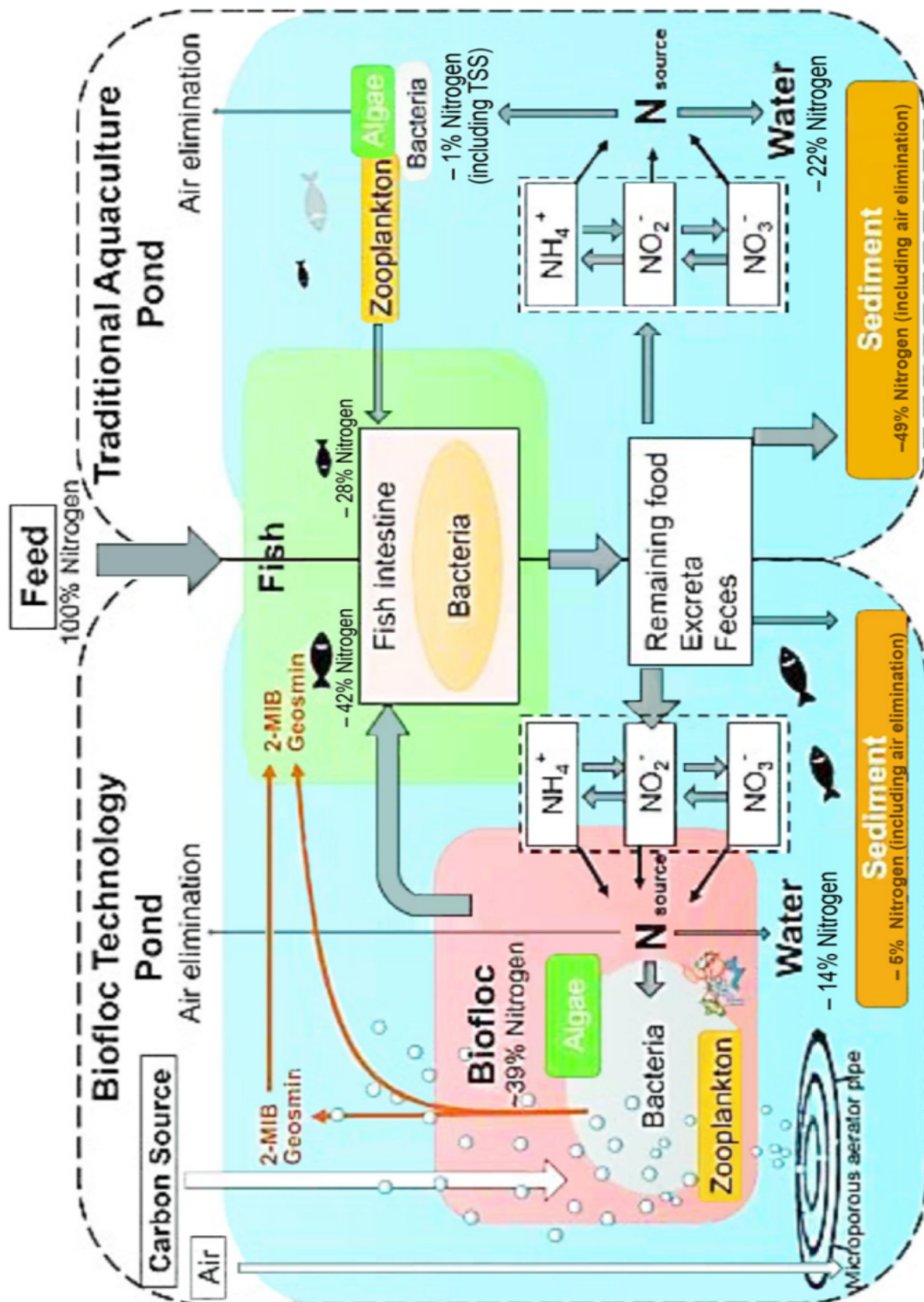
- réduit considérablement l'impact environnemental, en évitant les rejets d'effluents riches en azote ammoniacal ou nitreux, fréquent dans les systèmes en circuit ouvert (Crab et *al.*, 2012; Yu et *al.*, 2023) ;
- facilite l'implantation d'exploitations dans des zones arides ou en développement, où l'eau constitue une ressource limitée et précieuse, tout en diminuant les coûts de production (Ulloa Walker et *al.*, 2020; Yu et *al.*, 2023) ;
- améliore la biosécurité en réduisant les risques d'introduction de pathogènes externes via l'eau neuve (Yu et *al.*, 2023).

b) Le rôle des microorganismes dans le système :

- permet la prédigestion des aliments, améliorant ainsi le taux de conversion alimentaire (FCR) et réduisant la quantité d'aliment nécessaire de 30 à 37 %, avec à la clé une baisse des coûts de production de 14% (Pérez-Fuentes et *al.*, 2016; Yu et *al.*, 2023) ;

- contribue à la transformation des composés azotés toxiques en protéines microbiennes, riches en nutriments, qui complètent l'alimentation des animaux d'élevage (Khanjani et *al.*, 2022; Yu et *al.*, 2023) ;
- limite les rejets polluants dans l'environnement, en dehors des nitrates, qui ne deviennent toxiques qu'à forte concentration (Khanjani et *al.*, 2022; Yu et *al.*, 2023) ;
- joue un rôle probiotique en entrant en compétition avec les agents pathogènes pour l'espace, les nutriments et le substrat, tout en stimulant le système immunitaire non spécifique des animaux. Ce mécanisme permet de prévenir les infections et de limiter, voire éliminer, l'usage d'antibiotiques (Emerenciano et *al.*, 2013; Kim et *al.*, 2014; Samocha et *al.*, 2019; Yu et *al.*, 2023) ;
- favorise une meilleure croissance et un taux de survie accru, en fournissant une source alimentaire de haute qualité (Ekasari et *al.*, 2014; Kim et *al.*, 2020; Kumar et *al.*, 2021; Yu et *al.*, 2023) ;
- colonise le microbiote intestinal des espèces élevées, empêchant ainsi le développement de micro-organismes pathogènes (Kumar et *al.*, 2021; Yu et *al.*, 2023).

Hargreaves (2013) a proposé une analyse comparative entre le BFT et le RAS, selon six critères : la biosécurité, la conversion alimentaire, l'usage de l'eau, l'occupation des sols, la qualité de l'eau et la sensibilité à la lumière. Il en ressort que le système Biofloc est supérieur dans tous les critères, à l'exception de l'amélioration de la conversion alimentaire, qui reste un atout du RAS (Hargreaves, 2013). Liu et *al.* (2019) ont montré que près de 49% de l'azote total se retrouve dans les sédiments en système ouvert, alors que dans un système Biofloc, la majorité de l'azote est incorporée dans la biomasse microbienne ingérée par les poissons. Ceux-ci deviennent le principal compartiment de stockage de l'azote dans le système, ne laissant qu'environ 5% d'azote dans les sédiments (Figure 4). Ce recyclage trophique interne contribue à limiter les rejets azotés et réduit la nécessité d'un renouvellement d'eau fréquent (H. Liu et *al.*, 2019; Jamal et *al.*, 2020).



**Figure 4 :** Schéma comparant les rôles des micro-organismes et l'utilisation de l'azote entre un système biofloc et un système en circuit ouvert (Liu et al., 2019; Jamal et al., 2020).

### 1.3.5 Applications du BFT

La technologie Biofloc, qui a déjà largement fait ses preuves avec des organismes principalement filtreurs ou herbivores tels que les crevettes et le tilapia, suscite un intérêt croissant en aquaculture. Bien qu'encore en phase d'optimisation et d'extension à d'autres espèces, les résultats obtenus à ce jour laissent entrevoir un fort potentiel.

Dans le domaine de l'alimentation, les microorganismes présents dans le biofloc produisent certains acides aminés, tels que l'arginine ou la glycine, qui pourraient agir comme attractants alimentaires pour diverses espèces aquatiques. Nunes et *al.* (2006) ont démontré que ces acides aminés stimulent la prise de nourriture chez la crevette *Litopenaeus vannamei*, illustrant ainsi le rôle du biofloc dans la réduction des apports alimentaires exogènes, tout en limitant les pertes de nourriture (Nunes et *al.*, 2006; McCusker et *al.*, 2023). Par ailleurs, l'utilisation du Biofloc durant la phase de nursery ou de croissance a montré des résultats encourageants pour plusieurs espèces. Chez *Farfantepenaeus paulensis*, une amélioration de 50% de la croissance individuelle et de 80% de la biomasse finale totale a été observée, comparée à un élevage en circuit ouvert (Ballester et *al.*, 2010; Emerenciano et *al.*, 2011, 2013). Nous pouvons expliquer ces résultats par l'enrichissement naturel du milieu en protéines microbiennes et par l'effet probiotique des microorganismes présents, qui renforcent la santé et l'immunité des animaux (Emerenciano et *al.*, 2013).

L'application du Biofloc à la reproduction aquacole reste limitée. Quelques études menées sur des crevettes ont toutefois révélées des résultats prometteurs, avec une augmentation du nombre d'œufs, du taux de frai et du nombre de femelles reproductrices (Emerenciano et *al.*, 2012, 2013, 2014). De plus, du fait de l'effet probiotique naturel induit par les microorganismes du biofloc, cette technologie pourrait être utilisée pour limiter le développement de pathogènes, en particulier pour les espèces les plus sensibles ou dotées d'un système immunitaire immature (Emerenciano et *al.*, 2013).

Le Biofloc peut aussi être intégré avec les technologies hydroponiques, permettant la mise en place de systèmes en aquaponies combinant la production de protéines animales aquatiques avec celle de fruits et légumes. Dans ces systèmes intégrés, les déchets produits par les animaux

(notamment les composés azotés toxiques pour les poissons) sont valorisés comme nutriments pour les plantes, réduisant à la fois les rejets polluants et les besoins en fertilisants. Si l'aquaponie était historiquement associée aux RAS, des essais récents en Biofloc ont montré des résultats prometteurs. Toutefois, cette combinaison nécessite un management rigoureux, car la concentration élevée de particules en suspension dans le Biofloc peut poser problème : les solides peuvent s'accumuler autour des racines des plantes, former un biofilm et entraver l'absorption des nutriments (Emerenciano et *al.*, 2013; Bossier & Ekasari, 2017).

L'utilisation du Biofloc en polyculture, où l'élevage de deux espèces aquatiques à niveaux trophiques différents permet une valorisation complémentaire des ressources est une application intéressante. En utilisant différentes niches alimentaires, ces espèces contribuent à la réduction des déchets et à l'amélioration des performances de croissance (Rahman et *al.*, 2008; Crab et *al.*, 2012; Bossier & Ekasari, 2017). Par exemple, dans un système BFT associant le tilapia du Nil (*Oreochromis niloticus*) et la crevette d'eau douce (*Macrobrachium rosenbergii*), des performances de croissances supérieures ont été observées par rapport à des élevages en monoculture ou encore en polyculture en RAS (Hisano et *al.*, 2019; Jamal et *al.*, 2020). Par ailleurs, Kuhn et *al.* (2009) ont utilisé du biofloc de tilapia séché comme aliment pour les crevettes et ont montré une croissance hebdomadaire 1,6 fois plus élevée que celle obtenue avec un aliment commercial standard (Kuhn et *al.*, 2009; Crab et *al.*, 2012).

#### **1.4 Le tilapia du Nil (*Oreochromis niloticus*)**

Le tilapia du Nil est largement répandu en aquaculture, occupant la quatrième place en termes de production animale mondiale atteignant près de 5,3 millions de tonnes produites en 2022, selon les données de la FAO (2024). Sa production annuelle connaît une croissance de 8%, ce qui laisse envisager qu'il pourrait devenir l'espèce la plus cultivée au monde dans les prochaines décennies (Barriga-Sosa et *al.*, 2004; Tacon et *al.*, 2011; Hisano et *al.*, 2019; Hersi et *al.*, 2023; FAO, 2024).

Ce succès s'explique par plusieurs facteurs. Sur le plan organoleptique, sa chair blanche, ferme et sans arêtes est appréciée des consommateurs. D'un point de vue écologique, le tilapia présente une tolérance élevée à une grande variété de conditions environnementales, aux

maladies et à des densités de peuplement élevées, ce qui en fait une espèce résiliente et simple à élever (Avnimelech, 2007; Simões et al., 2007; Grassi et al., 2016; Hisano et al., 2019; Durigon et al., 2020; Hisano et al., 2021; Khanjani et al., 2022; FAO, 2025). Nous retrouvons le tilapia dans une grande diversité de milieux, allant des rivières et lacs, aux eaux saumâtres, démontrant sa capacité d'adaptation à différents types de systèmes d'élevage, y compris en biofloc (Likongwe et al., 1996; Avnimelech, 2007; Wang & Lu, 2016; Barroso et al., 2019; Khanjani et al., 2021, 2022; Hersi et al., 2023).

De plus, son régime omnivore, associé à une morphologie buccale adaptée à la filtration, lui permet d'ingérer à la fois des aliments exogènes et les particules en suspension (bactéries, phytoplancton, zooplancton) présentes dans la colonne d'eau (Beveridge et al., 1989; Avnimelech, 2007; Ogello et al., 2014; Rodrigues et al., 2017; Pérez-Fuentes et al., 2018; Durigon et al., 2020; Khanjani et al., 2022). Cette capacité à consommer les floes (qui peuvent représenter jusqu'à 25% de son alimentation) lui permet d'accéder à des sources de protéines supplémentaires, les biofloes pouvant contenir jusqu'à 58% de protéines (Avnimelech & Kochba, 2009; Crab et al., 2010; Hisano et al., 2020).

Cette aptitude est particulièrement importante compte tenu des besoins en protéines du tilapia, estimés entre 20 et 56%, alors que les protéines représentent le composant le plus coûteux d'un aliment aquacole (jusqu'à 50% du coût de l'aliment) (Liti et al., 2005; El-Sayed, 2020; Nguyen et al., 2021). Le système Biofloc, en optimisant le coefficient de conversion alimentaire (FCR), permet non seulement de mieux valoriser les apports protéiques mais aussi de réduire les coûts de production, répondant ainsi à la problématique centrale de la rentabilité en aquaculture (Ogello et al., 2014). Par ailleurs, le tilapia étant originaire de régions d'Afrique où l'accès à l'eau est souvent limité, le développement du BFT représente un levier considérable pour les pays en développement. En optimisant la gestion de l'eau et les intrants alimentaires, ce système pourrait offrir une solution durable aux contraintes locales (FishBase, s. d.; FAO, 2025). Malgré tout, les connaissances sur les interactions précises entre le tilapia et le biofloc demeurent encore incomplètes. La compréhension de son utilisation des floes en tant que ressource alimentaire nécessite encore des recherches approfondies (Pérez-Fuentes et al., 2018). C'est donc dans ce contexte que la problématique de ce travail a été posée.

### 1.5 Problématique et objectifs

Parmi les grands défis actuels de l'aquaculture évoqués précédemment, ce projet de recherche s'attache à répondre à l'un d'entre eux : l'optimisation des pratiques alimentaires en élevage de juvéniles de tilapia du Nil (*Oreochromis niloticus*) dans un système Biofloc. Puisque d'après Bossier et Ekasari (2017) : "Il y a un besoin urgent de faire plus de recherches sur les paramètres opératoires du biofloc afin d'optimiser le système". Ce travail a pour objectif d'apporter, d'une part, des connaissances sur la consommation de floes par le tilapia dans un élevage en système biofloc, et d'autre part, de mieux comprendre les interactions existantes entre la consommation des floes et le niveau d'apport protéique (aliment exogène). La question centrale qui guidera notre étude est la suivante : dans quelle mesure les niveaux d'apport de protéines en système biofloc influencent-ils le régime alimentaire (consommation des floes), la croissance ainsi que la survie chez les juvéniles de tilapia du Nil ?

Pour y répondre, nous avons

- évalué l'impact de différents niveaux d'apport protéiques sur la croissance et la survie du tilapia
- étudié les performances globales des tilapias à l'aide de différents paramètres zootechniques qui constituent des indicateurs essentiels en aquaculture, dont l'indice de croissance spécifique (SGR), le taux de conversion alimentaire (FCR), le rendement et le coefficient de condition (K)
- observé le rôle potentiel des biofloes dans la compensation alimentaire.

Chacune de ces dimensions fera l'objet de protocoles spécifiques, détaillés dans les sections suivantes.

## 2. MATERIELS ET METHODES

### 2.1 Obtention des juvéniles monosexes mâles.

Le tilapia présente un dimorphisme sexuel de croissance en faveur des mâles (jusqu'à 50% de croissance en plus que les femelles). Afin d'optimiser la croissance et d'éviter des problèmes d'hétérogénéité de croissance, nous travaillons avec une population monosexue mâle, obtenue par inversion hormonale du sexe phénotypique.

Des juvéniles de tilapia du Nil, ont été obtenus par reproduction artificielles (les 13 et 18 février 2025) de géniteurs de la souche UGERAA (Chitralada-Rwanda), génération 2023. Les reproductions artificielles sont réalisées par stripping des femelles et des mâles, suivi d'une fécondation artificielle. Les œufs sont placés dans des bouteilles de Zoug de 1,5l, dans un circuit recirculé à 27°C jusqu'à l'éclosion (10 jours post-fécondation). Une fois atteinte, les 909 alevins sont transférés dans deux aquariums de 50 litres maintenus à 27°C. Ils sont nourris *ad libitum*, pendant 28 jours avec un aliment hormoné (à la 17 $\alpha$ -méthyltestostérone) afin de les masculiniser.

L'aliment hormoné est préparé en diluant l'hormone à raison de 60mg/kg d'aliment dans 300ml d'éthanol/kg d'aliment, puis mélangé à l'aliment (granulométrie de 0,2 à 0,5mm, produit par Alltech Coppens GmbH). L'aliment est ensuite laissé sous hotte pendant 24h afin de permettre l'évaporation complète de l'éthanol.

À l'issue de la période de traitement hormonal (28 jours), les alevins sont transférés (le 1<sup>er</sup> avril 2025) dans deux aquariums de 250 litres maintenus à 26°C, où ils sont nourris avec un aliment non hormoné. Ce régime a été maintenu jusqu'à la mise en charge dans les bacs expérimentaux de 130 litres en système biofloc, le 24 avril 2025.

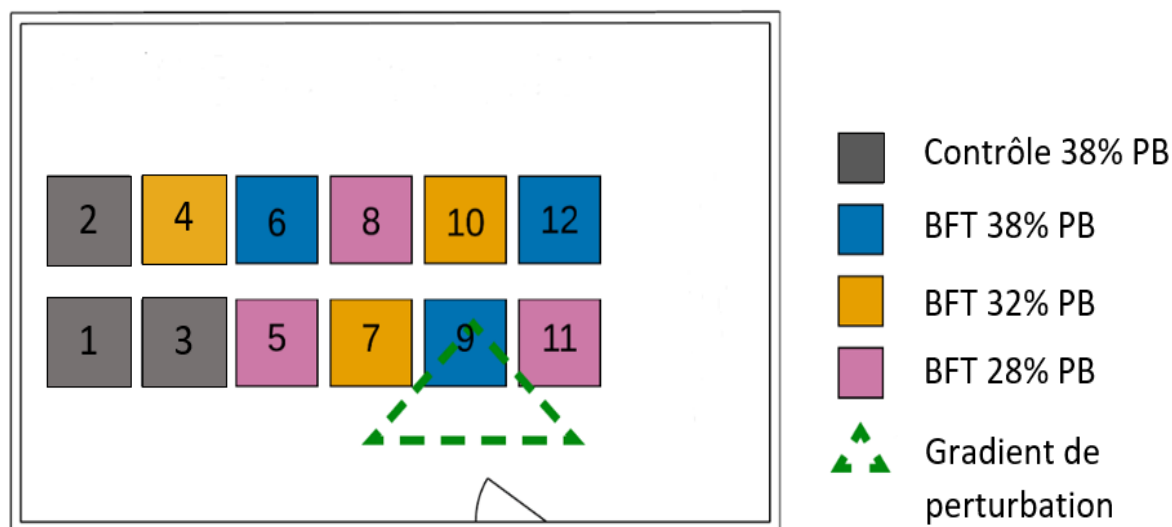
### 2.2 Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental est composé de douze bacs en polyester de 130 litres, de forme sub-carrée, disposés en deux rangées de six unités. Trois de ces bacs fonctionnent en circuit ouvert (contrôle), alimentés par l'eau de puits (15°C) stockée dans un bac de charge et chauffée à 25°C. Un système en circuit ouvert l'eau qui passe dans les bassins est rejetée dans le milieu naturel sans traitement. Le débit d'eau y est très important afin de maintenir une qualité physico-chimique suffisante. Par opposition, les neuf autres bacs sont configurés en

circuit recirculé de type biofloc, initialement ensemencés avec une solution mère de flocs maintenue au sein de l'UGeRAA. Afin d'augmenter la surface spécifique disponible pour le développement des communautés bactériennes, des bio-balles ont été ajoutées dans les bacs biofloc.

La salle est chauffée à une température de 26°C à l'aide d'un radiateur d'appoint. L'éclairage est automatisé pour une photopériode de 12h de lumière (de 8h à 20h) et 12h d'obscurité assuré par des LED de 27W suspendues à 1 mètre au-dessus des bacs. L'oxygénation est assurée dans chaque bac par deux diffuseurs d'air en pierre poreuse disposés dans le fond des bacs pour maintenir des valeurs supérieures à 5mg/l d'oxygène dissous. Le volume d'eau dans les bacs de biofloc est réajusté chaque jour pour compenser l'évaporation, le renouvellement de 2% du volume total (utile pour évacuer les nitrates accumulés) et l'eau perdue lors de la décantation de 10 litres d'eau (réalisé pour diminuer les volumes de flocs). Les trois bacs en circuit ouvert sont alimentés en eau avec un débit de 0,04m<sup>3</sup>/h, c'est-à-dire un renouvellement de 30% du bac toutes les heures. L'excès d'eau est évacué par une crépine centrale, isolée par un grillage évitant la fuite des poissons.

Chaque bac a été mis en charge le 24 avril par 30 juvéniles d'un poids moyen initial de 6g, soit une biomasse totale d'environ 180g par bac pour une densité de population équivalente à 1,8kg/m<sup>3</sup>. Par la suite, le 12 juin, six poissons par bac, d'un poids de 20g, ont été sélectionnés pour être marqués individuellement à l'aide d'un transpondeur de type pit-tag insérés dans la cavité intra-péritonéale et suivis tout au long de l'expérience. D'une part pour avoir un suivi rapproché et personnalisé de leur croissance, d'autre part pour des analyses isotopiques futures appliquées aux prélèvements sanguins. Ces prélèvements seront réalisés toutes les quatre semaines afin d'éviter des niveaux de stress affectant les performances de croissances ainsi que pour laisser le temps aux poissons de régénérer leur sang. Le design expérimental proposé a été réalisé aléatoirement (figure 5). Un gradient de perturbation a dû être représenté au niveau de la porte d'entrée dans la salle, susceptible d'influencer la température des bacs ou encore être un facteur de stress acoustique pour les poissons.



**Figure 5 :** Plan de l'installation expérimentale (non à l'échelle). BFT : biofloc, PB : protéines brutes.

L'étude vise à évaluer différents niveaux d'apports protéiques dans l'aliment formulé des tilapias. Trois formulations expérimentales sont utilisées : un aliment contenant 38% de protéines brutes (38PB), un deuxième contenant 32% de protéines brutes (32PB) et le troisième contenant 28% de protéines brutes (28PB). La fabrication a été assurée par Éric De Muylder de chez CreveTec BV et leur composition est reprise en annexe 1.

Les bacs 1, 2 et 3 en circuit ouvert (contrôle) et 6, 9 et 12 en traitement biofloc reçoivent l'aliment 38PB. Les bacs 4, 7 et 10 en biofloc reçoivent le 32PB et les bacs 5, 8 et 11 en bioflocs le 28PB. Tous les lots sont nourris à 3 à 4% de la biomasse totale du bassin. Cette ration est ajustée toutes les deux semaines après contrôle de la biomasse totale par bac (Azim & Little, 2008). Par ailleurs, la ration (en g) est augmentée quotidiennement de 2,5-5% selon les courbes de croissance de tilapia du Nil, afin de suivre la croissance et ainsi éviter un réajustement brusque après la pêche contrôle.

Par ailleurs, les systèmes bioflocs ont reçu un apport complémentaire en mélasse de betterave (souvent choisie pour des raisons économiques), utilisée comme source de carbone pour stimuler le développement des bactéries. En phase d'ensemencement et de stabilisation du floc, la quantité de mélasse ajoutée correspond à 30% de la ration alimentaire donnée jusqu'à atteindre un floc consistant et un volume supérieur à 20ml/l. Une fois atteint, la quantité de

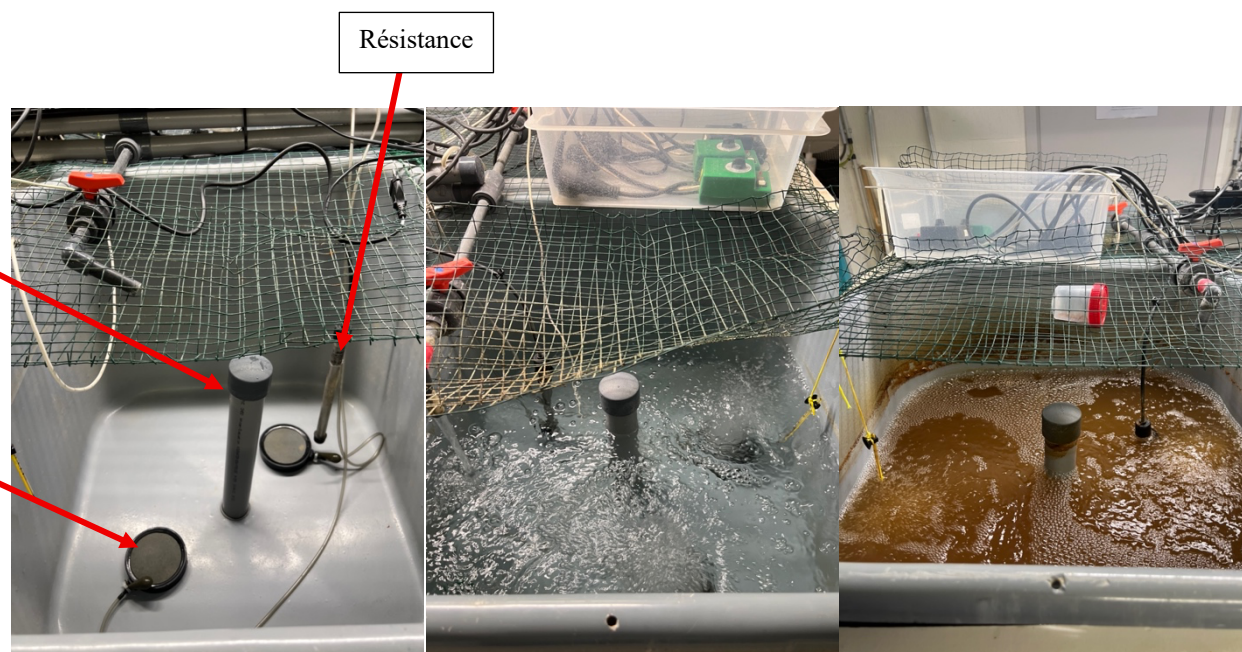
mélasse apportée est réajustée pour obtenir un rapport C:N de 6:1 dans les bacs selon Emerenciano (2017).

### **2.3 Stabilisation du système expérimental**

La phase de stabilisation a démarré le 24 avril et a duré au total deux mois. Cela a permis de réduire la fréquence des interventions techniques liées à l'entretien du floc, telles que les opérations de décantation, tout en limitant les variations brusques des paramètres physico-chimiques dans les systèmes bioflocs. Cette phase est précédée d'une phase de démarrage pendant laquelle les bacs en traitement biofloc ont été mis en charge de 5 tilapias de biomasse environ égale à 130g par bac (issus d'une reproduction antérieure), puisensemencés des flocs le 13 mars 2025 à l'aide de la solution mère. Cette étape préparatoire visait à minimiser les fluctuations des paramètres physico-chimiques durant la phase expérimentale, et les poissons ajoutés servaient à démarrer les processus naturels du système via leur alimentation et leurs déjections. Elle est également importante pour atteindre les valeurs cibles et stables de volume de flocs (25-30ml/l) et des composés azotés (<1mg/l).

Pour ce faire, 120 litres d'eau claire provenant du puits ont été ajoutés dans les 9 bacs expérimentaux. Ensuite, 10 litres de la solution mère ainsi que 200ml de concentré de flocs ont été ajoutés. Pour stimuler le développement des bactéries, 5ml de mélasse ont été ajoutés à l'aide d'une seringue graduée.

Afin de continuer àensemencer le système dans le but de stimuler le développement du biofloc, du concentré de solution mère de floc est ajouté au fur et à mesure de la phase de stabilisation (300 et 600ml respectivement le 19 et 20 mars). Jusqu'à obtenir le biofloc attendu, c'est-à-dire une solution dont les flocs sédimentent correctement, de manière compacte et dont le volume de floc (déterminé à l'aide de cônes d'Imhoff) atteint des valeurs moyennes de 25ml/l. Par la suite, nous avons ajouté des bactéries nitrifiantes (400ml de bactéries par gramme d'azote), dont le volume a été calculée sur base de 1mg d'azote par litre de solution par bac. Sachant que chaque bac contient 130l de biofloc, théoriquement il y aurait 0,13g d'azote en solution, il faut donc  $0,13 \times 400\text{ml} = 52\text{ml}$  de bactéries nitrifiantes dans chacun des neuf bacs.

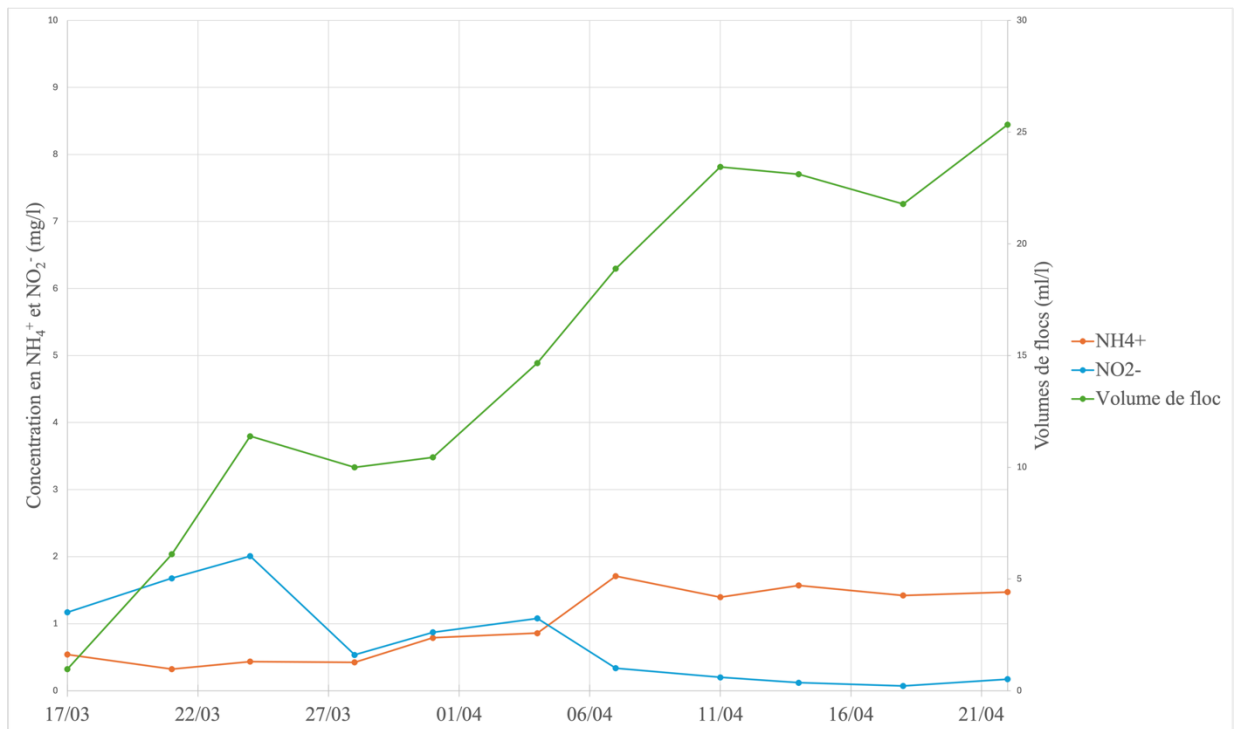


**Figure 6 :** Étapes d'avancement (de gauche à droite) de la formation du biofloc au lancement de la phase de stabilisation. A : bassin vide présentant les différentes composantes, B : remplissage de l'eau de puits, C : bassin biofloc.

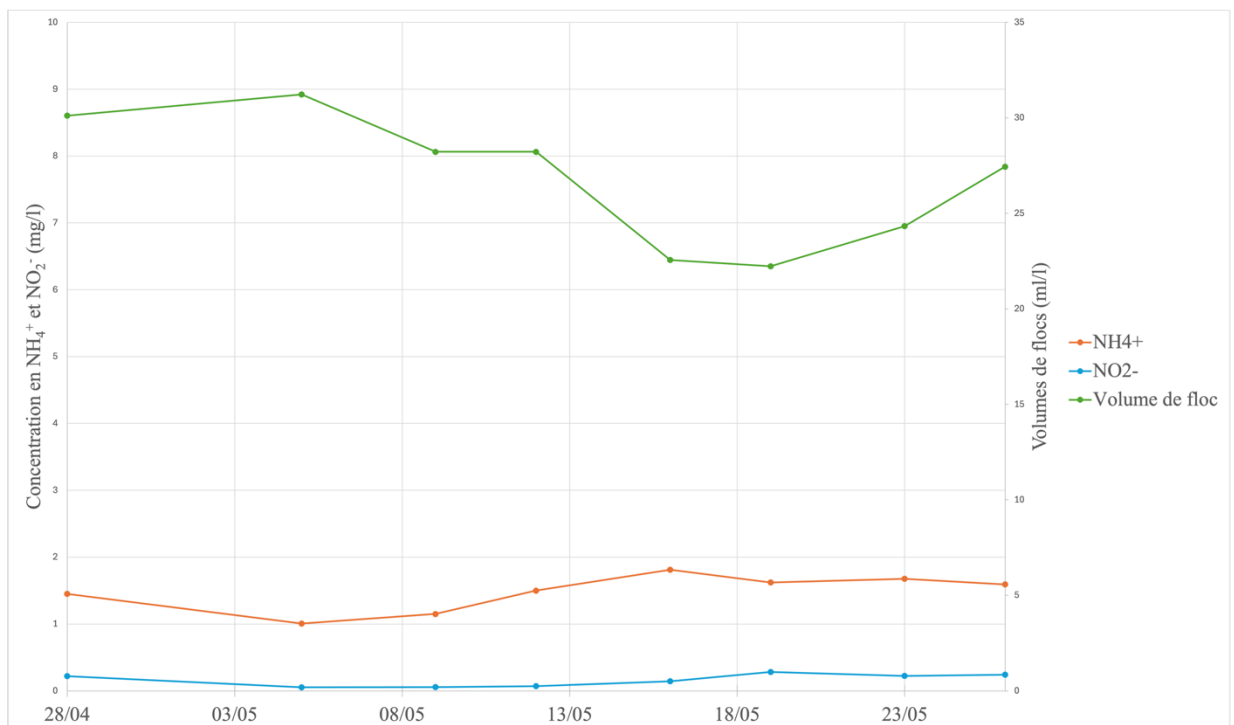
Ces bactéries dont l'ajout est indispensable pour accélérer la mise en route du cycle de l'azote serviront à réaliser les processus les plus importants, à savoir la nitrification des composés azotés ( $\text{NH}_4^+$  et  $\text{NO}_2^-$ ) vers les nitrates. De plus, l'ajout manuel est utile car ces bactéries sont lentes à se développer, elles sont sensibles aux variations des paramètres physico-chimiques et entrent vite en compétition avec les bactéries hétérotrophes qui dominent au début, car elles se développent bien plus vite dans le système.

Toutefois, les bacs 8 et 9 ayant des valeurs élevées en nitrites (3,18mg/l et 2,76mg/l respectivement), un volume supplémentaire de bactéries nitrifiantes a été ajouté afin d'accélérer le processus de nitrification.

À l'issue de cette phase, les cinq poissons ont été retirés des systèmes puis euthanasiés et remplacés par les trente poissons prévus pour la phase expérimentale. La phase expérimentale ne pourra démarrer que lorsque leur aliment sera progressivement passé au régime expérimental. Cette transition a été effectuée par paliers de 20% par jour : 20%, 40%, 60%, 80% et finalement 100%, sur une durée de 5 jours, du 21 au 26 mai 2025. Elle est suivie par la première pêche contrôle le 27 mai, permettant de fixer la biomasse totale initiale de chaque bac au ( $T_0$ ), début de la phase expérimentale qui durera jusqu'au 08 juillet (42 jours au total).



**Figure 7 :** Graphique de l'évolution des concentrations moyennes (mg/l) en  $\text{NH}_4^+$  (en orange) et  $\text{NO}_2^-$  (en bleu) et des volumes de flocs moyens (ml/l) (en vert) dans les bacs en système biofloc pendant la première phase de stabilisation.



**Figure 8 :** Graphique de l'évolution des concentration moyennes (mg/l) en  $\text{NH}_4^+$  (en orange) et  $\text{NO}_2^-$  (en bleu) et des volumes de flocs moyens (ml/l) (en vert) dans les bacs en système biofloc pendant la deuxième phase de stabilisation.

## **2.4 Gestion de la qualité de l'eau**

La température, la concentration en oxygène dissous, le pH et les volumes de floccs sont mesurés tous les jours. La conductivité est mesurée une fois par semaine (le mardi), les concentrations en composés azotés et l'alcalinité deux fois par semaine (les lundi et vendredi). Les valeurs cibles en circuit ouvert et en biofloc de ces paramètres sont reprises respectivement en annexe 2 et 3. Les protocoles d'analyses en laboratoire seront reprises en annexe 4 à 7.

### **2.4.1 Température**

La température des bacs de biofloc est maintenue autour de 25°C à l'aide de résistances individuelles (Pro Heater 200W, SuperFish®). Les bacs témoins en circuit ouvert sont chauffés par la résistance présente dans le bac de charge, toutefois une résistance d'appoint (Pro Heater 100W, SuperFish®) permet de maintenir une température avoisinant les 25°C comme pour les bacs en biofloc (Yu et *al.*, 2023). La température de l'eau est mesurée quotidiennement à l'aide du pH-mètre (pHep®4, HANNA instruments®).

### **2.4.2 Oxygène dissous**

L'aération des bacs est assurée par des diffuseurs d'air en pierre poreuse de 10cm de diamètre (Hi-Oxy Disk SuperFish®), permettant à la fois une bonne oxygénation, l'homogénéisation de la colonne d'eau et la suspension des floccs, tout en limitant la formation de zones anaérobies (Hargreaves, 2013; Yu et *al.*, 2023). La concentration en oxygène dissous dans l'eau est mesurée par un oxymètre (Polaris C, OxyGuard®) et maintenue à une valeur optimale de 7mg/l.

### **2.4.3 pH et Alcalinité**

L'alcalinité doit être maintenue au-dessus de 100 mg de CaCO<sub>3</sub>/l, elle est mesurée à l'aide d'un test rapide de titrage via indicateur coloré, le rouge de Bromocresol vert-méthyle (Permachem® Reagents, HACH®), auquel nous ajoutons de l'acide sulfurique à l'aide d'un titreur digital (HACH®). Une seconde méthode utilisée pour mesurer l'équilibre acide-base du milieu peut se faire à l'aide d'un pH-mètre (pHep®4, HANNA instruments®). Cette méthode permet de remarquer plus rapidement si l'alcalinité du milieu diminue et donc de réagir plus

rapidement puisque ces mesures sont prises tous les jours. Dans le cas où l'alcalinité serait en deçà de 50 mg de  $\text{CaCO}_3/\text{l}$  ou que le pH atteindrait des valeurs inférieures à 7,5, alors nous devons ajouter du bicarbonate de soude ( $\text{NaHCO}_3$ ) pour tamponner le milieu dont la quantité à ajouter est calculée à l'aide de la formule : 250g de bicarbonate de soude par kg d'aliment donné. Ainsi pour une ration de 10g, il faudra ajouter 2,5g de bicarbonate de soude.

#### **2.4.4 Conductivité**

Elle permet de garder une vision d'ensemble des ions dissous dans le milieu, dont il est d'ailleurs important de contrôler pour qu'ils ne dépassent pas 2000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Cette valeur est mesurée trois fois par semaine par un conductimètre (HQ30d, flexi, HACH®).

#### **2.4.5 Composés azotés**

Les concentrations en ammonium ( $\text{NH}_4^+$ ), nitrites ( $\text{NO}_2^-$ ) et nitrates ( $\text{NO}_3^-$ ) sont déterminées par spectrophotométrie (DR/2010, HACH®), via différentes méthodes d'analyses de surnageant récupéré après décantation d'un litre de floc (voir point suivant), dont les protocoles spécifiques sont développés en annexe 4, 5 et 6 respectivement.

L'ammonium doit être maintenu à des concentrations inférieures à 2 mg/l que nous mesurons trois fois par semaine à l'aide de la méthode Nessler.

La concentration en nitrites doit rester inférieure à 1 mg/l. Il est important de suivre l'évolution de sa concentration en testant l'eau du biofloc trois fois par semaine selon la méthode de diazotation.

Les nitrates sont mesurés trois fois par semaine via la méthode de réduction au cadmium dont (NitraVer® 5, Permachem® Reagents, HACH®). La concentration doit rester inférieure à 500 mg/l et pour cela nous retirons 2l d'eau du bac tous les jours que nous compensons avec de l'eau claire provenant du même bac de charge que celui des bacs en circuit ouvert.

#### **2.4.6 Volumes de floes**

La concentration en solides décantables est mesurée tous les jours pour tous les bacs en biofloc à l'aide de cônes d'Imhoff d'un volume d'un litre. Celui-ci est prélevé directement en solution puis est laissé reposé durant 30min, le temps de la sédimentation des agrégats de floes.

La concentration en solides décantables ne doit pas excéder 30 ml/l au risque de causer des problèmes physiologiques et physiques aux poissons tel que le colmatage des branchies (Hargreaves, 2013). En cas de dépassement, 10l de biofloc sont laissés à décanter dans un seau pendant une heure. Le surnageant obtenu est réintégré au bac, tandis que les sédiments sont éliminés. Le niveau d'eau du bassin est ensuite réajusté avec l'eau claire du bac de charge.

#### **2.4.7 Matières en suspension (MES)**

Cela correspond à la masse sèche de solides en suspension dans un litre d'eau d'élevage. Elles sont liées directement au volume de floes et sont gérées de la même manière. Elles sont mesurées une fois toutes les deux semaines lors des pêches contrôles et doivent idéalement être comprises entre 200 et 500 mg/l. Elles sont mesurées grâce à un filtre en fibre de verre de 47mm placé dans un entonnoir magnétique (Whatman 934, AH - 1,5µm de porosité) (Hargreaves, 2013; Manduca et al., 2021) (annexe 7).

#### **2.4.8 Rapport C:N**

L'obtention de celui-ci se base sur les concentrations en azote ammoniacal total (TAN) qui désigne la somme de l'ammoniac non ionisé et de l'ion ammonium dans les bassins. Par exemple pour une valeur de TAN de 2mg/l dans nos bassins de 130 litres nous avons  $0.002 \times 130 = 0.26$ g de TAN. Pour un rapport C:N de 6:1, il faut  $0.26 \times 6 = 1.56$ g de C. La mélasse contenant 45% de C alors il y a 450g de C dans 1kg de mélasse, pour ajouter 1.56g de C dans le système il faut donc 3.5g de mélasse (Emerenciano et al., 2017).

### **2.5 Évaluation des paramètres zootechniques**

Lors de ce travail, plusieurs paramètres zootechniques ont été évalués durant la phase expérimentale afin de mesurer les performances de croissances des tilapias dont le taux de survie (TS), le gain de poids moyen (GPM), le taux de croissance spécifique (SGR), le taux de conversion alimentaire (FCR), le coefficient de condition de Fulton (K) et la ration totale distribuée tout au long de l'expérience.

Ces données sont obtenues à partir des pêches contrôles réalisées toutes les deux semaines aux dates suivantes : 27 mai, 10 juin, 24 juin et 08 juillet 2025. Les poissons sont pêchés et comptés bac par bac puis anesthésiés dans une bassine contenant 20l d'eau ainsi

qu'un produit anesthésiant (de la benzocaïne dosée à 0,4ml par litre d'eau). Les tilapias sont ensuite scannés pour retrouver les individus pit-tagués puis pesés et mesurés (longueur totale). Ils sont ensuite déposés dans une bassine de réveil contenant 20l d'eau en attendant de les remettre dans leur bac respectif afin de détecter d'éventuels comportements inquiétants et de s'assurer de leur bien-être.

Chaque pêche contrôle permet une estimation précise des biomasses, essentielles pour le calcul des paramètres de performance. L'alimentation est assurée par une distribution fractionnée de la ration quotidienne pesée et augmentée chaque jour en trois apports répartis au cours de la journée, afin d'optimiser l'ingestion et la conversion alimentaire. Les formules de calcul des paramètres zootechniques sont reprises en annexe 8.

## **2.6 Analyses statistiques**

Le traitement initial des données et le calcul de certains paramètres seront réalisés à l'aide du logiciel Microsoft Excel. Les jeux de données seront ensuite soumis à des tests préliminaires de normalité (test de Shapiro-Wilk) et d'homoscédasticité (test de Levene ou de Bartlett) afin de déterminer l'adéquation aux conditions requises pour les analyses paramétriques. En fonction des résultats obtenus, une analyse de la variance (ANOVA) sera effectuée pour évaluer les effets des différents traitements par rapport au témoin, ou, en cas de non-conformité aux hypothèses, un test non paramétrique de Kruskal-Wallis sera privilégié. Toutes les analyses statistiques seront conduites à l'aide du logiciel R Studio et les programmes sont utilisés dans le langage R. En présence de différences significatives, des tests post-hoc appropriés (Tukey HSD pour les données paramétriques, Dunn pour les non paramétriques) seront appliqués pour réaliser des comparaisons multiples entre les modalités expérimentales. Dans certains cas, des tests de corrélation de Spearman seront réalisés afin de mettre en évidence d'éventuels liens entre deux paramètres.

### 3. Résultats

Les résultats de cette étude ont permis d'évaluer l'impact de différents niveaux d'apports en protéines brutes dans l'aliment sur les performances de croissance des tilapias et le fonctionnement physico-chimique du système biofloc. Les conditions expérimentales sont nommées suivant :

- T0 : régime témoin en circuit ouvert (CO) à 38% de protéines brutes,
- T1 : régime expérimental en biofloc (BFT) à 38% de protéines brutes,
- T2 : régime expérimental en biofloc (BFT) à 32% de protéines brutes,
- T3 : régime expérimental en biofloc (BFT) à 28% de protéines brutes.

#### 3.1. Gestion de la qualité de l'eau

##### 3.1.1. Température

Les températures ont varié entre  $24,9 \pm 0,3^{\circ}\text{C}$  (T0) et  $25,4 \pm 0,8^{\circ}\text{C}$  (T2) avec une moyenne globale de  $25,2^{\circ}\text{C}$  pendant toute la phase expérimentale. Le test de Shapiro-Wilk ( $p = 0,0047$ ) indique que les données ne suivent pas une distribution normale et le test de Levene ( $p < 0,001$ ) montre une hétérogénéité des variances dans les groupes (Tableau 1).

Après un test non paramétrique, les résultats ont montré une différence significative ( $p < 0,05$ ). Le test a montré une différence significative entre le témoin T0 et T2. Bien que statistiquement différentes entre le lot contrôle ( $24,9 \pm 0,3^{\circ}\text{C}$ ) et le lot T2 ( $25,4 \pm 0,8^{\circ}\text{C}$ ) (Kruskal-Wallis et post-hoc de Dunn), les températures ont toujours été dans les optimaux pour cette espèce (Tableau 1).

##### 3.1.2. Oxygène dissous

Les résultats ont démontré une faible différence des concentrations en oxygène dissous entre les conditions expérimentales (de  $7,3 \pm 0,4$  mg/l (T0) à  $7,4 \pm 0,3$  mg/l (T2)) et les écarts-types obtenus sont faibles ( $< 0,4$  mg/l) pour chacune des conditions (Tableau 1). Ce qui indique une bonne stabilité de l'oxygénation dans tous les bacs.

Les données n'étant pas distribuées normalement selon le test de Shapiro-Wilk ( $p = 0,0013$ ), et le test de Levene à tendance à montrer une hétérogénéité des variances malgré un  $p$

= 0,077, un test non paramétrique (Kruskal-Wallis) a été utilisé. Ce test n'a montré aucune différence significative ( $p = 0,693$ ) entre les conditions expérimentales, indiquant que les valeurs sont toujours restées dans l'optimum pour l'espèce (Tableau 1).

### **3.1.3. pH et alcalinité**

Les valeurs moyennes de pH (7,9) ont présenté des différences significatives ( $p < 0,001$ ) entre les conditions expérimentales (Kruskal-Wallis). Le test post-hoc de Dunn a montré que le pH dans le lot témoin T0 ( $8,02 \pm 0,1$ ) et celui du traitement T3 ( $7,89 \pm 0,1$ ) était significativement différent des autres (Tableau 1).

L'alcalinité moyenne du lot contrôle (T0),  $220,5 \pm 17,7$  mg de  $\text{CaCO}_3/\text{l}$ , est significativement différente de T1 ( $90,1 \pm 19,1$  mg de  $\text{CaCO}_3/\text{l}$ ), T2 ( $97,4 \pm 26,1$  mg de  $\text{CaCO}_3/\text{l}$ ) et T3 ( $118,4 \pm 34,01$  mg de  $\text{CaCO}_3/\text{l}$ ). Aucune différence significative n'est montrée entre les 3 conditions expérimentales en biofloc. Celles à 38% de protéines brutes dans l'aliment possédaient des écarts-types plus faibles (Tableau 1), ce qui peut indiquer un pouvoir tampon plus stable dans T0 et T1.

### **3.1.4. Conductivité**

La conductivité oscille entre  $1727,6 \pm 206,6$   $\mu\text{S}/\text{cm}$  (T3) et  $1905,6 \pm 79,3$   $\mu\text{S}/\text{cm}$  (T1) dans les systèmes en biofloc, alors que dans le lot contrôle elle est en moyenne ( $752,9 \pm 6,05$   $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) significativement plus faible que celle des trois lots BFT ( $1833,2 \pm 135,8$   $\mu\text{S}/\text{cm}$ ). Le test de Kruskal-Wallis a indiqué une différence significative entre les conditions expérimentales pour les valeurs de conductivité de l'eau ( $p = 0,004$ ). Le témoin (T0), est significativement différent de T1, T2 ( $1866,4 \pm 121,6$   $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) et T3 (Tableau 1).

Le tableau 1 présente les moyennes ( $\pm$ écarts-types) des paramètres physico-chimiques suivants : température, oxygène dissout, pH, alcalinité et conductivité.

**Tableau 1 :** Valeurs des principaux paramètres physico-chimiques au cours de l'élevage de tilapia du Nil en Biofloc (T1 à T3) et en CO = circuit ouvert (T0) : température, oxygène dissous, pH, alcalinité et conductivité. Moyenne  $\pm$ EC.

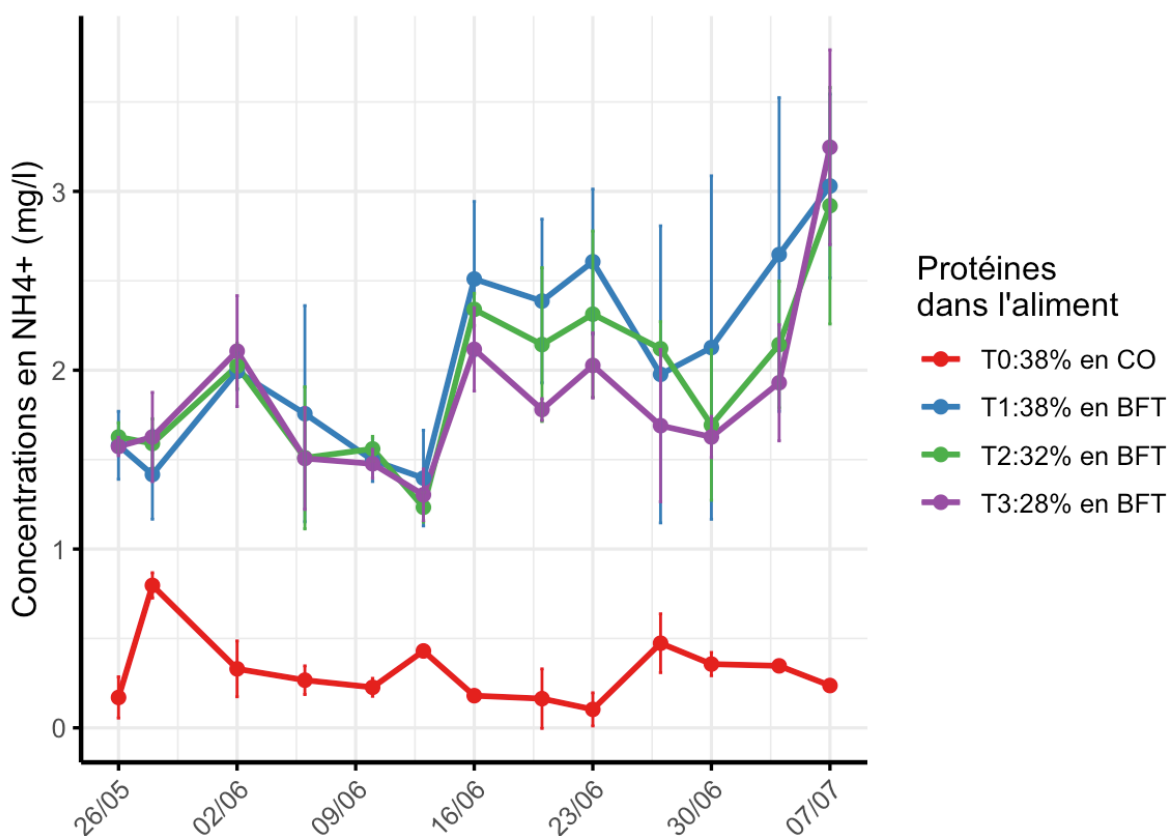
| Pourcentage de protéines | Température (°C)             | Oxygène dissous (mg/l) | pH                         | Alcalinité (mg/l de CaCO <sub>3</sub> ) | Conductivité (µS/cm)            |
|--------------------------|------------------------------|------------------------|----------------------------|-----------------------------------------|---------------------------------|
| T0 : 38% en CO           | 24,9 $\pm$ 0,3 <sup>a</sup>  | 7,3 $\pm$ 0,4          | 8,0 $\pm$ 0,1 <sup>a</sup> | 220,5 $\pm$ 17,7 <sup>a</sup>           | 752,9 $\pm$ 6,05 <sup>a</sup>   |
| T1 : 38% en BFT          | 25,3 $\pm$ 1,0 <sup>ab</sup> | 7,3 $\pm$ 0,3          | 7,7 $\pm$ 0,1 <sup>b</sup> | 90,1 $\pm$ 19,1 <sup>b</sup>            | 1905,6 $\pm$ 79,3 <sup>b</sup>  |
| T2 : 32% en BFT          | 25,4 $\pm$ 0,8 <sup>b</sup>  | 7,4 $\pm$ 0,3          | 7,8 $\pm$ 0,1 <sup>b</sup> | 97,4 $\pm$ 26,1 <sup>b</sup>            | 1866,4 $\pm$ 121,6 <sup>b</sup> |
| T3 : 28% en BFT          | 25,3 $\pm$ 1 <sup>ab</sup>   | 7,3 $\pm$ 0,3          | 7,9 $\pm$ 0,1 <sup>c</sup> | 118,4 $\pm$ 34,01 <sup>b</sup>          | 1727,6 $\pm$ 206,6 <sup>b</sup> |
| p-value                  | 0,023                        | 0,69                   | <0,001                     | <0,001                                  | <0,001                          |

**Note 1 :** p-value obtenues par test de Kruskal-Wallis (n=3). Les valeurs accompagnées de lettres en exposant sont significativement différentes selon le test post-hoc de Dunn, des lettres différentes indiquent une différence significative entre deux traitements. L'absence de lettre indique aucune différence significative.

### 3.1.5. Composés azotés

#### 3.1.5.1. Ammonium

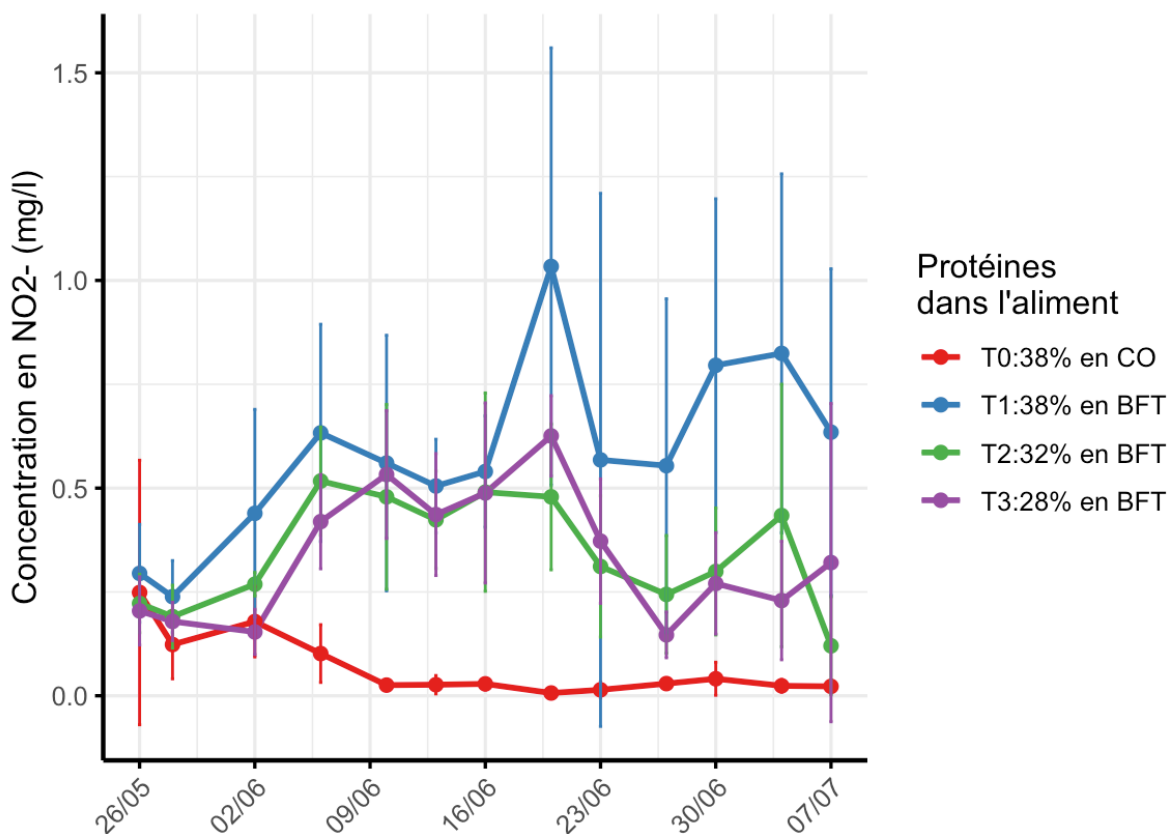
En circuit ouvert, les concentrations moyennes en ammonium (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) (0,3 $\pm$ 0,2 mg/l) étaient significativement plus faibles (Kruskal-Wallis, p < 0,001) que dans les traitements en biofloc : T1 : 2,1 $\pm$ 0,7 mg/l ; T2 : 1,9 $\pm$ 0,5 mg/l et T3 : 1,8 $\pm$ 0,5 mg/l (Tableau 2). L'évolution de ces concentrations tout au long de la phase expérimentale est illustrée dans le graphique ci-dessous (Figure 9).



**Figure 9 :** Graphique de l'évolution de la concentration moyenne  $\pm$  écarts-types en ammonium ( $\text{NH}_4^+$ ) (mg/l) dans les différents traitements durant la phase expérimentale (42 jours). CO : circuit ouvert, BFT : biofloc.

### 3.1.5.2. Nitrites

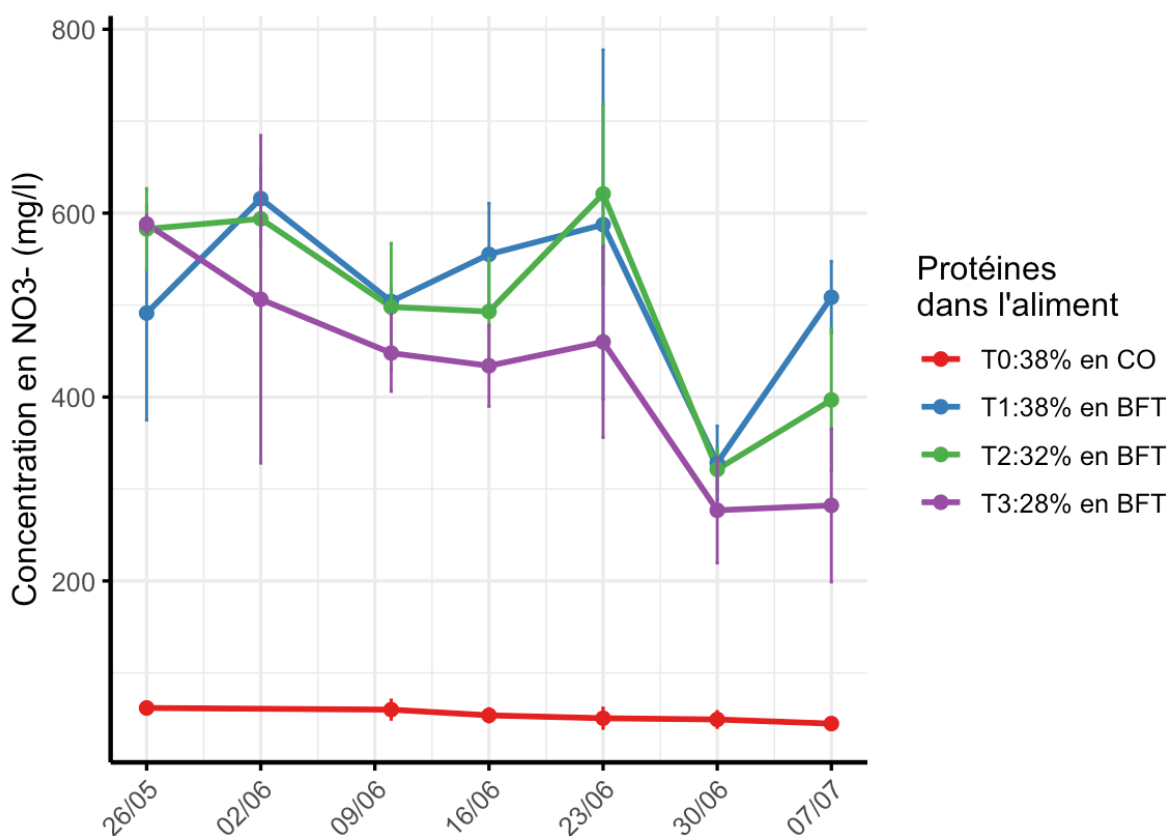
Logiquement, le taux moyen de nitrites du lot témoin (T0) en circuit ouvert, est resté significativement plus faible ( $0,07 \pm 0,1$  mg/l) que dans les lots en biofloc. Dans ces bassins, les valeurs de nitrites ont oscillé autour de  $0,3 \pm 0,2$  mg/l dans les lots T2 et T3 et ont été significativement plus élevées dans le lot T1 ( $0,6 \pm 0,4$  mg/l) (Tableau 2). La figure 10 ci-dessous présente l'évolution des concentrations en nitrites dans les différentes conditions expérimentales durant la phase expérimentale. Les concentrations sont, en majorité, restées sous le seuil de toxicité (1 mg/l) (Emerenciano et al., 2017).



**Figure 10 :** Graphique de l'évolution de la concentration moyenne  $\pm$  écarts-types en nitrites (NO<sub>2</sub><sup>-</sup>) (mg/l) dans les bassins contrôles (T0) et les bassins en Biofloc (T1 à T3) au cours de la phase expérimentale (42 jours). CO : circuit ouvert, BFT : biofloc.

### 3.1.5.3. Nitrates

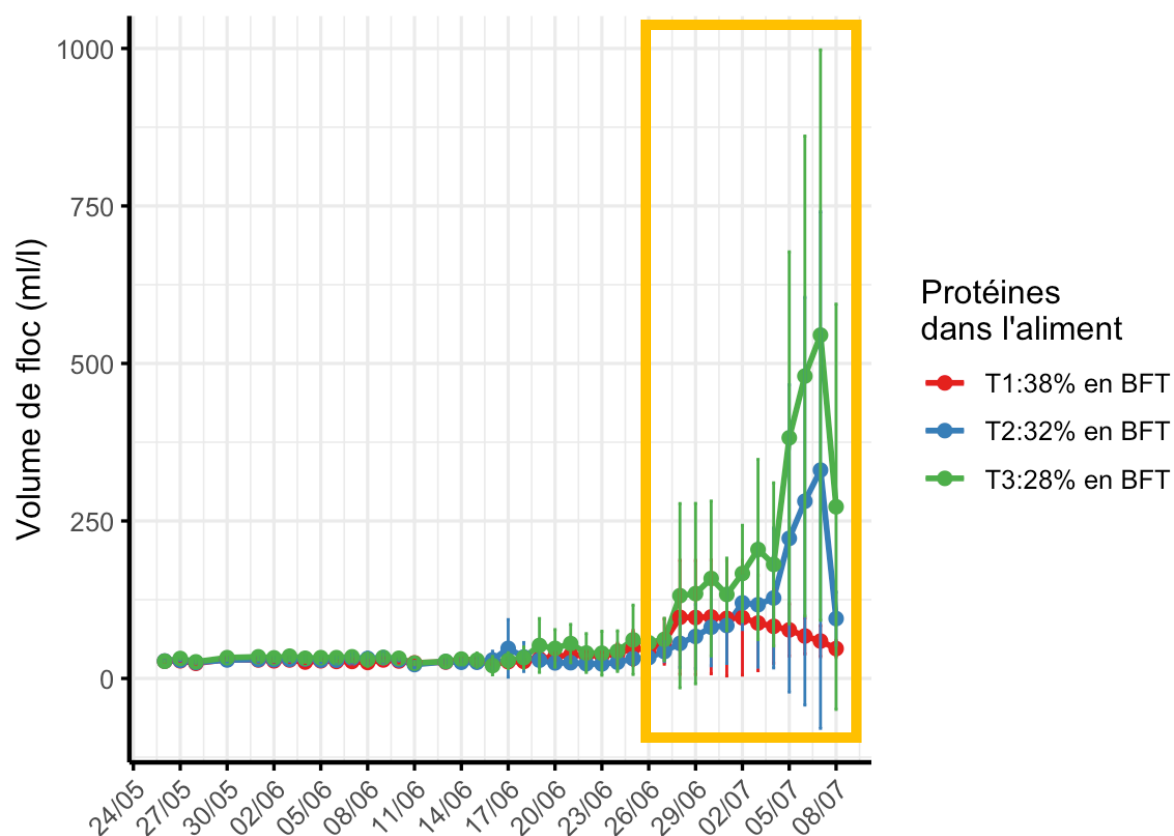
Les concentrations moyennes dans les conditions expérimentales en biofloc (T1 :  $513 \pm 116,7$  mg/l, T2 :  $501 \pm 116,8$  mg/l et T3 :  $428 \pm 131,4$  mg/l) sont largement supérieures (Kruskal-Wallis,  $p < 0,001$  et test de Dunn) à celle du contrôle T0 ( $53,4 \pm 9,3$  mg/l). Ce dernier a montré une différence significative entre T0 et T1, T2, T3 (Tableau 2). L'évolution des concentrations en nitrates tout au long de la phase expérimentale est représentée dans la figure ci-dessous (Figure 11). Dans les conditions expérimentales en biofloc, les niveaux de concentration ont majoritairement dépassés le seuil de toxicité (500 mg/l) sans toutefois atteindre des valeurs critiques pour la survie des tilapias (Emerenciano et al., 2017).



**Figure 11 :** Graphique de l'évolution de la concentration moyenne  $\pm$  écarts-types en nitrates (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) (mg/l) dans les bassins contrôles (T0) et les bassins en Biofloc (T1 à T3) au cours de la phase expérimentale (42 jours). CO : circuit ouvert, BFT : biofloc.

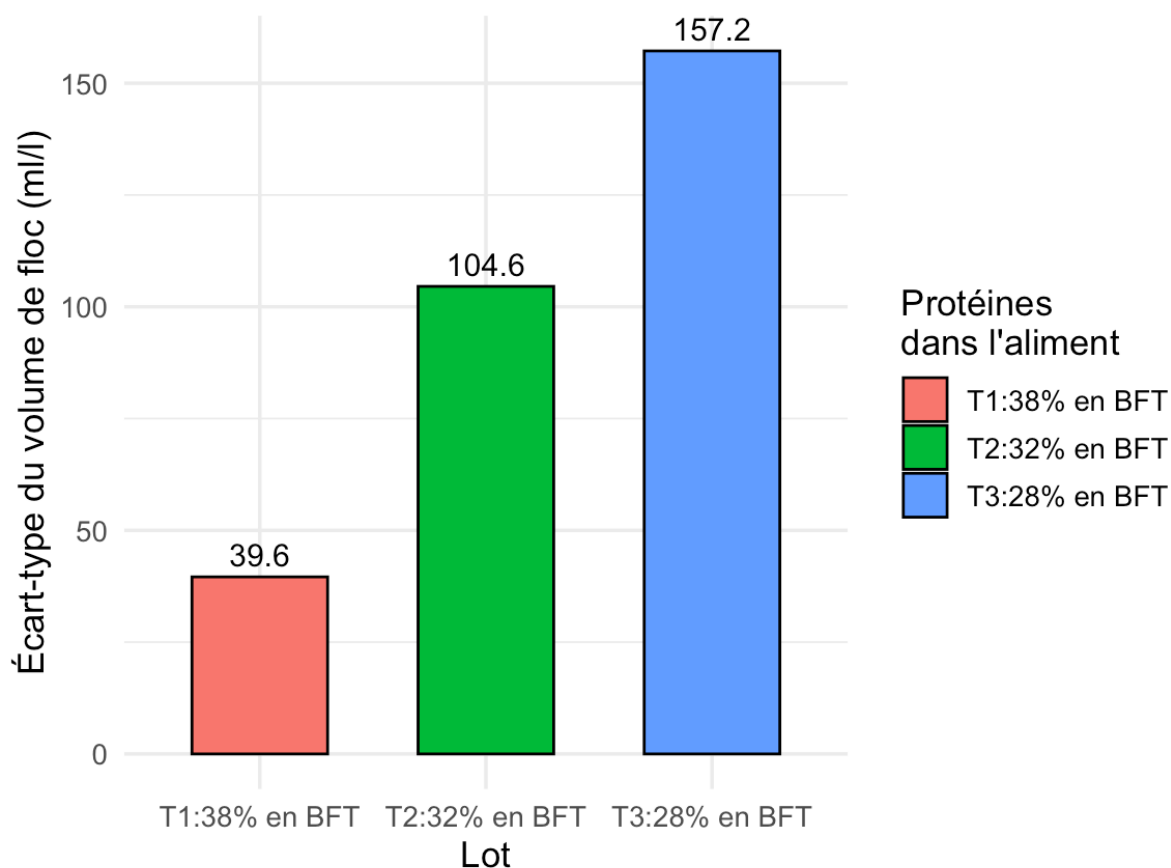
### 3.1.6. Volumes de flocs

Les volumes de floc ont varié entre  $45,0 \pm 39,6$  ml/l (T1) et  $93,4 \pm 157,2$  ml/l (T3), avec une moyenne de 65,9 ml/l. Ces volumes sont significativement différents entre condition expérimentale (Kruskal-Wallis,  $p = 0,01$ ). Le test de Dunn confirme que les volumes moyens de flocs dans T3 sont significativement plus élevés que T2 ( $59,4 \pm 104,6$  ml/l) (Tableau 2). En fin de phase expérimentale, nous observons un dysfonctionnement du biofloc avec une augmentation très importante du volume de floc (jusqu'à 900 ml/l pour T3) (encadrées en orange, Figure 12) qui pourraient s'expliquer très probablement par des déséquilibres des rapports C:N, équilibre fragile qui peut être facilement perturbé par un manque de contrôle précis de l'apport en carbone ou en azote dans un système biofloc, entraînant ainsi une détérioration des flocs solides et les empêchent de sédimenter normalement.



**Figure 12 :** Évolution des volumes de flocs (ml/l) moyens par condition expérimentale durant la phase expérimentale (42 jours), cadre orange : probable dysfonctionnement des conditions biofloc. BFT : biofloc.

Un test de Spearman a été réalisé afin de déterminer si une corrélation existait entre les volumes de floc et les conditions expérimentales appliquées (38%, 32% et 28% de protéines brutes). La p-value du test (0,33) n'indique pas de relation directe entre ces deux paramètres. La figure 13 montre une tendance négative entre volume de floc et taux de protéine sans qu'aucune relation monotone directe entre eux ne soit prouvée.

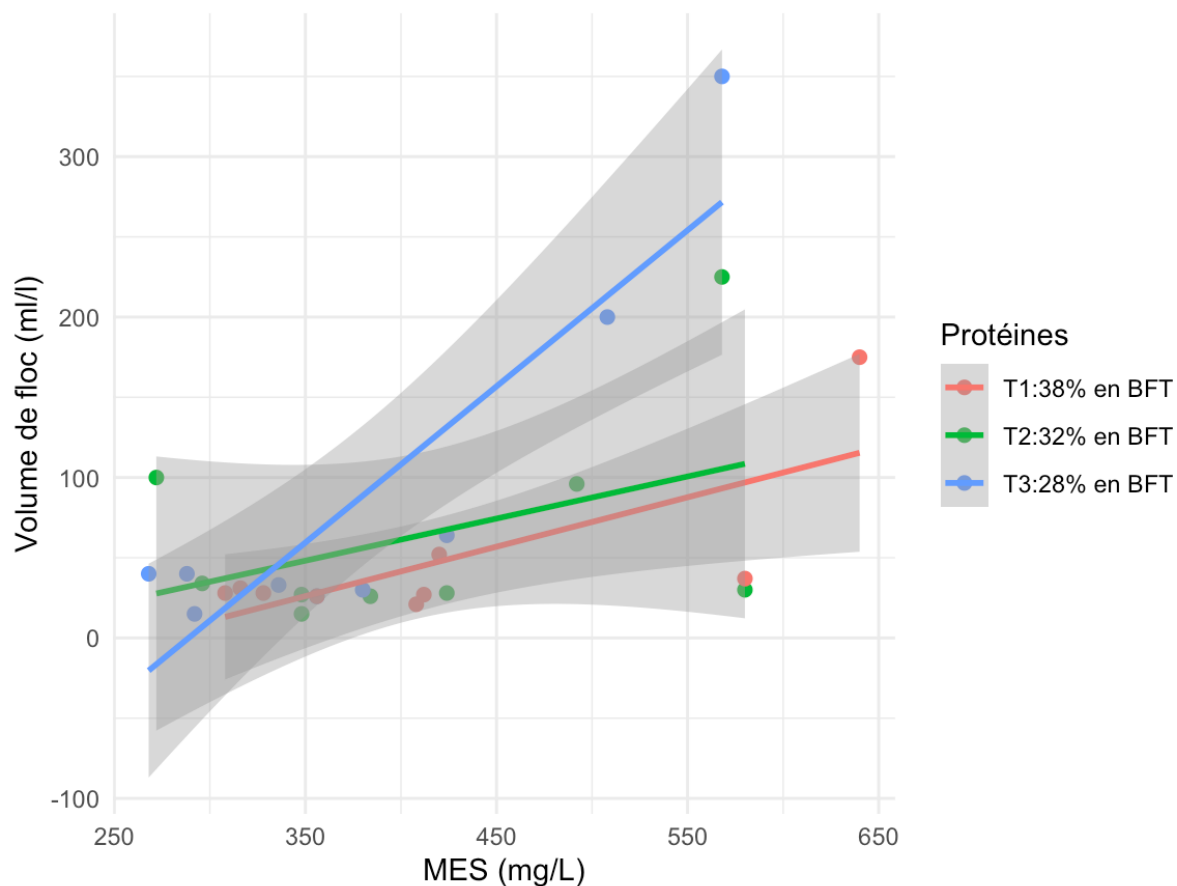


**Figure 13 :** Variabilité (écarts-types) des volumes de floes (ml/l) par condition expérimentale pendant la phase expérimentale (42 jours). Spearman,  $p=0,33$ . BFT : biofloc.

### 3.1.7. Matières en suspension (MES)

Dans les bassins en Biofloc (T1 à T3), les concentrations moyennes de matières en suspension sont : T1 :  $418,7 \pm 25,5$  mg/l, T2 :  $412,4 \pm 69,8$  mg/l et T3 :  $380 \pm 123,9$  mg/l (Tableau 2) et ne sont pas significativement différentes entre elles (Kruskal-Wallis ;  $p = 0,66$ ). Toutefois, un test de puissance a été réalisé pour évaluer la puissance statistique du test non paramétrique. Or, celle-ci est inférieure à 0,8 indiquant un risque élevé d'erreur qui peut s'expliquer par un nombre trop faible de données prises durant la phase expérimentale.

Le test de Spearman ne met pas en évidence de corrélation entre les MES et les volumes de floes (Figure 14,  $p = 0,08$ ). Ce résultat pourrait, une nouvelle fois, être limité par la petite taille de l'échantillon.



**Figure 14 :** Graphique de la corrélation entre les matières en suspension (mg/l) et les volumes de floccs (ml/l). Spearman,  $p=0,08$ . BFT : biofloc.

**Tableau 2 :** Moyennes  $\pm$  écarts-types des mesures des composés azotés et des floccs ( $V$  = volume, MES = matière en suspension), en élevage de tilapia du Nil. CO : circuit ouvert, BFT : biofloc.

| Pourcentage de protéines | $\text{NH}_4^+$ (mg/l) | $\text{NO}_2^-$ (mg/l) | $\text{NO}_3^-$ (mg/l) | MES (mg/l)        | $V_f$ (ml/l)         |
|--------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|-------------------|----------------------|
| T0 : 38% en CO           | $0,3 \pm 0,2^a$        | $0,07 \pm 0,1^a$       | $53,4 \pm 9,3^a$       | /                 | /                    |
| T1 : 38% en BFT          | $2,1 \pm 0,7^b$        | $0,6 \pm 0,4^b$        | $513,0 \pm 116,7^b$    | $418,7 \pm 117,3$ | $45,0 \pm 39,6^{ab}$ |
| T2 : 32% en BFT          | $1,9 \pm 0,5^b$        | $0,3 \pm 0,2^c$        | $501,0 \pm 116,8^b$    | $412,4 \pm 112,4$ | $59,4 \pm 104,6^a$   |
| T3 : 28% en BFT          | $1,8 \pm 0,5^b$        | $0,3 \pm 0,2^c$        | $428,0 \pm 131,4^b$    | $380 \pm 103$     | $93,4 \pm 157,2^b$   |
| p-value                  | <0,001                 | <0,001                 | <0,001                 | 0,66              | 0,01                 |

*Note 2 : p-valeur obtenues par test de Kruskal-Wallis (n=3). Les valeurs accompagnées de lettres en exposant sont significativement différentes selon le test post-hoc de Dunn, des lettres différentes indiquent une différence significative entre deux traitements. L'absence de lettre indique aucune différence significative.*

### **3.2.Évaluation des paramètres zootechniques**

#### **3.2.1. Taux de survie (TS)**

Dans les quatre conditions, les taux de survie varient entre 95 et 100% (Tableau 3) . Les comparaisons multiples de Dunn après ajustement de Holm ( $p_{adj} > 0,05$ ) ne montrent aucune différence significative du taux de survie entre les conditions expérimentales.

#### **3.2.2. Taux de croissance spécifique (SGR)**

Le SGR moyen varie de  $1,5 \pm 0,04\%/j$  (T3) à  $2,0 \pm 0,04\%/j$  (T0). Les données respectant une distribution normale et leurs variances étant homogènes, une ANOVA a mis en évidence une différence significative entre traitements ( $p < 0,05$ ) et le test post-hoc de Tukey indique que les SGR des lots T3 sont significativement inférieurs aux autres conditions (T1 :  $1,9 \pm 0,06$  et T2 :  $1,9 \pm 0,07$ ) (Tableau 3).

#### **3.2.3. Taux de conversion alimentaire (FCR)**

Les FCR moyens varient entre  $1,3 \pm 0,04$  (T0) et  $1,8 \pm 0,06$  (T3). Le FCR du lot T3 est significativement ( $p = 0,033$ ) plus élevé que toutes les autres conditions expérimentales (T1 :  $1,4 \pm 0,05$  et T2 :  $1,4 \pm 0,05$ ) (Kruskal-Wallis  $p = 0,33$ , Shapiro-Wilk  $p = 0,0074$  et Levene  $p = 0,99$ ) (Tableau 3).

#### **3.2.4. Rendement (Rdt)**

En moyenne, le rendement varie de  $32,5 \pm 1,1 \text{ kg/m}^3/\text{an}$  (T3) à  $42,6 \pm 1,6 \text{ kg/m}^3/\text{an}$  (T1). Les rendements des conditions T1 et T2 ( $40,5 \text{ kg/m}^3/\text{an}$ ) sont proches de celui du contrôle ( $42,32 \text{ kg/m}^3/\text{an}$ ), et sont 25% supérieurs à ceux obtenus dans les lots T3 (Tableau 3).

#### **3.2.5. Coefficient de condition de Fulton (K)**

Les valeurs moyennes de K varient de  $1,9 \pm 0,04$  (T1) à  $2,1 \pm 0,05$  (T0). Les conditions pour réaliser une ANOVA étant réunies (normalité et homogénéité des variances), celle-ci a

démontré l'existence d'une différence significative entre conditions expérimentales ( $p = 0,0013$ ) et le test post-hoc de Tukey a mis en évidence d'une part que le K du lot témoin (T0) était significativement supérieur à celui du lot T1 ( $p \text{ adj} < 0,001$ ) et T3 ( $p \text{ adj} = 0,0076$ ), d'autre part que celui du lot T2 est significativement supérieur à celui du lot T1 ( $p \text{ adj} = 0,042$ ) (Tableau 3).

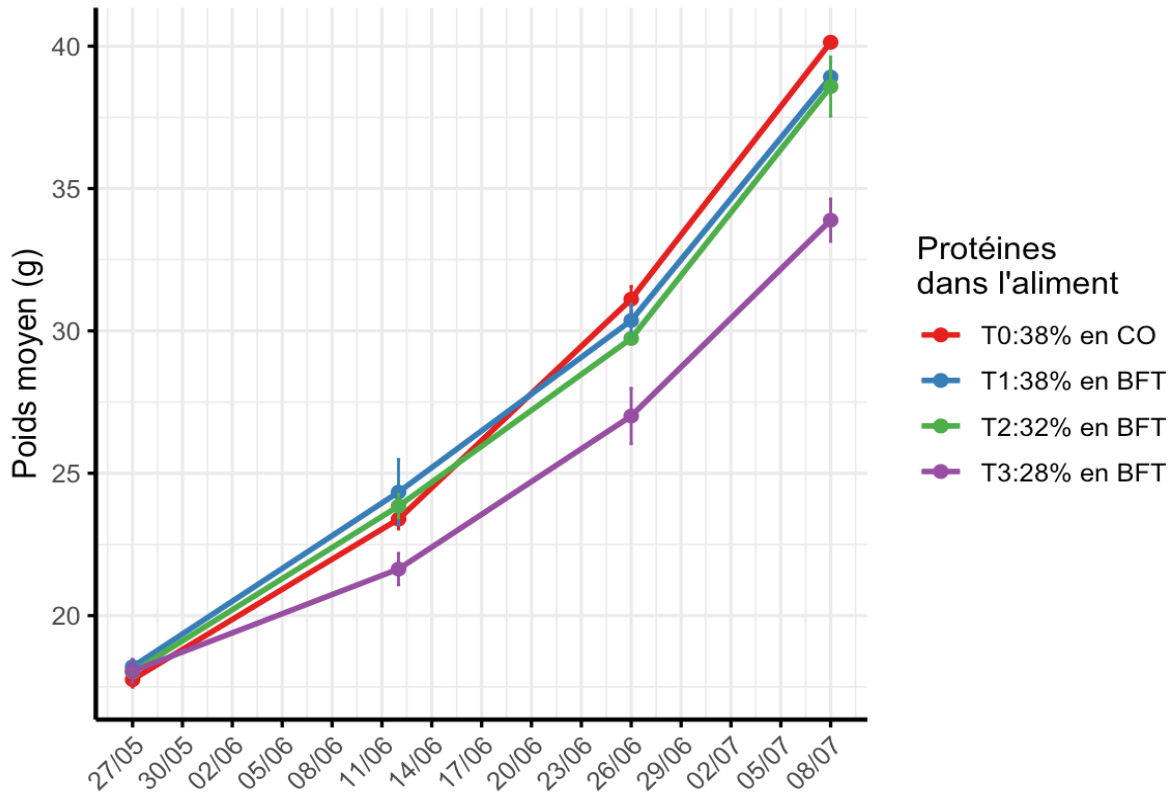
**Tableau 3 :** Moyennes  $\pm$  écarts-types des mesures des paramètres zootechniques taux de survie (%) ; taux de Croissance Spécifique (SGR, %/j) ; taux de Conversion Alimentaire (FCR) ; Rendement (Rdt, kg/m<sup>3</sup>/an) ; coefficient de condition de Fulton (K), en élevage de Tilapia du Nil.

| Pourcentage de protéines | TS (%)         | SGR (%/j)                   | FCR                          | Rdt (kg/m <sup>3</sup> /an) | K                             |
|--------------------------|----------------|-----------------------------|------------------------------|-----------------------------|-------------------------------|
| T0 : 38% en CO           | 95,6 $\pm$ 1,9 | 2,0 $\pm$ 0,04 <sup>a</sup> | 1,3 $\pm$ 0,04 <sup>a</sup>  | 42,3 $\pm$ 1,6              | 2,1 $\pm$ 0,05 <sup>a</sup>   |
| T1 : 38% en BFT          | 100 $\pm$ 0    | 1,9 $\pm$ 0,06 <sup>a</sup> | 1,4 $\pm$ 0,05 <sup>ab</sup> | 42,6 $\pm$ 1,6              | 1,9 $\pm$ 0,04 <sup>b</sup>   |
| T2 : 32% en BFT          | 97,8 $\pm$ 1,9 | 1,9 $\pm$ 0,07 <sup>a</sup> | 1,4 $\pm$ 0,05 <sup>ab</sup> | 40,5 $\pm$ 0,9              | 2,04 $\pm$ 0,02 <sup>ac</sup> |
| T3 : 28% en BFT          | 100 $\pm$ 0    | 1,5 $\pm$ 0,04 <sup>b</sup> | 1,8 $\pm$ 0,06 <sup>b</sup>  | 32,5 $\pm$ 1,1              | 2,0 $\pm$ 0,02 <sup>bc</sup>  |
| p-value                  | 0,036          | <0,001                      | 0,033                        | 0,041                       | 0,001                         |

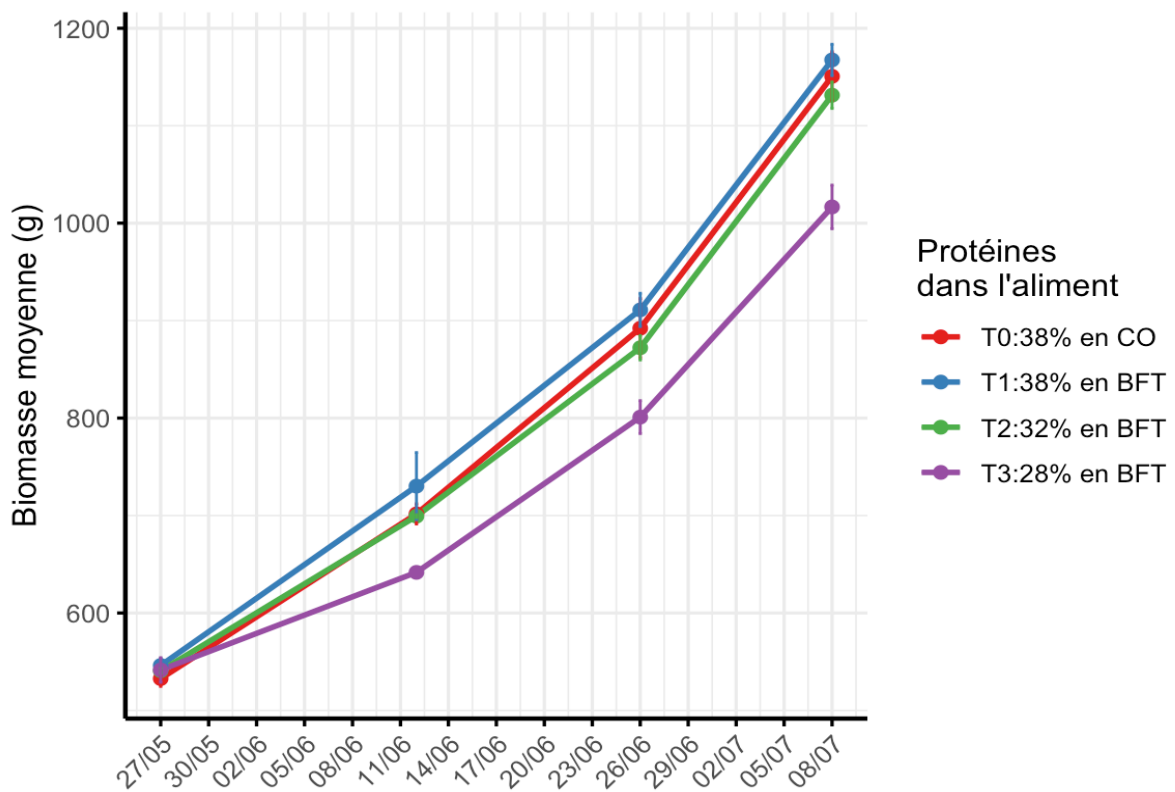
**Note 3 :** p-valeur obtenues par test de Kruskal-Wallis ou ANOVA ( $n=3$ ). Les valeurs accompagnées de lettres en exposant sont significativement différentes selon le test post-hoc de Dunn et/ou de Tukey, des lettres différentes indiquent une différence significative entre deux traitements. L'absence de lettre indique aucune différence significative.

### 3.3.Croissance

Afin de mieux visualiser les résultats (poids (g) et longueurs (mm) individuels, et biomasses (g)) obtenus lors des pêches contrôles (du 27/05, 12/06, 26/06 et 08/07), nous avons réalisé deux graphiques du suivi de l'évolution des poids moyens des poissons ainsi que des biomasses moyennes dans chacune des conditions expérimentales (Figure 15 et 16).

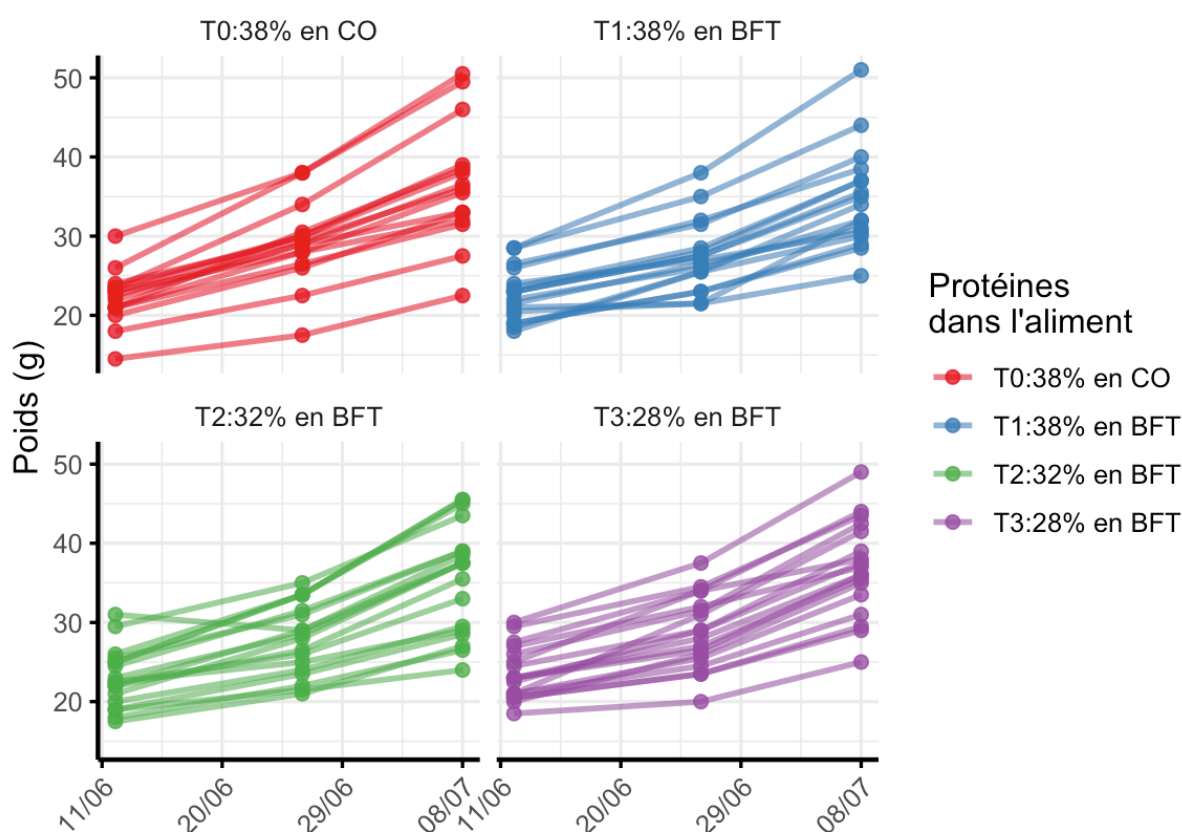


**Figure 15 :** Graphique de l'évolution des poids moyens  $\pm$  écarts-types (g) par condition expérimentale durant la phase expérimentale (42 jours). CO : circuit ouvert, BFT : biofloc.



**Figure 16 :** Graphique de l'évolution des biomasses moyennes  $\pm$  écarts-types (g) par condition expérimentale durant la phase expérimentale (42 jours). CO : circuit ouvert, BFT : biofloc.

Nous remarquons une légère différence entre les deux graphiques, en effet, dans la figure 7 les poids moyens les plus élevés sont retrouvés en T0, tandis que dans la figure 16 la biomasse moyenne semble dire que T1 possède la croissance la plus importante. Une hétérogénéité intra-traitement pourrait expliquer ce décalage entre poids moyens et biomasses moyennes. D'où l'utilisation des courbes de croissances individuelles obtenues à l'aide des mesures sur les poissons pit-tagués (Figures 17). Malgré une hétérogénéité déjà présente en début d'expérience, nous remarquons qu'elle s'accroît dans le temps. En effet, sur la figure 17, le 8 juillet, les écarts verticaux entre les poids des différents poissons illustrent bien cette augmentation de l'hétérogénéité.



**Figure 17 :** Graphiques présentant la croissance individuelle (poids en g) des poissons pit-tagués par condition expérimentale durant la phase expérimentale (42 jours). CO : circuit ouvert, BFT : biofloc.

Grâce à la figure 17, nous visualisons mieux les variations intra-traitement et remarquons qu'il y a effectivement des individus présentant des courbes de croissances qui se distinguent de la tendance générale observée. De plus, nous observons que certains poissons pèsent deux fois plus lourd que d'autres, marquant l'hétérogénéité des bacs.

## 4. Discussion

L'objectif de ce travail était d'évaluer les effets des différents niveaux d'apports protéiques dans l'alimentation du tilapia du Nil (*Oreochromis niloticus*) élevé en système biofloc sur les performances de croissance, la consommation des floes et la qualité physico-chimique de l'eau. Cette partie permet de discuter sur les résultats obtenus afin de mieux comprendre la dynamique du biofloc et de la croissance des tilapias dans les conditions expérimentales de cette étude. Elle permet également de déterminer si certains paramètres sont principalement influencés par le système d'élevage (circuit ouvert ou biofloc), et dans quelle mesure la diminution du taux de protéines brutes exerce un effet direct sur la consommation des floes.

### 4.1. Survie et croissance des tilapias

#### 4.1.1. Survie

Les taux de survie élevés (95-100%) confirment la bonne gestion de la qualité de l'eau et démontrent que les conditions mises en place étaient favorables à la survie et la croissance des tilapias et corroborent les résultats obtenus par Zablon et *al.* (2022). Pour un élevage de tilapia optimal en biofloc, il est recommandé de maintenir la température de l'eau entre 24 et 28°C (Pinho et *al.*, 2021) et la concentration en oxygène dissous supérieure à 5 mg/l (Hargreaves, 2013), une diminution de la concentration en oxygène dissous dans l'eau peut entraîner une déstructuration du biofloc (Deswati et *al.*, 2022). Dans cette étude, les valeurs obtenues pour ces deux paramètres sont restées globalement stables tout au long de la phase expérimentale, et sont identiques à celles d'autres études (Deswati et *al.*, 2022; Zablon et *al.*, 2022).

Bien que les variations de température aient été plutôt faibles, des différences significatives entre conditions expérimentales ont été remarquées. Les plus fortes variations (écarts-types > 0,7°C) ont été observées dans les systèmes en biofloc pouvant être liés à la respiration cellulaire et à la variation de la température ambiante dans le système expérimental. Ces variations, même faibles, pourraient exercer une influence indirecte sur la formation des floes et la croissance des tilapias, puisque l'activité bactérienne est fortement influencée par la température, sans toutefois compromettre la stabilité de l'environnement (Timmons, 2002; Avnimelech, 2007; Lekang, 2020; Abakari et *al.*, 2021). Cependant, la faible amplitude de ces variations montre que le système est resté globalement bien contrôlé.

En parallèle, l'absence de différences significatives en oxygène dissous entre les traitements suggère que l'activité microbienne des floes et les variations protéiques de l'aliment n'ont pas généré de déficit en oxygène, essentiel à la prévention d'épisodes d'hypoxie et par extension, d'alcalose respiratoire (conséquence de la diminution de la pression partielle en CO<sub>2</sub>) (Emerenciano et al., 2017; Khanjani et al., 2024). De plus, les concentrations en oxygène dissous de tous les bacs confondus sont restées assez élevées, entre 7,3 mg/l à 7,4 mg/l, reflétant une bonne efficacité du système d'aération mis en place et a permis d'exclure tout biais lié à l'oxygène sur les performances de croissance.

Ainsi, la stabilité et les conditions optimales de ces deux paramètres en font un point fort du dispositif mis en place pour cette expérimentation.

#### **4.1.2. Croissance**

Contrairement à la survie, la croissance des poissons semble tout de même affectée par cette diminution des apports protéiques. En effet, le SGR des poissons du groupe T3-28% de protéines brutes (1,54%/j) est significativement inférieur à celui des autres lots, ce qui met en évidence, dans nos conditions expérimentales, qu'une diminution trop importante du taux de protéines alimentaires impacte négativement la croissance des tilapias. La littérature recommande un seuil minimal de protéines pour un tilapia juvénile à 28-30%, ce qui concorde avec nos résultats (El-Sayed, 2020). Les poissons du groupe T2 (32% PB) présentent des performances comparables à ceux du groupe témoin T0 et du groupe T1 (38% PB), alors que le lot T3 (28% PB) se détache significativement des autres. Cette tendance pourrait refléter une utilisation énergétique différente chez les poissons élevés dans les systèmes biofloes où ils ont la possibilité de se nourrir des floes dont la concentration en nutriments est plus faibles et le contenu en fibres plus élevé, mais se révèlent insuffisants lorsque la ration est trop pauvre en protéines (Azim & Little, 2008). Pourtant, d'après d'autres études, la diminution des protéines brutes jusqu'à 26% voire 22% est possible sans impacter les performances de croissance puisque les micro-organismes du biofloc permettent l'amélioration de l'efficacité de l'alimentation exogène et l'alimentation compensatoire (Emerenciano et al., 2021; Khanjani & Sharifinia, 2022; Zablon et al., 2022). Khanjani et al. (2024) avancent même que les biofloes pourraient remplacer les protéines de l'aliment jusqu'à 100% (Khanjani et al., 2024).

Malgré une différence statistique avérée (ANOVA,  $p = 0,0013$ ) entre les conditions expérimentales, les valeurs de K obtenues ne diffèrent pas assez entre elles pour dire qu'il existe bel et bien des changements morphométriques entre les poissons des quatre lots. Par ailleurs, nos coefficients de Fulton semblent proches de ceux obtenus par Zablon et *al.* (2022), qui les a décrits comme de bons coefficients de conditions (Zablon et *al.*, 2022). Ce qui permet de dire que la diminution des taux de protéines n'a pas eu d'incidence sur la morphologie des tilapias.

Nos résultats suggèrent en revanche un phénomène d'alimentation compensatoire : les poissons du lot T2 (32% PB) ont probablement maintenu des performances de croissances proches de ceux de T1 grâce à l'ingestion du biofloc. Dans le groupe T3 (28% PB), les flocs étaient diffus, non compacts et peu décantables, donc moins accessibles et digestibles pour les poissons, ce qui a limité la compensation nutritionnelle et entraîné un déficit en protéines ingérées et par conséquent une croissance inférieure. Pourtant, Ekasari et *al.* (2014) ont mis en évidence un lien entre taille des flocs et digestibilité de ces derniers. En effet, d'après eux des flocs de taille supérieure à 100µm contiendraient plus de protéines et donc seraient plus riches, de même des flocs de taille inférieure à 48µm seraient plus favorables à la digestion et mieux utilisés par les poissons (Ekasari et *al.*, 2014). Or, dans notre cas les flocs des bacs en condition expérimentale T3 semblent plus fins que dans les autres en raison de leur incapacité à sédimenter et de leur MES plus petit, toutefois la croissance n'est pas meilleure dans ce traitement comme attendu d'après Ekasari et *al.* (2014). Ce qui nous laisse supposer que d'autres facteurs agissent sur les flocs et les empêchent d'être utilisés, probablement dû au développement exagéré de bactéries filamenteuses retrouvées dans ces systèmes bioflocs qui empêchent la sédimentation, résultats d'un déséquilibre du rapport C:N (De Schryver et *al.*, 2008; Hargreaves, 2013).

Il ressort de ces résultats que la qualité et la dynamique du biofloc exercent une influence directe sur les performances de croissance des poissons. Une altération du fonctionnement du système se traduit par une détérioration du biofloc entraînant un effet négatif sur la croissance. Il est donc important de maintenir un système stable et fonctionnel, ce qui passe par le contrôle rapproché des paramètres physico-chimiques. L'analyse de ces paramètres, présentée dans la suite de la discussion, permettra de mieux comprendre l'origine de la réduction des

performances de croissance observée lors de la diminution du taux de protéines brutes à 28% (T3).

#### **4.2.pH , alcalinité et conductivité**

Le suivi du pH et de l'alcalinité montre que le pH était significativement plus élevé dans les conditions expérimentales en circuit ouvert (T0) que celles en biofloc (T1, T2 et T3), comme attendu dans ces systèmes. Cela s'explique par le renouvellement de 30%/h mis en place dans le circuit ouvert. L'alcalinité a difficilement été maintenue à des valeurs proches de 150 mg de  $\text{CaCO}_3/\text{l}$ , seuil considéré comme optimal au bon fonctionnement d'un système en biofloc (Hargreaves, 2013; Emerenciano et al., 2017). La consommation de carbonate de calcium ( $\text{CaCO}_3$ ) par les bactéries nitrifiantes est à l'origine des fluctuations de l'alcalinité (Silva et al., 2020; Khanjani et al., 2024).

Les groupes T1 et T3, dont les valeurs moyennes d'alcalinité étaient plus faibles que celles du lot T2, pourraient présenter une stabilité moindre du pH et par conséquent une efficacité plus faible de la nitrification. Les bactéries nitrifiantes consomment en effet l'alcalinité sous forme de carbonates en tant que source de carbone et contribuent à acidifier le milieu lorsque la capacité tampon est insuffisante (Ebeling et al., 2006). Il est donc recommandé d'ajouter des carbonates solides (par exemple du  $\text{CaCO}_3$ , soit, 250g par kg d'aliment distribué) afin de maintenir un pH au-dessus de 7, seuil en dessous duquel l'efficacité de nitrification peut chuter de 90% (Ødegaard, 1992). La littérature recommande plutôt un pH optimal autour de 8 et 9 pour la nitrification (Henze & Harremoës, 1990). Cependant, un pH trop basique aurait tendance à favoriser la formes libre toxique de l'ammoniac ( $\text{NH}_3$ ) aux poissons par rapport à la forme ionisée ( $\text{NH}_4^+$ ) (Deswati et al., 2022). Dans ce contexte, le compromis d'un pH entre 7 et 8, pour des systèmes fermés tels qu'en biofloc, apparaît comme optimal (moyenne des trois traitements en biofloc = 7,8).

Nous remarquons notamment cette relation dans les conditions expérimentales T1 et T2 : la minéralisation accrue des composés organiques (excréments, restes d'aliments, ...) et la production de  $\text{NO}_3^-$  par le processus de nitrification entraîne une accumulation d'ions inorganiques dissous ( $\text{NO}_3^-$ ) (Luo et al., 2020; Zablon et al., 2022). Or, d'un point de vue

chimique, ces ions inorganiques contribuent à l'augmentation de la conductivité électrique. Par conséquent, dans les systèmes bioflocs, une élévation de la conductivité peut être considérée comme un indicateur indirect de l'accumulation des nitrates, se traduisant par une différence marquée entre le témoin T0 ( $752,9 \pm 6,05 \mu\text{S/cm}$ ) et le biofloc (moyenne =  $1833,2 \pm 135,8 \mu\text{S/cm}$ ). L'absence de différence significative entre les lots T1 (38% de protéines brutes), T2 (32% de protéines brutes) et T3 (28% de protéines brutes) suggère que la variation de teneur en protéines n'est pas le facteur principal influençant la conductivité du milieu.

Malgré les fluctuations de l'alcalinité dans les systèmes en biofloc, le pH était supérieur à 7 en moyenne dans tous les traitements, stabilité qui rejoint celle obtenue dans la littérature (Zablon et *al.*, 2022). Cela montre que les systèmes n'ont pas atteint un point critique de déséquilibre acido-basique à cause des mesures correctives de l'alcalinité avec l'ajout de carbonate de calcium d'une part et d'autre part par un faible renouvellement appliqué quotidiennement dans les bacs en biofloc (2%/j). En production commerciale, le suivi rapproché de l'alcalinité et l'apport régulier de carbonates constituent donc des paramètres déterminants la réussite d'une production en biofloc. Dans notre cas, ces trois paramètres n'ayant pas atteint des valeurs critiques, ils ne peuvent pas être à l'origine de quelque modification des performances de croissance des tilapias.

#### **4.3.Composés azotés**

Les composés azotés ont suivi des dynamiques différenciées selon les traitements mais une tendance similaire s'est dessinée entre le groupe contrôle T0 et ceux en biofloc. En effet, conformément aux attentes, les concentrations en  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{NO}_2^-$  et  $\text{NO}_3^-$  sont restées plus faibles dans le circuit ouvert, grâce au renouvellement constant de l'eau. Celui-ci a d'ailleurs été efficace, puisque les écarts-types observés pour ces trois composés azotés sont plutôt faibles (respectivement : 0,2 mg/l, 0,1 mg/l et 9,3 mg/l), indiquant une stabilité des concentrations. Nos observations opposent celles obtenues par Zablon et *al.*, où leurs concentrations en ammonium dans le circuit ouvert étaient plus élevées (Zablon et *al.*, 2022).

Malgré des valeurs plus élevées dans les traitements en biofloc ( $1,8 \pm 0,5$ - $2,1 \pm 0,7 \text{ mg/l}$ ), l'ammonium ( $\text{NH}_4^+$ ) est resté à des niveaux relativement bas, ne dépassant pas ou peu le seuil

recommandé de 2 mg/l (De Schryver et *al.*, 2008). Ces valeurs nous indiquent que l'excrétion azotée des poissons est bien contrôlée par l'activité des bactéries hétérotrophes, qui assimilent cet azote et évitent l'accumulation d'ammonium dans les bacs, en cohérence avec les observations d'Avnimelech et Kochba (2009) (Avnimelech & Kochba, 2009). Aussi, l'absence de différence significative entre les traitements T1, T2 et T3 laisse penser que la réduction de l'apport en protéines brutes de 38% à 28% dans l'aliment n'a pas eu pour effet de diminuer la charge ammoniacale du système, alors que cette relation a été observée Emerenciano et *al.* (2021) dans une étude précédente (Emerenciano et *al.*, 2021).

Les nitrites ont présenté des valeurs plus élevées dans le lot T1 ( $0,6 \pm 0,4$  mg/l) par rapport aux concentrations retrouvées chez T2 et T3, mais sont restées à des niveaux évitant la toxicité ( $<1$  mg/l). Cette accumulation ponctuelle pourrait refléter un ralentissement passager de la nitrification, ce qui peut survenir naturellement dans des systèmes bioflocs, même si les paramètres restent dans des gammes acceptables.

Finalement, conformément aux observations d'Ebeling et *al.* (2006), l'accumulation des nitrates dans les bacs en système biofloc prouve le bon fonctionnement de la nitrification (Ebeling et *al.*, 2006). Afin de ne pas atteindre le seuil de concentrations toxiques (500 mg/l) (Emerenciano et *al.*, 2017), un léger renouvellement d'eau (2%/j) a été réalisé. Toutefois, ces observations ont permis de confirmer que ces systèmes agissent comme des réacteurs biologiques où l'azote est majoritairement transformé sous forme oxydée ( $\text{NO}_3^-$ ) par la nitrification et peuvent être consommés, sous la forme des bioflocs, par les poissons qui retiennent ainsi une plus grande part d'azote que dans une système recirculé, bien que celle-ci varie en fonction de la qualité des flocs (Ekasari et *al.*, 2014).

La gestion de l'azote dans un système biofloc est tout aussi importante que complexe. En effet, elle repose sur l'équilibre entre charge azotée, apport de carbone et activité microbienne. Une variation d'un de ces paramètres, même minime, pourrait perturber l'équilibre du système. La diminution en apport protéique pourrait être une solution à la diminution de la charge azotée mais l'effet n'a pas pu être visible sur une période expérimentale restreinte. Par conséquent, la

stabilité des concentrations obtenues en biofloc a permis d'éviter un effet négatif sur la croissance des poissons.

#### **4.4.Dynamique du biofloc et matières en suspension**

Les volumes de flocs ont montré des variabilités élevées intra-traitement, surtout dans les conditions expérimentales T2 et T3, où les écarts-types dépassaient leur moyenne (respectivement  $59,4 \pm 104,6$  ml/l et  $93,4 \pm 157,2$  ml/l). Inter-traitement, le volume de floc était significativement supérieur dans les lots en T3, avec des valeurs aberrantes observées en fin de période expérimentale (mises en évidence dans l'encadrement orange, Figure 12). La présence de ces pics était associée à une réduction des performances de sédimentation des flocs dans les cônes Imhoff, et non à une augmentation de la concentration de flocs compacts, souvent corrélée à une forte concentration en matière en suspension ( $< 500$  mg/l). Dans le cas contraire, le colmatage des branchies des tilapias aurait été probable (Hargreaves, 2013; M. G. C. Emerenciano et al., 2017; Manduca et al., 2021), ce qui aurait impliqué, en plus d'une diminution des performances de croissance, une diminution du taux de survie.

Ce problème de décantation s'explique souvent par une modification de la structure des communautés microbiennes, notamment par la prolifération excessive de bactéries filamenteuses (« filamentous bulking ») et rend le contrôle de la concentration en matière en suspension plus difficile (Hargreaves, 2013). La corrélation de Spearman évaluant les liens entre volume de floc et taux de protéines dans l'aliment n'a montré aucun lien significatif, ce qui suggère que d'autres facteurs que l'apport protéique, tels que l'apport de carbone exogène (mélasse) ou l'évolution de l'écologie microbienne, jouent des rôles importants. D'autant plus que, d'après la littérature, l'apport de C permet le développement des bactéries hétérotrophes. Celles-ci affectent la qualité des flocs (quantité de protéines, lipides et cendres, et biodisponibilité), leur composition biochimique qui a un effet probiotique (Poly- $\beta$ -hydroxybutyrate (PHB)) et positif sur la croissance des espèces élevées (caroténoïdes, chlorophylle et polystéroïdes). Elles agissent également sur l'activité des enzymes digestives (lipases, amylases et protéases) et hépatiques des poissons (AST, ALT et ALP) (Ekasari et al., 2014; Khanjani et al., 2021; Khanjani & Sharifinia, 2022; Zablon et al., 2022; Khanjani et al., 2024).

Afin d'avoir une idée éclaircie sur la part des bioflocs dans l'alimentation des tilapias ainsi que sur leur qualité et leur composition, il serait intéressant de réaliser des analyses isotopiques dans des futurs travaux et affiner davantage la gestion de ce système. En effet, cette méthode permettrait de retracer les voies trophiques et quantifier la contribution des différentes sources alimentaires (Gamboa-Delgado, 2022), en évaluant notamment les compositions chimiques en carbone, en azote et en soufre des différents éléments du système (biofloc, sang des tilapias et aliment). Le carbone permettrait de distinguer les différentes sources de nutrition, apportant ainsi des informations supplémentaires sur le régime des organismes étudiés (Ray & Lotz, 2017). L'azote quant à lui, est un bon indicateur des positions trophiques, c'est-à-dire de la position des organismes dans la chaîne alimentaire (Middelburg, 2014; Suita *et al.*, 2016). Finalement le soufre, particulièrement intéressant en biofloc permettrait de suivre les processus microbiens du milieu.

Bien que le test de Kruskal-Wallis n'ait pas révélé de différence significative, la faible puissance statistique limite les interprétations possibles. La tendance générale indique que les volumes de floccs et la concentration en matières en suspension évoluent positivement ensemble (Figure 14), mais sans corrélation formelle. Cette absence de lien est cohérente avec l'observation que le groupe T3, qui présentaient les volumes de floccs les plus élevés, avait aussi les valeurs de MES les plus faibles. Cette hausse des volumes de floccs n'était pas accompagnée de fortes mortalités puisque les floccs étaient devenus diffus et filamenteux, moins dangereux pour les poissons, contrairement à des floccs compacts et décantables (Hargreaves, 2013; Khanjani *et al.*, 2024). La dégradation des matières en suspension pose problème puisqu'elle ne permet pas aux poissons de tirer parti des protéines contenues dans des floccs normaux, tandis qu'une augmentation de la matière organique entraîne des effets indésirables tels que l'augmentation de la respiration cellulaire des bactéries ce qui se traduit par une diminution en oxygène dissous. Il faudrait alors compenser cette diminution par apport d'oxygène dans le milieu, ce qui impliquerait une augmentation de la demande en électricité (Pinho *et al.*, 2021; Zablon *et al.*, 2022). Le système biofloc perdrait ainsi son intérêt économique et écologique.

Cette forte variabilité retrouvée intra-traitement prouve la sensibilité du biofloc face à des perturbations des paramètres du système, même faibles. En production commerciale, cette instabilité complique le contrôle de ces paramètres, même si des bassins plus grands

bénéficieraient d'un effet tampon plus marqué. Le suivi continu de la turbidité et un ajustement précis des apports en carbone dans le système restent indispensables afin d'éviter des pics instables et préserver l'équilibre du système. Dans les lots dont le taux en protéines brutes a été réduit à 28% (T3), les conditions obtenues ont eu un impact négatif sur la croissance des tilapias.

#### **4.5.Taux de conversion alimentaire (FCR)**

Le FCR le plus faible a été observé en circuit ouvert (T0 : 1,34) et tend à s'élever avec la réduction des taux de protéines : 1,39 pour T1, 1,43 pour T2 et 1,89 pour T3. Les différences entre les lots T0, T1 et T2 ne sont pas significatives, ce qui exclut un réel effet de la réduction modérée en protéines sur l'efficacité alimentaire. Cette stabilité du FCR pourrait s'expliquer par une ingestion compensatoire du biofloc, qui maintient une performance de croissance proche de celle du circuit ouvert. Nos résultats semblent plutôt bons puisqu'ils se rapprochent de ceux trouvés par Zablon et *al.* (2022) qui décrivaient leurs valeurs comme meilleures que celles d'Azim et Little (2008), résultats réjouissants car un bon FCR est la clé d'une production efficace (Azim & Little, 2008; Zablon et *al.*, 2022; Khanjani et *al.*, 2024).

Cependant, les poissons du groupe T3 possèdent un FCR qui tend à se dégrader, en cohérence avec la tendance observée pour le SGR. Suggérant que la combinaison entre l'indisponibilité en flocs digestibles et l'apport d'une ration pauvre en protéines induit une diminution des performance de croissance et se traduit ainsi par un FCR significativement supérieur aux autres. Les flocs diffus et peu décantables, observés dans ce dernier groupe, ont probablement réduit l'ingestion effective et l'efficacité de la digestion. Ce qui nous amène à penser que la qualité et la disponibilité des flocs jouent un rôle important sur le comportement alimentaire des poissons et sur l'efficacité de leur digestion. Ces observation rejoignent celles de Xu et *al.* (2018) qui ont montré que l'effet du biofloc sur le FCR dépend de la stabilité du système (rapport C:N) et de la qualité nutritive des flocs (Xu et *al.*, 2018).

Les différences observées pour le SGR et le FCR entre les poissons dans T0 et T1 relèvent plutôt d'une tendance biologique telle que d'une habitude alimentaire, liée à la consommation des flocs, plutôt que d'un effet statistiquement démontré. En revanche, la dégradation du FCR

des tilapias élevés en T3 traduit clairement les limites d'une réduction excessive de protéines exogène lorsque le biofloc n'est pas exploitable par les poissons.

#### **4.6. Rendement global du système**

Le rendement, qui reflète la performance globale de chaque bac, suit les tendances observées pour la croissance, confirmant l'impact d'une réduction excessive des protéines sur les performances des poissons. Cette variabilité entre bacs suggère également que des facteurs tels que l'hétérogénéité des poissons (Figure 17) ou des différences dans les caractéristiques des floes ont pu influencer les résultats.

Le cas du groupe T1 illustre bien la complexité des interactions entre croissance, morphologie et productivité puisqu'il présente le rendement le plus élevé malgré un coefficient de Fulton plus faible et des performances intermédiaires en SGR et FCR. À l'inverse, le lot T3, avec son rendement le plus faible, reste cohérent avec son SGR réduit, son FCR dégradé et son K significativement inférieur à celui de T0. Ainsi, le détachement du groupe à 28% de protéines brutes (T3) par rapport aux autres traitements, bien que non significatif pour le rendement, pourrait être interprété comme une conséquence directe de la diminution de la qualité physique des floes, combiné à un déficit en protéines, sur la performance globale du système biofloc.

Pour finir, nous ne devons pas nous limiter à la dimension physique des floes. D'après Azim et Little (2008), la composition biologique du biofloc, notamment l'abondance des micro-organismes présents, varie en fonction du taux de protéines de l'aliment distribué (Azim & Little, 2008). Ainsi, la baisse de rendement observée en T3 pourrait être la conséquence combinée de la réduction de disponibilité trophique liée à des floes diffus et d'une baisse de la valeur biologique des floes produits.

#### **4.7. Limites méthodologiques**

Notre étude a permis de mettre en évidence qu'il était possible de réduire modérément le taux de protéines dans l'aliment sans en influencer les performances et la croissance des tilapias

en biofloc et permet de rejoindre les résultats d'études antérieures (Emerenciano et al., 2021; Khanjani & Sharifinia, 2022; Zablon et al., 2022).

Cependant, elle comporte plusieurs limites méthodologiques qu'il est important de prendre en compte lors de nos interprétations et mieux orienter les futurs travaux. Parmi elles, nous pouvons parler des limites infrastructurelles, notamment les faibles volumes des bassins limitant la capacité tampon des systèmes bioflocs mais aussi le manque d'effectif expérimental et donc de représentativité. En effet, nos traitements étaient réalisés en triplicats (12 bacs, 3 par traitement), le strict minimum d'unité expérimentale à utiliser dans une expérience comme celle-ci. Ce manque de répétitions pourrait diminuer la puissance statistique des tests et la capacité de détecter quelque différence fine présente entre traitement. Avoir un plus grand nombre de répétitions par traitement permettrait de mieux dessiner et affiner les tendances observées, et de réduire les variations qui pourraient avoir lieu inter-bacs.

La quantification des bioflocs constitue une autre limite importante de ce travail. Les volumes des flocs mesurés se sont révélés élevés, mais présentaient des caractéristiques morphologiques diffuses et peu sédimentables vers la fin de la phase expérimentale, ce qui pourrait avoir réduit leur accessibilité et leur digestibilité par les poissons. De plus, le faible nombre de mesures de matières en suspension (seulement trois mesures) a limité la puissance des tests statistiques, rendant difficile la détection de différences statistiques ou encore la recherche de corrélations avec les volumes de flocs.

Enfin, la durée relativement courte de la phase expérimentale (42 jours) a restreint le nombre de mesures répétées, bien que la biomasse moyenne ait doublée entre le début (540,25g) et la fin (1116,5g) de l'expérience, condition sinequanone pour mettre fin à une expérience. Cette limite a réduit la puissance statistique de nos analyses et la possibilité d'évaluer certaines dynamiques à plus long terme, toutefois elle a permis le doublement de la biomasse.

Une dernière remarque possible à faire sur cette expérience serait l'absence de suivi détaillé de la composition élémentaire des flocs (N, C et S) limitant l'interprétation de leur contribution réelle dans l'alimentation compensatoire des tilapias et leur croissance, en particulier dans les traitements à apport protéique réduit.

#### **4.8.Perspectives d'amélioration**

Afin de passer outre ces limites, plusieurs axes d'améliorations peuvent être envisagés pour nos futurs travaux, par ordre d'importance :

- D'abord, afin d'éviter de nouvelles complications avec les volumes de flocs ainsi qu'avec leur dégradation qualitative, il serait utile de mieux comprendre les relations liées au rapport C:N et d'obtenir des mesures plus précises de celui-ci. Notamment par le suivi de la qualité nutritionnelle et de la composition chimique des flocs afin d'optimiser leur structure et leur ingestibilité par les tilapias.

- Ensuite, il serait envisageable d'augmenter le nombre de répétitions par traitement afin de renforcer la robustesse de nos tests statistiques et la valeur de nos interprétations en améliorant la caractérisation des variations intra-traitement. Paramètre surtout influencé par la disponibilité des infrastructures.

- Dans un registre similaire, accroître le volume des infrastructures constituerait une amélioration importante pour mieux contrôler et tamponner le milieu. Étant donné que la stabilité du système est déterminante pour la réussite d'un élevage en biofloc. Un effet tampon plus marqué permettrait de limiter la fréquence des contrôles physico-chimiques et, par conséquent, de réduire les coûts en production commerciale.

- Finalement, nous pourrions augmenter le nombre de poissons marqués. Cela permettrait d'effectuer des analyses statistiques valables sur les croissances individuelles, et non plus uniquement une observation visuelle de l'évolution.

Ces améliorations pourraient renforcer la puissance statistique, affiner la compréhension des interactions entre bioflocs et croissance ainsi qu'optimiser la gestion des systèmes biofloc à faible apport protéique.

## 5. Conclusion

L'objectif de cette étude était de déterminer les effets de la diminution des protéines dans l'aliment sur la croissance et les performances zootechniques des tilapias du Nil en système biofloc.

Les conditions physico-chimiques ont été maintenues stables, ce qui a permis d'obtenir des taux de survie supérieurs à 95% et d'exclure un impact majeur de l'environnement sur les performances des poissons. Les variations observées peuvent principalement être associées aux régimes alimentaires. Nos résultats montrent qu'une réduction modérée de la teneur en protéines dans l'aliment ne compromet ni la croissance, ni l'efficacité alimentaire, ni le rendement, alors qu'une réduction plus importante entraîne une baisse significative des performances. Les bioflocs compenseraient partiellement une alimentation modérément appauvrie en protéines, à condition que leur qualité et leur accessibilité soient optimales.

En conclusion, le système biofloc possède un potentiel dans le domaine de l'alimentation, mais également aux niveaux économique, environnemental et énergétique. En effet, la réduction des protéines dans l'aliment, sans compromettre la survie ni la croissance des poissons est un enjeu majeur en production intensive. De plus, ce système se distingue par son économie d'énergie, puisqu'il ne nécessite ni biofiltre ni pompe associée, limitant ainsi la consommation électrique et son impact écologique. Cette étude met en évidence qu'une réduction modérée des protéines est envisageable sans compromettre la production, à condition de maintenir des conditions d'élevage optimales ainsi que maîtriser la qualité et la disponibilité des floes.

## 6. Bibliographie

- Abakari, G., Luo, G., & Kombat, E. O. (2021). Dynamics of nitrogenous compounds and their control in biofloc technology (BFT) systems : A review. *Aquaculture and Fisheries*, 6(5), 441-447. <https://doi.org/10.1016/j.aaf.2020.05.005>
- Avnimelech Y. (1994). [Rev. of *Development of controlled intensive aquaculture systems with a limited water exchange and adjusted carbon to nitrogen ratio.*, par Kochva M & Diab S]. *Isr J Aquacult Bamidgeh*, 119-131.
- Avnimelech, Y. (1999). *Carbon:nitrogen ratio as a control element in aquaculture systems*.
- Avnimelech, Y. (2007). Feeding with microbial flocs by tilapia in minimal discharge bio-flocs technology ponds. *Aquaculture*, 264(1-4), 140-147.  
<https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2006.11.025>
- Avnimelech, Y., & Kochba, M. (2009). Evaluation of nitrogen uptake and excretion by tilapia in bio floc tanks, using <sup>15</sup>N tracing. *Aquaculture*, 287(1-2), 163-168.  
<https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2008.10.009>
- Azim, M. E., & Little, D. C. (2008). The biofloc technology (BFT) in indoor tanks : Water quality, biofloc composition, and growth and welfare of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*). *Aquaculture*, 283(1-4), 29-35.  
<https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2008.06.036>
- Ballester, E. L. C., Abreu, P. C., Cavalli, R. O., Emerenciano, M., De Abreu, L., & Wasielesky Jr, W. (2010). Effect of practical diets with different protein levels on the performance of *Farfantepenaeus paulensis* juveniles nursed in a zero exchange suspended microbial flocs intensive system. *Aquaculture Nutrition*, 16(2), 163-172.  
<https://doi.org/10.1111/j.1365-2095.2009.00648.x>
- Barriga-Sosa, I. D. L. A., Jimenez-Badillo, M. D. L., Ibanez, A. L., & Arredondo-Figueroa, J. L. (2004). Variability of tilapias (*Oreochromis* spp.) introduced in Mexico :

- Morphometric, meristic and genetic characters. *Journal of Applied Ichthyology*, 20(1), 7-14. <https://doi.org/10.1111/j.1439-0426.2004.00445.x>
- Barroso, R. M., Muñoz, A. E. P., & Cai, J. (2019). *Social and economic performance of tilapia farming in Brazil*. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Belton, B., Little, D. C., Zhang, W., Edwards, P., Skladany, M., & Thilsted, S. H. (2020). Farming fish in the sea will not nourish the world. *Nature Communications*, 11(1), 5804. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-19679-9>
- Beveridge, M. C. M., Begum, M., Frerichs, G. N., & Millar, S. (1989). The ingestion of bacteria in suspension by the tilapia *Oreochromis niloticus*. *Aquaculture*, 81(3-4), 373-378. [https://doi.org/10.1016/0044-8486\(89\)90161-0](https://doi.org/10.1016/0044-8486(89)90161-0)
- Bossier, P., & Ekasari, J. (2017). Biofloc technology application in aquaculture to support sustainable development goals. *Microbial Biotechnology*, 10(5), 1012-1016. <https://doi.org/10.1111/1751-7915.12836>
- Chutia, A., Xavier, K. A. M., Shamna, N., & Rani, A. M. B. (2022). Application of bioflocculating agent in inoculum enhances quality of biofloc and influences growth, feed utilization and stress responses of GIFT tilapia reared in-situ. *Aquaculture*, 553, 738050. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2022.738050>
- Crab, R., Chielens, B., Wille, M., Bossier, P., & Verstraete, W. (2010). The effect of different carbon sources on the nutritional value of bioflocs, a feed for *Macrobrachium rosenbergii* postlarvae. *Aquaculture Research*, 41(4), 559-567. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2109.2009.02353.x>
- Crab, R., Defoirdt, T., Bossier, P., & Verstraete, W. (2012). Biofloc technology in aquaculture : Beneficial effects and future challenges. *Aquaculture*, 356-357, 351-356. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2012.04.046>

- De Schryver, P., Crab, R., Defoirdt, T., Boon, N., & Verstraete, W. (2008). The basics of bio-flocs technology : The added value for aquaculture. *Aquaculture*, 277(3-4), 125-137.  
<https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2008.02.019>
- Debbarma, R., Singh, S. K., Waikhom, G., Biswas, P., Meena, D. K., & Choudhary, B. K. (2023). Biofloc technology : A strategic way to waste recycling in aquaculture. In *Advances in Resting-state Functional MRI* (p. 395-419). Elsevier.  
<https://doi.org/10.1016/B978-0-323-99145-2.00017-3>
- Deswati, D., Safni, S., Khairiyah, K., Yani, E., Yusuf, Y., & Pardi, H. (2022). Biofloc technology : Water quality (pH, temperature, DO, COD, BOD) in a flood & drain aquaponic system. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 102(18), 6835-6844. <https://doi.org/10.1080/03067319.2020.1817428>
- Durigon, E. G., Lazzari, R., Uczay, J., Lopes, D. L. D. A., Jerônimo, G. T., Sgnaulin, T., & Emerenciano, M. G. C. (2020). Biofloc technology (BFT) : Adjusting the levels of digestible protein and digestible energy in diets of Nile tilapia juveniles raised in brackish water. *Aquaculture and Fisheries*, 5(1), 42-51.  
<https://doi.org/10.1016/j.aaf.2019.07.001>
- Ebeling, J. M., Timmons, M. B., & Bisogni, J. J. (2006). Engineering analysis of the stoichiometry of photoautotrophic, autotrophic, and heterotrophic removal of ammonia–nitrogen in aquaculture systems. *Aquaculture*, 257(1-4), 346-358.  
<https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2006.03.019>
- Ekasari, J., Angela, D., Waluyo, S. H., Bachtiar, T., Surawidjaja, E. H., Bossier, P., & De Schryver, P. (2014). The size of biofloc determines the nutritional composition and the nitrogen recovery by aquaculture animals. *Aquaculture*, 426-427, 105-111.  
<https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2014.01.023>

- El-Sayed, A.-F. M. (2020). Nutrition and feeding. In *Tilapia Culture* (p. 135-172). Elsevier.  
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816509-6.00007-0>
- Emerenciano, M., Ballester, E. L. C., Cavalli, R. O., & Wasielesky, W. (2011). Effect of biofloc technology (BFT) on the early postlarval stage of pink shrimp *Farfantepenaeus paulensis* : Growth performance, floc composition and salinity stress tolerance. *Aquaculture International*, 19(5), 891-901. <https://doi.org/10.1007/s10499-010-9408-6>
- Emerenciano, M., Cuzon, G., Arévalo, M., & Gaxiola, G. (2014). Biofloc technology in intensive broodstock farming of the pink shrimp *Farfantepenaeus duorarum* : Spawning performance, biochemical composition and fatty acid profile of eggs. *Aquaculture Research*, 45(10), 1713-1726. <https://doi.org/10.1111/are.12117>
- Emerenciano, M., Cuzon, G., Goguenheim, J., Gaxiola, G., & AQUACOP. (2012). Floc contribution on spawning performance of blue shrimp *Litopenaeus stylirostris*. *Aquaculture Research*, 44(1), 75-85. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2109.2011.03012.x>
- Emerenciano, M. G. C., Fitzsimmons, K., Nishioka Rombenso, A., Miranda-Baeza, A., Bernardes Martins, G., Lazzari, R., Elizabeth Fimbres-Acedo, Y., & Mello Pinho, S. (2021). Biofloc Technology (BFT) in Tilapia Culture. In J. F. López-Olmeda, F. J. Sánchez-Vázquez, & R. Fortes-Silva, *Biology and Aquaculture of Tilapia* (1<sup>re</sup> éd., p. 258-293). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781003004134-14>
- Emerenciano, M. G. C., Martínez-Córdova, L. R., Martínez-Porchas, M., & Miranda-Baeza, A. (2017). Biofloc Technology (BFT) : A Tool for Water Quality Management in Aquaculture. In *Water Quality*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/66416>

- Emerenciano, M., Gaxiola, G., & Cuzo, G. (2013). Biofloc Technology (BFT) : A Review for Aquaculture Application and Animal Food Industry. In M. D. Matovic (Éd.), *Biomass Now—Cultivation and Utilization*. InTech. <https://doi.org/10.5772/53902>
- FAO. (2024). *The State of World Fisheries and Aquaculture 2024*. FAO. <https://doi.org/10.4060/cd0683en>
- FAO. (2025). *FAO: Tilapia du Nil—Accueil*. <https://www.fao.org/fishery/affris/profil-des-especes/nile-tilapia/tilapia-du-nil-accueil/fr/>
- FishBase. (s. d.). *Oreochromis niloticus summary page*. FishBase. Consulté 21 mars 2025, à l'adresse <https://www.fishbase.us/summary/Oreochromis-niloticus.html>
- Frankic, A., & Hershner, C. (2003). Sustainable aquaculture : Developing the promise of aquaculture. *Aquaculture International*, 11(6), 517-530. <https://doi.org/10.1023/B:AQUI.0000013264.38692.91>
- Gamboa-Delgado, J. (2022). Isotopic techniques in aquaculture nutrition : State of the art and future perspectives. *Reviews in Aquaculture*, 14(1), 456-476. <https://doi.org/10.1111/raq.12609>
- Grassi, T. L. M., Do Espírito Santo, E. F., De Siqueira Marcos, M. T., Cavazzana, J. F., Oliveira, D. L., Bossolani, I. L. C., & Ponsano, E. H. G. (2016). Bacterial pigment for Nile tilapia feeding. *Aquaculture International*, 24(2), 647-660. <https://doi.org/10.1007/s10499-015-9955-y>
- Hargreaves, J. A. (2013). *Biofloc Production Systems for Aquaculture*. 1-11.
- Henze, M., & Harremoës, P. (1990). Chemical-Biological Nutrient Removal—The HYPRO Concept. In H. H. Hahn & R. Klute (Éds.), *Chemical Water and Wastewater Treatment* (p. 499-510). Springer Berlin Heidelberg. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-76093-8\\_33](https://doi.org/10.1007/978-3-642-76093-8_33)

- Hersi, M. A., Genc, E., Pipilos, A., & Keskin, E. (2023). Effects of dietary synbiotics and biofloc meal on the growth, tissue histomorphology, whole-body composition and intestinal microbiota profile of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) cultured at different salinities. *Aquaculture*, 570, 739391.  
<https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2023.739391>
- Hisano, H., Barbosa, P. T. L., De Arruda Hayd, L., & Mattioli, C. C. (2021). Comparative study of growth, feed efficiency, and hematological profile of Nile tilapia fingerlings in biofloc technology and recirculating aquaculture system. *Tropical Animal Health and Production*, 53(1), 60. <https://doi.org/10.1007/s11250-020-02523-z>
- Hisano, H., Barbosa, P. T. L., Hayd, L. A., & Mattioli, C. C. (2019). Evaluation of Nile tilapia in monoculture and polyculture with giant freshwater prawn in biofloc technology system and in recirculation aquaculture system. *International Aquatic Research*, 11(4), 335-346. <https://doi.org/10.1007/s40071-019-00242-2>
- Hisano, H., Parisi, J., Cardoso, I. L., Ferri, G. H., & Ferreira, P. M. F. (2020). Dietary protein reduction for Nile tilapia fingerlings reared in biofloc technology. *Journal of the World Aquaculture Society*, 51(2), 452-462. <https://doi.org/10.1111/jwas.12670>
- Hopkins JS. (1993). [Rev. of *Effect of water exchange rate on production, water quality, effluent characteristics and nitrogen budgets of intensive shrimp ponds.*, par Hamilton RD, Sandier PA, Browdy CL, & Stokes AD]. *J World Aquacult Soc.*, 304-320.  
<https://doi.org/10.1111/j.1749-7345.1993.tb00162.x>
- Jamal, M. T., Broom, M., Al-Mur, B. A., Al Harbi, M., Ghandourah, M., Al Otaibi, A., & Haque, M. F. (2020). Biofloc Technology : Emerging Microbial Biotechnology for the Improvement of Aquaculture Productivity. *Polish Journal of Microbiology*, 69(4), 401-409. <https://doi.org/10.33073/pjm-2020-049>

- Jiang, Q., Bhattarai, N., Pahlow, M., & Xu, Z. (2022). Environmental sustainability and footprints of global aquaculture. *Resources, Conservation and Recycling*, 180, 106183. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106183>
- Khanjani, M. H., Alizadeh, M., Mohammadi, M., & Aliabad, H. S. (2021). The Effect of Adding Molasses in Different Times on Performance of Nile Tilapia ( *Oreochromis niloticus* ) Raised in a Low-Salinity Biofloc System. *Annals of Animal Science*, 21(4), 1435-1454. <https://doi.org/10.2478/aoas-2021-0011>
- Khanjani, M. H., & Sharifinia, M. (2020). Biofloc technology as a promising tool to improve aquaculture production. *Reviews in Aquaculture*, 12(3), 1836-1850. <https://doi.org/10.1111/raq.12412>
- Khanjani, M. H., & Sharifinia, M. (2022). Biofloc technology with addition molasses as carbon sources applied to *Litopenaeus vannamei* juvenile production under the effects of different C/N ratios. *Aquaculture International*, 30(1), 383-397. <https://doi.org/10.1007/s10499-021-00803-5>
- Khanjani, M. H., Sharifinia, M., & Emerenciano, M. G. C. (2024). Biofloc Technology (BFT) in Aquaculture : What Goes Right, What Goes Wrong? A Scientific-Based Snapshot. *Aquaculture Nutrition*, 2024(1), 7496572. <https://doi.org/10.1155/2024/7496572>
- Khanjani, M. H., Sharifinia, M., & Hajirezaee, S. (2022). Recent progress towards the application of biofloc technology for tilapia farming. *Aquaculture*, 552, 738021. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2022.738021>
- Kim, J.-H., Kim, S. K., & Hur, Y. B. (2020). *Acetylcholinesterase inhibition, and immune responses in olive flounders, Paralichthys olivaceus, reared in bio-floc and seawater.*
- Kim, S.-K., Pang, Z., Seo, H.-C., Cho, Y.-R., Samocha, T., & Jang, I.-K. (2014). Effect of bioflocs on growth and immune activity of Pacific white shrimp, *Litopenaeus vannamei* postlarvae. *Aquaculture Research*.

- Kuhn, D. D., Boardman, G. D., Lawrence, A. L., Marsh, L., & Flick, G. J. (2009). Microbial floc meal as a replacement ingredient for fish meal and soybean protein in shrimp feed. *Aquaculture*, 296(1-2), 51-57. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2009.07.025>
- Kumar, V., Roy, S., Behera, B. K., Swain, H. S., & Das, B. K. (2021). Biofloc Microbiome With Bioremediation and Health Benefits. *Frontiers in Microbiology*, 12, 741164. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.741164>
- Lekang, O.-I. (2020). *Aquaculture engineering* (3rd edition). Wiley Blackwell.
- Likongwe, J. S., Stecko, T. D., Stauffer, J. R., & Carline, R. F. (1996). Combined effects of water temperature and salinity on growth and feed utilization of juvenile Nile tilapia *Oreochromis niloticus* (Linnaeus). *Aquaculture*, 146(1-2), 37-46. [https://doi.org/10.1016/S0044-8486\(96\)01360-9](https://doi.org/10.1016/S0044-8486(96)01360-9)
- Liti, D., Cherop, L., Munguti, J., & Chhorn, L. (2005). Growth and economic performance of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus* L.) fed on two formulated diets and two locally available feeds in fertilized ponds. *Aquaculture Research*, 36(8), 746-752. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2109.2005.01265.x>
- Liu, H., Li, H., Wei, H., Zhu, X., Han, D., Jin, J., Yang, Y., & Xie, S. (2019). Biofloc formation improves water quality and fish yield in a freshwater pond aquaculture system. *Aquaculture*, 506, 256-269. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2019.03.031>
- Liu, J., Hull, V., Godfray, H. C. J., Tilman, D., Gleick, P., Hoff, H., Pahl-Wostl, C., Xu, Z., Chung, M. G., Sun, J., & Li, S. (2018). Nexus approaches to global sustainable development. *Nature Sustainability*, 1(9), 466-476. <https://doi.org/10.1038/s41893-018-0135-8>
- Luo, G., Xu, J., & Meng, H. (2020). Nitrate accumulation in biofloc aquaculture systems. *Aquaculture*, 520, 734675. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2019.734675>

- MacLeod, M. J., Hasan, M. R., Robb, D. H. F., & Mamun-Ur-Rashid, M. (2020). Quantifying greenhouse gas emissions from global aquaculture. *Scientific Reports*, 10(1), 11679. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-68231-8>
- Manduca, L. G., Silva, M. A. D., Alvarenga, É. R. D., Alves, G. F. D. O., Ferreira, N. H., Teixeira, E. D. A., Fernandes, A. F. A., Silva, M. D. A. E., & Turra, E. M. (2021). Effects of different stocking densities on Nile tilapia performance and profitability of a biofloc system with a minimum water exchange. *Aquaculture*, 530, 735814. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2020.735814>
- Martinez-Porchas, M., & Martinez-Cordova, L. R. (2012). World Aquaculture : Environmental Impacts and Troubleshooting Alternatives. *The Scientific World Journal*, 2012, 1-9. <https://doi.org/10.1100/2012/389623>
- McCusker, S., Warberg, M. B., Davies, S. J., Valente, C. D. S., Johnson, M. P., Cooney, R., & Wan, A. 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*, 3(4), 331-352. <https://doi.org/10.1002/aff2.108>
- Meng, W., & Feagin, R. A. (2019). Mariculture is a double-edged sword in China. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 222, 147-150. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2019.04.018>
- Middelburg, J. J. (2014). Stable isotopes dissect aquatic food webs from the top to the bottom. *Biogeosciences*, 11(8), 2357-2371. <https://doi.org/10.5194/bg-11-2357-2014>
- Nguyen, H. Y. N., Trinh, T. L., Baruah, K., Lundh, T., & Kiessling, A. (2021). Growth and feed utilisation of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) fed different protein levels in a clear-water or biofloc-RAS system. *Aquaculture*, 536, 736404. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2021.736404>
- Nunes, A. J. P., Sá, M. V. C., Andriola-Neto, F. F., & Lemos, D. (2006). Behavioral response to selected feed attractants and stimulants in Pacific white shrimp, *Litopenaeus*

- vannamei. *Aquaculture*, 260(1-4), 244-254.  
<https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2006.06.027>
- OCDE & Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture. (2022).  
*Perspectives agricoles de l'OCDE et de la FAO 2022-2031*. OECD.  
<https://doi.org/10.1787/63c6c63f-fr>
- Ødegaard, H. (1992). Norwegian Experiences with Chemical Treatment of Raw Wastewater.  
*Water Science and Technology*, 25(12), 255-264.  
<https://doi.org/10.2166/wst.1992.0357>
- Ogello, E. O., Musa, S. M., Aura, C. M., Abwao, J. O., & Munguti, M. (2014). *An Appraisal of the Feasibility of Tilapia Production in Ponds Using Biofloc Technology : A review*.
- Pérez-Fuentes, J. A., Hernández-Vergara, M. P., Pérez-Rostro, C. I., & Fogel, I. (2016). C:N ratios affect nitrogen removal and production of Nile tilapia *Oreochromis niloticus* raised in a biofloc system under high density cultivation. *Aquaculture*, 452, 247-251.  
<https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2015.11.010>
- Pérez-Fuentes, J. A., Pérez-Rostro, C. I., Hernández-Vergara, M. P., & Monroy-Dosta, M. D. C. (2018). Variation of the bacterial composition of biofloc and the intestine of Nile tilapia *Oreochromis niloticus* , cultivated using biofloc technology, supplied different feed rations. *Aquaculture Research*, 49(11), 3658-3668.  
<https://doi.org/10.1111/are.13834>
- Pinho, S. M., Lima, J. P., David, L. H., Oliveira, M. S., Goddek, S., Carneiro, D. J., Keesman, K. J., & Portella, M. C. (2021). Decoupled FLOCponics systems as an alternative approach to reduce the protein level of tilapia juveniles' diet in integrated agri-aquaculture production. *Aquaculture*, 543, 736932.  
<https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2021.736932>

- Rahman, M. M., Nagelkerke, L. A. J., Verdegem, M. C. J., Wahab, M. A., & Verreth, J. A. J. (2008). Relationships among water quality, food resources, fish diet and fish growth in polyculture ponds : A multivariate approach. *Aquaculture*, 275(1-4), 108-115. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2008.01.027>
- Ray, A. J., Drury, T. H., & Cecil, A. (2017). Comparing clear-water RAS and biofloc systems : Shrimp (*Litopenaeus vannamei*) production, water quality, and biofloc nutritional contributions estimated using stable isotopes. *Aquacultural Engineering*, 77, 9-14. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2017.02.002>
- Ray, A. J., & Lotz, J. M. (2017). Shrimp ( *Litopenaeus vannamei* ) production and stable isotope dynamics in clear-water recirculating aquaculture systems versus biofloc systems. *Aquaculture Research*, 48(8), 4390-4398. <https://doi.org/10.1111/are.13262>
- Rodrigues, R. B., Meurer, F., Da Silva, D. M., Uczay, M., & Boscolo, W. R. (2017). Tecnologia de bioflocos no cultivo de tilápia do nilo (*Oreochromis niloticus*). *Acta Tecnológica*, 10(2), 75-89. <https://doi.org/10.35818/acta.v10i2.351>
- Samocha, T. M., Prangnell, D. I., & Castro, L. F. (2019). Biofloc. In *Sustainable Biofloc Systems for Marine Shrimp* (p. 29-36). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818040-2.00003-4>
- Silva, M. A., Alvarenga, É. R., Costa, F. F. B. D., Turra, E. M., Alves, G. F. D. O., Manduca, L. G., Sales, S. C. M., Leite, N. R., Bezerra, V. M., Moraes, S. G. D. S., & Teixeira, E. D. A. (2020). Feeding management strategies to optimize the use of suspended feed for Nile tilapia ( *Oreochromis niloticus* ) cultivated in bioflocs. *Aquaculture Research*, 51(2), 605-615. <https://doi.org/10.1111/are.14408>
- Simões, M. R., Ribeiro, C. D. F. A., Ribeiro, S. D. C. A., Park, K. J., & Murr, F. E. X. (2007). Composição físico-química, microbiológica e rendimento do filé de tilápia tailandesa

- (*Oreochromis niloticus*). *Ciência e Tecnologia de Alimentos*, 27(3), 608-613.  
<https://doi.org/10.1590/S0101-20612007000300028>
- Støttrup and McEvoy, 2003. (s. d.).*
- Suita, S. M., Braga, A., Ballester, E., Cardozo, A. P., Abreu, P. C., & Wasielesky, W. (2016). Contribution of bioflocs to the culture of *Litopenaeus vannamei* post-larvae determined using stable isotopes. *Aquaculture International*, 24(5), 1473-1487.  
<https://doi.org/10.1007/s10499-016-0006-0>
- Tacon, A. G. J., Hasan, M. R., & Metian, M. (2011). *Demand and supply of feed ingredients for farmed fish and crustaceans.*
- Timmons, M. B. (Éd.). (2002). *Recirculating aquaculture systems* (2. ed). Cayuga Aqua Ventures.
- Troell, M., Naylor, R. L., Metian, M., Beveridge, M., Tyedmers, P. H., Folke, C., Arrow, K. J., Barrett, S., Crépin, A.-S., Ehrlich, P. R., Gren, Å., Kautsky, N., Levin, S. A., Nyborg, K., Österblom, H., Polasky, S., Scheffer, M., Walker, B. H., Xepapadeas, T., & De Zeeuw, A. (2014). Does aquaculture add resilience to the global food system? *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111(37), 13257-13263.  
<https://doi.org/10.1073/pnas.1404067111>
- Ulloa Walker, D. A., Morales Suazo, M. C., & Emerenciano, M. G. C. (2020). Biofloc technology : Principles focused on potential species and the case study of Chilean river shrimp *Cryphiops caementarius*. *Reviews in Aquaculture*, 12(3), 1759-1782.  
<https://doi.org/10.1111/raq.12408>
- Van Der Meeren, T., Olsen, R. E., Hamre, K., & Fyhn, H. J. (2008). Biochemical composition of copepods for evaluation of feed quality in production of juvenile marine fish. *Aquaculture*, 274(2-4), 375-397. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2007.11.041>

- Wang, M., & Lu, M. (2016). Tilapia polyculture : A global review. *Aquaculture Research*, 47(8), 2363-2374. <https://doi.org/10.1111/are.12708>
- Wilén, B.-M., Lund Nielsen, J., Keiding, K., & Nielsen, P. H. (2000). Influence of microbial activity on the stability of activated sludge flocs. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 18(2), 145-156. [https://doi.org/10.1016/S0927-7765\(99\)00138-1](https://doi.org/10.1016/S0927-7765(99)00138-1)
- Xu, W.-J., Morris, T. C., & Samocha, T. M. (2018). Effects of two commercial feeds for semi-intensive and hyper-intensive culture and four C/N ratios on water quality and performance of *Litopenaeus vannamei* juveniles at high density in biofloc-based, zero-exchange outdoor tanks. *Aquaculture*, 490, 194-202. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2018.02.028>
- Yu, Y.-B., Lee, J.-H., Choi, J.-H., Choi, Y. J., Jo, A.-H., Choi, C. Y., Kang, J.-C., & Kim, J.-H. (2023). The application and future of biofloc technology (BFT) in aquaculture industry : A review. *Journal of Environmental Management*, 342, 118237. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.118237>
- Zablon, W. O., Ogello, E. O., Getabu, A., & Omondi, R. (2022). Biofloc system improves protein utilization efficiency and growth performance of Nile tilapia, *Oreochromis niloticus* fry : Experimental evidence. *Aquaculture, Fish and Fisheries*, 2(2), 94-103. <https://doi.org/10.1002/aff2.32>

## 7. Annexe

**Annexe 1 :** Tableau de la composition des aliments aux différents niveaux d'apports protéiques.

| Ingrédient                                              | 38PB          | 32PB          | 28PB          | total |
|---------------------------------------------------------|---------------|---------------|---------------|-------|
| Tuna meal 65 / Farine de thon 65                        | 2.500         | 2.5           | 2.5           | 7.5   |
| Feather meal / Farine de plumes                         | 5.100         | 3.9           | 1             | 10    |
| Mix corngluten, Canola Hydrolyzed alfalfa, poultry meal | 10.750        | 7.5           | 7.5           | 25.75 |
| Corn / maïs                                             | 10.750        | 8             | 10            | 28.75 |
| Soybean meal / tourteau de soja                         | 5.000         | 5.5           | 6             | 16.5  |
| CaCo3                                                   | 0.500         | 0.5           | 0.5           | 1.5   |
| Mono CaP                                                | 1.000         | 1             | 1             | 3     |
| Premix vitamines et minéraux                            | 0.500         | 0.5           | 0.5           | 1.5   |
| Antifongique (phylaxer)                                 | 0.150         | 0.15          | 0.15          | 0.45  |
| Antioxydant (BHT)                                       | 0.020         | 0.02          | 0.02          | 0.06  |
| Méthionine                                              | 0.050         | 0.05          | 0.05          | 0.15  |
| Lysine                                                  | 0.150         | 0.15          | 0.15          | 0.45  |
| Salt                                                    | 0.350         | 0.350         | 0.350         | 1.05  |
| Wheat flour / farine de blé                             | 10.280        | 16.55         | 16.75         | 43.58 |
| soybean oil, canola oil                                 | 2.900         | 3.3           | 3.5           | 9.7   |
|                                                         |               |               |               |       |
|                                                         |               |               |               |       |
| <b>TOTAL</b>                                            | <b>36.820</b> | <b>30.120</b> | <b>29.720</b> |       |

**Annexe 2 :** Valeurs cibles des paramètres physico-chimiques en circuit ouvert.

| Paramètres                                                | Valeurs cibles | Fréquences de mesure | Sources                    |
|-----------------------------------------------------------|----------------|----------------------|----------------------------|
| <b>Température (°C)</b>                                   | 24-27          | Tous les jours       | (Pinho et al., 2021)       |
| <b>pH</b>                                                 | 7,5-8          | Tous les jours       | (Emerenciano et al., 2017) |
| <b>Conductivité (µS/cm)</b>                               | 1000 - 2000    | 1x/semaine           | (Pinho et al., 2021)       |
| <b>Alcalinité (mg CaCO<sub>3</sub>/l)</b>                 | > 20           | 1x/semaine           | Communication personnelle  |
| <b>O<sub>2</sub> dissous (mg/l)</b>                       | > 6            | Tous les jours       | (Hargreaves, 2013)         |
| <b>NH<sub>4</sub><sup>+</sup> - NH<sub>3</sub> (mg/l)</b> | Min < 2        | 2x/semaine           | Communication personnelle  |
| <b>NO<sub>2</sub><sup>-</sup> (mg/l)</b>                  | Min            | 2x/semaine           | Communication personnelle  |

|                                          |           |            |                           |
|------------------------------------------|-----------|------------|---------------------------|
|                                          | < 1       |            |                           |
| <b>NO<sub>3</sub><sup>-</sup> (mg/l)</b> | 150 – 500 | 1x/semaine | Communication personnelle |

**Annexe 3 : Valeurs cibles des paramètres physico-chimiques en biofloc.**

| Paramètres en système BFT                                 | Valeurs cibles       | Fréquence mesure                | Sources                                                            |
|-----------------------------------------------------------|----------------------|---------------------------------|--------------------------------------------------------------------|
| <b>Température (°C)</b>                                   | 24-28                | Tous les jours                  | (Pinho et al., 2021)                                               |
| <b>Oxygène (mg/l)</b>                                     | >5                   | Tous les jours                  | (Hargreaves, 2013)                                                 |
| <b>pH</b>                                                 | 7 – 9                | Tous les jours                  | (Emerenciano et al., 2017)                                         |
| <b>Alcalinité (mg CaCO<sub>3</sub>/l)</b>                 | 100-150              | 1x/semaine                      | (Emerenciano et al., 2017; Hargreaves, 2013)                       |
| <b>Conductivité (µS/cm)</b>                               | 1000-2000            | 1x/semaine                      | (Pinho et al., 2021)                                               |
| <b>NH<sub>4</sub><sup>+</sup> / NH<sub>3</sub> (mg/l)</b> | <2                   | 2x/semaine                      | (De Schryver et al., 2008)                                         |
| <b>NO<sub>2</sub><sup>-</sup> (mg/l)</b>                  | <1                   | 2x/semaine                      | (Emerenciano et al., 2017)                                         |
| <b>NO<sub>3</sub><sup>-</sup> (mg/l)</b>                  | <500                 | 1x/semaine                      | (Emerenciano et al., 2017)                                         |
| <b>Matières en suspension MES (mg/l)</b>                  | 200 – 500 (max 1000) | 1 fois toutes les deux semaines | (Emerenciano et al., 2017; Hargreaves, 2013; Manduca et al., 2021) |
| <b>Volume de floc (ml/l)</b>                              | 25 - 30              | Tous les jours                  | (Emerenciano et al., 2017; Hargreaves, 2013)                       |

**Annexe 4 : Protocole d'analyse ammoniac-ammonium (NH<sub>3</sub>-NH<sub>4</sub><sup>+</sup>), méthode Nessler.**

- **Matériels** : spectrophotomètre, pipette digitale, tubes de 14mm de diamètre, bécher
- **Réactifs** : Stabilisateur, Nessler
- **Protocole** :

Prendre un échantillon d'eau à analyser dans un bécher

Allumer le spectrophotomètre : appuyer programme 954 et appuyer sur *Enter*

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

Rincer la pipette à l'eau distillée

Prélever à l'aide d'une pipette digitale:

5mL de l'eau désionisée (témoin) : 1<sup>er</sup> tube

5mL de l'échantillon : 2<sup>e</sup> tube

Ajouter les réactifs :

- 1<sup>er</sup> : stabilisateur, une goutte dans chaque tube d'échantillon (y compris le témoin)
- 2<sup>ème</sup> : Nessler, 10 gouttes dans chaque tube d'échantillon (y compris le témoin)

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

Dès que les minutes s'épuisent, placer en premier le tube du témoin dans le spectrophotomètre (couvrir le tube à l'aide d'un capuchon) et appuyer sur *zéro* (*attendre jusqu'à ce que cela marque « 0,00 »*)

Prendre le 2<sup>ème</sup> tube (échantillon), placer dans le spectrophotomètre (couvrir le tube à l'aide d'un capuchon) et appuyer sur *Read*

Noter la valeur (mg/L)

Vider et rincer les tubes à l'eau distillée, les placer de manière inversée.

#### **Annexe 5 : Protocole d'analyse des nitrites (NO<sub>2</sub><sup>-</sup>), méthode de Diazotation.**

- **Matériels** : spectrophotomètre, pipette digitale, tubes de 14mm de diamètre, bécher
- **Réactifs** : Nitrite 1, Nitrite 2 (pourquoi on en mets deux à la suite ?)
- **Protocole** :

Prendre un échantillon d'eau à analyser dans un bécher

Pour changer de programme, appuyer sur « *select program* »

Appuyer sur le programme 955 et *enter*

Régler la longueur d'onde à 540 nm et appuyer sur *enter*

Prélever à l'aide d'une pipette digitale:

5mL de l'échantillon (témoin : ne pas ajouter de réactifs) : 1<sup>er</sup> tube

5mL de l'échantillon (Ajout de réactifs) : 2<sup>e</sup> tube

Ajouter 10 gouttes de Nitrite 1 dans le 2<sup>e</sup> tube d'échantillon

Appuyer sur *shift + timer* (agiter afin d'homogénéiser et attendre le minuteur : 30 secondes)

Ajouter 10 gouttes de Nitrite 2 dans le 2<sup>e</sup> tube d'échantillon (agiter afin d'homogénéiser)

Appuyer sur *shift + timer* (attendre le minuteur : 2 minutes)

Prendre le tube du témoin, placer dans le spectrophotomètre et appuyer sur *zéro* (*attendre jusqu'à ce que cela marque « 0,00 »*)

Prendre l'échantillon (2<sup>e</sup> tube), placer dans le spectrophotomètre (couvrir le tube à l'aide d'un capuchon) et appuyer sur *read*

Noter la valeur (mg/L)

Vider et rincer les tubes à l'eau distillée, les placer de manière inversée.

*N.B : Si on ne sait pas lire la valeur « over range », il faudrait tout recommencer, tout en diluant l'échantillon (ex : par 10) en ajoutant de l'eau distillée dans le tube. La valeur affichée sur l'écran du spectrophotomètre sera multipliée fois la valeur de dilution.*

Exemple : Pour une dilution par 10, il faudrait prélever 0,5ml de l'échantillon et ajouter 4,5ml de l'eau distillée :  $1,78 \text{ mg/L} \times 10 = 17,8 \text{ mg/L}$ .

**Annexe 6 :** Protocole d'analyse des nitrates ( $\text{NO}_3^-$ ), méthode de réduction au cadmium.

- **Matériels :** spectrophotomètre, pipette digitale, cuve, bécher

- **Réactifs :** HR nitrate

- **Protocole :**

Prendre un échantillon d'eau à analyser dans un bécher

Pour changer de méthode, appuyer sur « *select program* »

Programme 355 + *enter*

Ajuster la longueur d'onde à 500nm

Exprimer les nitrates en  $\text{NO}_3^-$  (régler l'unité avec les touches de directions)

Prélever à l'aide d'une pipette digitale :

5mL de l'échantillon (témoin : ne pas ajouter de réactifs) : 1<sup>ère</sup> cuvette

5mL de l'échantillon (Ajout de réactifs) : 2<sup>e</sup> cuvette

Amener le volume à 25ml dans les deux cuves

Ajouter le HR nitrate dans la 2<sup>e</sup> cuvette

Appuyer sur *shift + timer* (*mélanger la solution*)

Une fois les minutes épuisées, appuyer encore sur *shift + timer*

Après le minuteur, placer la cuvette servant de témoin dans le spectrophotomètre et appuyer sur *zéro*

Placer la cuvette d'échantillon (contenant la solution d'échantillon + HR nitrate), la placer dans le spectrophotomètre et appuyer sur *read*

Comme on dilue 5x (*La valeur affichée sur l'écran du spectrophotomètre est multipliée fois 5*)

Noter la valeur calculée

Exemple :  $\text{NO}_3^- = 32 \times 5 = 160 \text{ mg/L de } \text{NO}_3^-$

Vider et rincer les tubes à les cuvettes utilisées, les placer de manière inversée.

#### **Annexe 7 : Méthode de mesure des solides en suspension (TSS).**

- **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.

Prélever 25mL de l'eau à analyser avec une éprouvette graduée

Peser le filtre avec son support à l'aide d'une balance analytique

$M_0$  mg (toujours manipuler le filtre à l'aide de pinces)

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)

Homogénéiser l'échantillon d'eau. Filtrer l'échantillon

Rincer l'éprouvette et le cône de filtration 3 x à l'aide d'eau désionisée et filtrer l'eau du rinçage.

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.

Après 2 heures, mettre le filtre dans un dessiccateur pour le laisser refroidir

Quand le filtre est à température ambiante, peser le filtre à l'aide d'une balance analytique  $M_1 = mg$

Calculer la concentration de MES =  $\frac{M_1 - M_0}{V} =$  mg/L

Exemple :

- Matière en suspension = 0,1237g
- Poids du filtre = 0,1137 g

Calcul :  $123,7 \text{ mg} - 113,7 \text{ mg} = 10 \text{ mg} / 25 \text{ mL} \rightarrow (10 \times 40) \text{ mg} / (25 \times 40) \text{ mL} \rightarrow 400 \text{ mg/L}$

#### **Annexe 8 : Formules de calcul des cinq paramètres zootechniques.**

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

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

**Taux de croissance spécifique (SGR) (%/j) =  $\frac{\ln(PM_f) - \ln(PM_i)}{t} \times 100$**

- $PM_f$  : Poids moyen final (g)
- $PM_i$  : Poids moyen initial (g)

- t : Temps d'expérience (jour)

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

- B<sub>f</sub> : Biomasse finale (g)
- B<sub>i</sub> : Biomasse initiale (g)
- RTD : Ration totale distribuée (g)

$$\textbf{Rendement (Rdt) (kg/m}^3\text{/an)} = \frac{B_f - B_i}{V \times t} \times 365$$

- B<sub>f</sub> : Biomasse finale (kg)
- B<sub>i</sub> : Biomasse initiale (kg)
- V : Volume du bac (m<sup>3</sup>)
- t : Temps d'expérience (jour)

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

- P : Poids de l'individu (g)
- T : Taille de l'individu (cm)

$$\textbf{Ration alimentaire initiale (RA}_0\text{)} = B \times 0,03 \times \textbf{NAL}$$

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

$$\textbf{Ration alimentaire au jour n (RA}_n\text{) (g)} = \textbf{RA}_{n-1} + \textbf{SGR} \times \textbf{RA}_{n-1}$$

- RA<sub>n-1</sub> : Ration alimentaire au jour n-1 (g)
- SGR : Taux de croissance spécifique (%/j)