

Travail de fin d'études

Auteur : Sow, Oumarou

Promoteur(s) : Gennotte, Vincent

Faculté : Faculté des Sciences

Diplôme : Master de spécialisation en gestion des ressources aquatiques et aquaculture

Année académique : 2020-2021

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/13286>

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.



UNIVERSITE DE LIEGE
FACULTÉ DES SCIENCES



**MASTER DE SPÉCIALISATION EN GESTION DES RESSOURCES AQUATIQUES
ET AQUACULTURE**

TRAVAIL DE FIN D'ÉTUDE

**Valorisation des effluents organiques d'aquaponie dans
un système de production par Biofloc**

Réalisé par :

Oumarou SOW

Promoteur :

Dr. Vincent GENNOTTE

Année académique 2020-2021

Remerciements

Au terme du présent travail il me plaît d'exprimer ma gratitude à toutes les personnes physiques et morales qui m'ont appuyé dans son aboutissement. Mes remerciements s'adressent :

- A l'ARES pour l'octroi de la bourse d'étude et le financement de mes études en Belgique ;
- Au PACODEL pour la facilitation de mon séjour en Belgique ;
- A Madame Carole ROUGEOT, responsable du Centre de Formation et de Recherche en Aquaculture (CEFRA) pour m'avoir accepté dans sa structure et facilité mon séjour ;
- A Monsieur Vincent GENNOTTE, promoteur de mon travail, pour son encadrement et les apports scientifiques inestimables ;
- A Monsieur Christian PRIGNON et tous les autres membres du CEFRA pour leurs appuis respectifs durant la phase expérimentale du travail ;
- A l'ensemble du corps enseignant du Master de spécialisation en gestion des ressources aquatiques et aquaculture (GeRAA) pour les enseignements reçus ;
- A mon épouse Madame Habibou SOW/ZIDA et mes enfants Eliane Léa SOW et Bernice Rhodes Mégane SOW pour leurs soutiens inestimables et d'avoir accepté mon absence auprès d'eux durant tout le temps de la formation ;
- A mon amie Mademoiselle Ella Nongawendé ZONGO avec qui j'ai suivi la formation, pour son soutien et ses encouragements durant tout le séjour en Belgique ;
- A tous les autres camarades du Master GeRAA pour les moments partagés ensemble.

Résumé

Le biofloc est un assemblage d'eau, de micro-organismes et de matières abiotiques qui est adapté pour la production de certains organismes d'intérêt comme le tilapia. Du fait de sa capacité à recycler des matières organiques, il améliore la disponibilité alimentaire à travers la biomasse bactérienne qui se développe. L'objectif du présent travail est de valoriser les effluents d'aquaponie par la technique du biofloc. Pour cela, trois traitements différents ont été utilisés pour évaluer les performances de croissance de *O. niloticus*.

Le dispositif expérimental est constitué d'un système d'aquaculture à eau recirculée (RAS), d'un biofloc normal ou standard (BFTS) et d'un biofloc enrichi (BFTE) avec des effluents d'aquaponie (boues issues de la filtration mécanique). Chaque traitement est fait en deux répliques de 200 litres et mis en charge avec 15 poissons d'un poids corporel moyen de $163,3 \pm 54,3$ g à une densité de $12,23$ kg/m³. Les quantités d'aliment distribué aux poissons du BFTS et du BFTE représentaient respectivement 80% et 50% (plus effluents aquaponiques) de celle du RAS. Les poissons ont été élevés pendant 50 jours et la ration normale était en moyenne de 2% de la biomasse totale des poissons du RAS.

Les paramètres physico-chimiques des trois traitements sont globalement restés dans les plages optimales pour l'élevage de *O. niloticus*. Un taux de survie de 100% avec un bon état sanitaire des poissons sont observés dans les trois traitements. Aucune différence significative n'est observée entre le RAS et le BFTS en ce qui concerne le poids moyen final, le gain de poids moyen, le SGR et le taux production. Il en est de même entre le BFTS et le BFTE. Les valeurs de ces paramètres dans le RAS sont significativement supérieures à celles du BFTE. Cependant, dans le BFTE, le FCR a été amélioré plus que dans le BFTS et le RAS. Les quantités d'eau neuve apportée dans les traitements bioflocs sont plus de 2 fois inférieures à celle du RAS et aucune pompe ni de biofiltre n'ont été utilisés dans les traitements BFT.

La quantité de poissons que pourrait produire l'enrichissement de bioflocs avec la production annuelle de matières sèches des effluents d'aquaponie de Strée sur la base des résultats obtenus est estimée à 143 kg avec un volume d'élevage de 6 m³ (densité de 25 kg/m³), des quantités d'aliment et de sucre respectives de 135 kg et 128 kg et un apport journalier d'eau neuve de 283 litres.

Mots clés : Effluents, biofloc, *Oreochromis niloticus*.

Abstract

Biofloc is an assembly of water, microorganisms and abiotic material that is suitable for producing organisms of interest such as tilapia. Due to its ability to recycle organic matter, it improves food availability through bacterial biomass development. The objective of this work is to promote aquaponics wastewater recycling through biofloc technology (BFT). To this end, growth performances of *O. niloticus* were assessed in three different farming conditions.

The experimental device consisted of a recirculating water aquaculture system (RAS), a normal or standard biofloc (BFTS) and an enriched biofloc (BFTE) with aquaponics effluents (sludge from the mechanical filtration). Each treatment was set up in two 200 l tanks (replicas) and loaded with 15 fish (average body weight: 163.3 ± 54.3 g) at a density of 12.23 kg / m³. The amounts of feed distributed to fish in BFTS and BFTE were respectively 80% and 50% (plus aquaponic effluents) of the RAS feed ration (100%). The fish were reared for 50 days, and the normal feed ration averaged 2% of the total biomass in RAS.

Globally, physico-chemical parameters remained within optimal ranges for *O. niloticus* in the three conditions. No mortality (survival rate = 100%) and a good fish health were observed in all three conditions. Mean body weight, mean weight gain, SGR and production rate showed no significant difference between RAS and BFTS. Similar results were reported between the BFTS and the BFTE. The values of these parameters were significantly higher in the RAS compared to BFTE. However, in BFTE, FCR was improved more than in BFTS and RAS. The volume of make-up water supplied in the biofloc treatments was more than 2 times less than in the RAS and no pump or biofilter were used in the BFT treatments.

According to our results, the enrichment of a biofloc system with the aquaponics wastewater (sludge) from Strée could support an annual tilapia production of 143 kg with a rearing volume of 6 m³ (density of 25 kg / m³), a feed and sugar input of 135 kg and 128 kg respectively and a daily water input of 283 l.

Key words: Effluents, biofloc, *Oreochromis niloticus*.

TABLE DES MATIÈRES

Remerciements	i
Résumé	ii
Abstract	iii
Liste des tableaux	vi
Liste des figures	vii
I. INTRODUCTION BIBLIOGRAPHIQUE	1
1.1. Contexte général	1
1.2. Technologie biofloc (BFT)	2
1.2.1. Définition et principe du système BFT	2
1.2.2. Typologie du système BFT	2
1.2.3. Description et fonctionnement du système BFT	3
1.2.4. Espèces élevées dans les systèmes BFT	5
1.2.5. Rapport carbone/azote (C/N) dans les systèmes BFT	6
1.2.6. Composition nutritionnelle du biofloc	7
1.2.7. Forces et faiblesses du système BFT	8
1.3. Système d'aquaponie	9
1.4. Effluents d'aquaculture.....	10
1.4.1. Caractérisation des effluents d'aquaculture	10
1.4.2. Valorisation des effluents d'aquaculture.....	10
1.4.3. Synthèse des résultats de modélisation théorique des systèmes BFT pour la valorisation des effluents d'aquaponie de Strée.....	11
1.5. Présentation de l'espèce d'étude : <i>Oreochromis niloticus</i> (Linnaeus, 1758)	12
1.6. Problématique et objectifs de l'étude	13
II. MATERIEL ET METHODE.....	15
2.1. Matériel.....	15
2.1.1. Matériel biologique	15
2.1.2. Infrastructures d'élevage expérimental de <i>O. niloticus</i>	15
2.1.3. Matériel de mesure.....	15
2.2. Méthode	16
2.2.1. Mise en place des traitements expérimentaux.....	16
2.2.2. Quantité de matières sèches apportées au BFTE sous forme d'effluents	18
2.2.3. Collecte des effluents et caractérisation de leurs matières sèches	19
2.2.4. Estimation de la quantité de carbone apportée sous forme de sucre.....	20

2.2.5. Suivi des paramètres des traitements	20
2.2.6. Saisie, traitement et analyse des données	21
III. RESULTATS	22
3.1. Caractérisation des effluents d'aquaponie	22
3.2. Paramètres physico-chimiques des traitements	22
3.3. Paramètres zootechniques des poissons	25
3.3.1. Quantités d'aliment, d'effluents aquaponiques, de sucre et d'eau utilisés	25
3.3.2. Paramètres de croissance des poissons	25
3.3.3. Relations poids-longueurs et facteur de condition.....	27
3.4. Estimation de la production de poisson à partir des effluents d'aquaponie	28
IV. DISCUSSION	29
4.1. Caractérisation des effluents du système d'aquaponie	29
4.2. Paramètres physico-chimiques des traitements	29
4.3. Paramètres zootechniques des poissons	30
4.3.1. Quantités d'aliment, d'effluents d'aquaponie et de sucre utilisé	30
4.3.2. Paramètres de croissance des poissons	31
4.3.3. Relation poids-longueur et facteur de condition	32
4.4. Production de poisson à partir des effluents d'aquaponie	33
V. CONCLUSION	34
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	35

Liste des tableaux

Tableau 1 : Valeurs moyennes de quelques paramètres physico-chimiques enregistrés dans des bioflocs (Emerenciano et al., 2017)	5
Tableau 2 : Différentes sources de carbone utilisées dans les systèmes BFT.....	7
Tableau 3 : Proportions (%) des nutriments dans le biofloc	8
Tableau 4 : Synthèse de quelques paramètres caractéristiques des effluents d'aquaponie de Strée (Déclama, 2020).....	12
Tableau 5 : Concentration d'effluents, volume d'eau à apporter et production de tilapia en fonction de trois scénarios (Déclama, 2020).....	12
Tableau 6 : Paramètres physico-chimiques des bioflocs initiaux.	17
Tableau 7 : Synthèse des conditions expérimentales.	20
Tableau 8 : Productions moyennes et concentrations d'effluents et de boues décantées.	22
Tableau 9 : Valeurs moyennes des paramètres physico-chimiques des trois traitements.....	24
Tableau 10 : Quantités d'aliment, de matières sèches apportées par les effluents, de sucre utilisés et d'eau apportée dans les traitements.	25
Tableau 11 : Paramètres de croissance des poissons dans les traitements.....	26
Tableau 12 : Poids, longueurs totales et facteurs de condition moyens par traitements	27
Tableau 13 : Estimation de la production de poissons à partir de la production annuelle des effluents d'aquaponie et dimensionnement du volume d'élevage.	28
Tableau 14 : Valeurs optimales de paramètres physico-chimiques pour l'élevage d' <i>O. niloticus</i> . .	29

Liste des figures

Figure 1 : Biofloc algal ou BFT « eau verte » (A) et biofloc bactérien ou BFT « eau brune » (B) (Martha et Carlos, 2014)	3
Figure 2 : Processus biologiques dans les bioflocs (Martha et Carlos, 2014).....	4
Figure 3 : Bacs rectangulaires de 250 l contenant du biofloc (A) et bacs sub-carrés de 300 l (B).....	15
Figure 4 : Matériel utilisé pour le suivi des paramètres physico-chimiques.....	16
Figure 5 : Balance électronique (A) ($\pm 0,1\text{g}$) et ichthyomètre (B).	16
Figure 6 : Bioflocs mûrs utilisés pour la constitution des bioflocs expérimentaux	17
Figure 7 : Schéma explicatif du dispositif expérimental	17
Figure 8 : Flocs décantés dans des cônes d'Imhoff.....	21
Figure 9 : Evolution des paramètres physico-chimiques des traitements en fonction du temps (A = température ; B = oxygène dissous ; C = NH_4^+ ; D = NO_2^- ; E = NO_3^- et F=pH).	23
Figure 10 : Evolution de l'alcalinité (A) et de la conductivité électrique (B) des traitements en fonction du temps.....	24
Figure 11 : Evolution des concentrations de flocs (A) et des matières en suspension (B) des traitements BFT en fonction du temps.	24
Figure 12 : Evolution du poids moyen (A), du gain de poids moyen (B), du SGR moyen (C) et du FCR moyen (D) des traitements en fonction du temps.	26
Figure 13 : Relations poids-longueur à la mise en charge et en fin d'expérimentation dans les trois traitements	27

I. INTRODUCTION BIBLIOGRAPHIQUE

1.1. Contexte général

L'aquaculture est une activité qui contribue à la satisfaction des besoins socio-économiques par la production de denrées alimentaires, l'amélioration des moyens de subsistance et la génération de revenus pour la population mondiale (FAO, 2010). Sur le plan écologique, elle contribue au repeuplement des espèces aquatiques menacées ou surexploitées en fournissant des semences. La production aquacole s'est vue augmenter de façon exponentielle passant de 20 millions de tonnes en 1990 à environ 80 millions en 2010 puis à plus de 114 millions de tonnes en 2018 (FAO, 2020). Cela a pour conséquence l'augmentation des besoins en intrants (espace, eau, aliments, espèces performantes, énergie, etc.) qui n'est pas sans effet sur la qualité de l'environnement à travers les rejets des effluents (D'orbcastel, 2008 ; Kuypers, 2009). Les effluents aquacoles contiennent des déchets solides et dissous qui sont issus des excréptions métaboliques, des fèces, des restes d'aliments non consommés, des restes d'animaux morts (exosquelette), de matière organique, etc. (Blancheton et *al.*, 2004; D'orbcastel, 2008). Leurs caractéristiques chimiques (carbone, azote, phosphore, éléments traces) et physiques (taille, masse volumique, hydratation, résistance aux chocs, etc.) dépendent des espèces élevées et de la composition en nutriments des aliments distribués (Blancheton et *al.*, 2004). Dans un contexte de protection de l'environnement contre toutes les formes de pollution, les acteurs du secteur aquacole ont développé des systèmes intensifs et intégrés qui permettent de réduire les consommations en intrants. C'est le cas des systèmes d'aquaculture à eau recirculée (RAS) où les poissons sont élevés à haute densité et les besoins en eau sont divisés par 10 à 100 par rapport à l'aquaculture extensive (Blancheton et *al.*, 2009). Selon Foucard et *al.* (2015 et 2019), le RAS peut également intégrer d'autres systèmes comme l'aquaponie (aquaculture et hydroponie) qui utilise les déchets dissous de l'aquaculture pour produire des plantes. En plus des RAS, des techniques de polyculture sont développées afin d'occuper les différentes niches écologiques d'un étang par des espèces ayant des régimes alimentaires différents (Blancheton et *al.*, 2004, 2009). A côté de ces technologies, un accent particulier est mis sur la réduction des quantités d'aliments non retenues par les espèces d'aquaculture en mettant au point des régimes alimentaires adaptés à leurs besoins spécifiques. Ces régimes conçus avec des ingrédients hautement digestibles ont pour but de réduire les quantités d'aliments non consommées mais aussi les rejets fécaux, les excréptions de composés azotés et de phosphore (Blancheton et *al.*, 2004 ; D'orbcastel, 2008) dans les effluents aquacoles.

Pour réduire les rejets des effluents aquacoles dans l'environnement d'autres technologies de valorisation ont été développées en plus de l'aquaponie. Il s'agit par exemple de la technologie biofloc (BFT) qui utilise les déchets solides aquacoles pour la production de certaines espèces de poissons et de crevettes. L'intégration de la technologie BFT aux systèmes aquacoles ou d'aquaponie permet de transformer l'azote et le phosphore des déchets solides par les bactéries hétérotrophes en protéines microbiennes utilisables par certaines espèces de poissons et de crevettes adaptées aux conditions du biofloc (Sorgeloos, 2014; Choo et Caipang, 2015; Emerenciano et al., 2017; Jamal et al., 2020).

1.2. Technologie biofloc (BFT)

1.2.1. Définition et principe du système BFT

Par définition le biofloc est un assemblage d'eau, de micro-organismes (bactéries hétérotrophes, algues, champignons, ciliés, flagellés, rotifères, nématodes, métazoaires, etc.) et de matières abiotiques (matières fécales, aliments non consommés, exosquelettes, restes d'organismes morts, détritus, etc.) (Decamp et al., 2008 ; Daniel et Nageswari, 2017; Vijayan et Panigrahi, 2019 ; Vasava et al., 2020).

Le principe du système BFT consiste en la transformation des déchets solides azotés des effluents en protéines microbiennes par des bactéries hétérotropes dont le développement est fonction du rapport carbone/azote (C/N) présent dans le biofloc (Hargreaves, 2013 ; Choo et Caipang, 2015 ; Daniel et Nageswari, 2017; Emerenciano et al., 2017). Selon plusieurs auteurs (Emerenciano et al., 2017 ; Verster, 2017 ; Jamal et al., 2020), les microorganismes du système BFT permettent de maintenir la qualité de l'eau en bon état et contribuent aussi à la lutte contre certains pathogènes présents dans le biofloc.

1.2.2. Typologie du système BFT

Selon le lieu d'exposition des systèmes BFT on distingue :

- les systèmes BFT exposés à la lumière naturelle comprenant les étangs et les bassins. Ils sont essentiellement utilisés pour l'élevage des crevettes ou du tilapia (Hargreaves, 2013 ; Choo et Caipang, 2015). Dans ce type de système BFT encore appelé système biofloc « eau verte » (figure 1A) en raison de la coloration verte de l'eau par les populations algales, les processus complexes de mélanges algaux et bactériens aident à contrôler la qualité de l'eau (Hargreaves, 2013 ; Martha et Carlos, 2014 ; Choo et Caipang, 2015). Selon Hargreaves (2013) la plupart des systèmes BFT utilisé dans l'aquaculture commerciale est de type « eau verte ».

- les systèmes BFT non exposés à la lumière naturelle (raceways et bassins) mais installés dans des locaux empêchant tout contact avec la lumière naturelle. Encore appelé système biofloc « eau brune » (figure 1B), la qualité de l'eau de ce BFT est principalement sous le contrôle de l'activité bactérienne (Hargreaves, 2013 ; Martha et Carlos, 2014).



Figure 1 : Biofloc algal ou BFT « eau verte » (A) et biofloc bactérien ou BFT « eau brune » (B) (Martha et Carlos, 2014).

1.2.3. Description et fonctionnement du système BFT

Les bioflocs sont des macro-agrégats de bactéries, d'algues, de zooplancton et de matières organiques particulières (aliments non consommés et fèces) (Hargreaves, 2013 ; Vijayan et Panigrahi, 2019). Selon Hargreaves (2013), le maintien des flocs en masse est assuré par du mucus sécrété par les bactéries ou par attraction électrostatique. Le bon fonctionnement des systèmes BFT dépend du rapport C/N. Le contrôle de l'azote dans le biofloc et sa transformation en protéines microbiennes est induit en fournissant aux bactéries hétérotrophes des substrats carbonés adéquats et une aération suffisante (Hargreaves 2013 ; Choo et Caipang, 2015 ; Daniel et Nageswari, 2017; Dauda et *al.*, 2018). La figure 2 présente la synthèse des processus biologiques de nitrification qui contribuent à l'augmentation des colonies bactériennes avec un rapport C/N suffisant (Martha et Carlos, 2014). En plus de favoriser le bon développement des bactéries et des poissons, l'aération permanente et suffisante du biofloc permet de limiter la sédimentation des matières solides qui peuvent créer des zones hypoxiques dans le fond des bassins ou colmater les branchies des poissons (Hargreaves, 2013). Dans les systèmes BFT à eau verte, le phytoplancton contribue au contrôle de la qualité de l'eau par absorption de certaines molécules dissoutes comme les nitrates. Il améliore aussi le taux d'oxygène dissous dans le biofloc à travers la photosynthèse en présence de la lumière solaire (Hargreaves, 2013; Choo et Caipang, 2015).

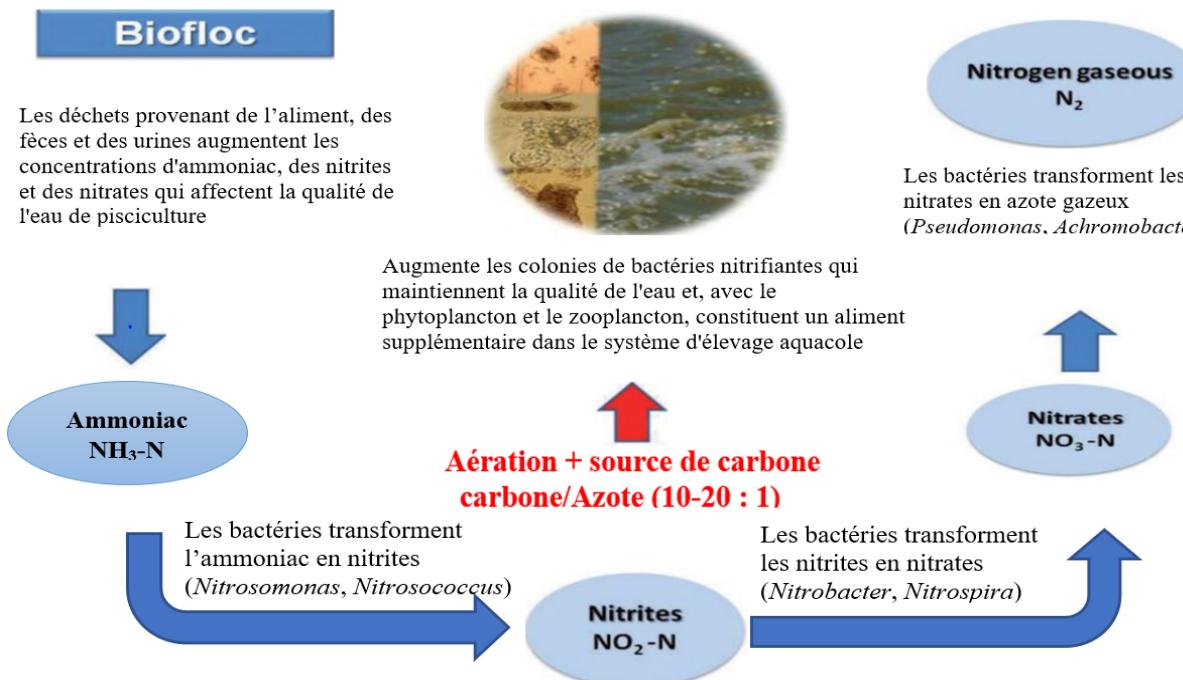


Figure 2 : Processus biologiques dans les bioflocs (Martha et Carlos, 2014).

Selon plusieurs auteurs (Hargreaves 2013; Hapsari, 2016 ; Daniel et Nageswari, 2017), les étangs, les bassins et les raceways sont les infrastructures aquacoles les mieux adaptées pour la mise en place technique d'un système BFT. Au vu de la complexité de leur composition (biotique et abiotique), les systèmes BFT sont toujours munis de dispositifs d'aération et de mélange permanent de l'eau. Ces dispositifs doivent être adaptés aux infrastructures afin de permettre une bonne oxygénation de l'eau et la suspension permanente des matières solides (Hargreaves, 2013; Poh, 2014). Selon Poh (2014) dans un système hautement oxygéné et agité avec un rapport C/N suffisant, certaines formes de biofloc se développent après 4-6 semaines. Concernant les aspects physico-chimiques, le bon fonctionnement du biofloc nécessite l'assemblage de paramètres compatibles d'une part avec le développement des populations bactériennes et du plancton et d'autre part avec la survie et la croissance des espèces d'aquaculture. Plusieurs types de paramètres sont pris en compte. Il s'agit entre autre du taux d'oxygène dissous, la température, le pH, la salinité, l'alcalinité, la teneur en composés azotés, les matières en suspension, les matières décantables (Fontenot et al., 2007 ; Avnimelech, 2007 ; Widanarni et al., 2012 ; Day et al., 2016 ; Verster, 2017). Le tableau 1 ci-dessous présente les valeurs moyennes de quelques paramètres physico-chimiques enregistrés dans les bioflocs par Emerenciano et al. (2017).

Tableau 1 : Valeurs moyennes de quelques paramètres physico-chimiques enregistrés dans des bioflocs (Emerenciano et al., 2017).

Paramètres	Plages idéales observées et/ou normales	Observations
Oxygène dissous	>4,0 mg/l (idéal) et au moins 60% de saturation	Pour la respiration et la croissance normales des poissons, crevettes et microbiotes
Température	28 à 30°C (intervalle idéal pour les espèces tropicales)	Outre les poissons et les crevettes, les basses températures (environ 20°C) pourraient affecter le développement microbien
pH	6,8 à 8,0	Les valeurs inférieures à 7,0 sont normales en BFT mais pourraient affecter le processus de nitrification
Salinité	Dépend des espèces élevées	Il est possible de générer du biofloc de 0 à 50 ppt
TAN	<1mg/l (valeur idéale)	Les valeurs de toxicité dépendent du pH
Nitrites	<1mg/l (valeur idéale)	Paramètre critique (difficile à contrôler). Une attention particulière doit être portée, par exemple, sur le niveau de protéines des aliments, la salinité et l'alcalinité
Nitrates	0,5 à 20 mg/l	Dans cet intervalle, ils sont généralement non toxiques pour les animaux d'élevage
Orthophosphates	0,5 à 20 mg/l	Dans cet intervalle, ils sont généralement non toxiques pour les animaux d'élevage
Alcalinité	>100 mg/l	Des valeurs élevées d'alcalinité aideront l'assimilation de l'azote par les bactéries hétérotrophes
Concentration des solides décantables	5-20 ml/l pour les alevins de tilapia ; 20-50 ml/l pour les juvéniles et adultes de tilapia	Des niveaux élevés de solides décantables contribueront à la consommation de l'oxygène dissous par la communauté d'hétérotrophes et le colmatage des branchies
Solides en suspension totaux (TSS)	< 500 mg/l	Identique à celle des solides décantables

1.2.4. Espèces élevées dans les systèmes BFT

Les principaux groupes d'espèces utilisées dans les systèmes BFT sont le tilapia (Azim et Little, 2008; Widanarni et al., 2012; Caipang et al., 2015; Day et al., 2016; Verster, 2017) et les crevettes (Burford et al., 2004; Poh, 2014; Arias-Moscoso et al., 2018). Les principales raisons d'utilisation de ces taxons résident dans leur tolérance écologique vis-à-vis des conditions d'élevage en BFT et surtout dans leur régime alimentaire microphage qui permet de valoriser

les flocons bactériens en aliment (Choo et Caipang, 2015). Plusieurs espèces de tilapia et d'autres espèces de poissons ont été utilisées en essai d'élevage dans du biofloc. Il s'agit entre autres de *O. niloticus* (Luo et al., 2014; Green et al., 2019), *O. mossambicus*, *O. andersonii* (Day et al., 2016), *Ictalurus punctatus* (Green, 2015; Green et al., 2020), *Clarias gariepinus* (Hapsari, 2016). En plus des poissons, des essais d'élevage et de production à grande échelle de quelques espèces de crevettes dans du biofloc ont été réalisés. Les espèces de crevettes utilisées sont *Litopenaeus vannamei* (Khanjani et al., 2017), *Farfantepenaeus duoradum* (Emerenciano et al., 2014), *Farfantepenaeus paulensis* (Emerenciano et al., 2011), *Penaeus monodon* (Kumar et al., 2015), etc. Selon (Burford et al., 2004), la capacité de rétention de l'azote à travers la consommation des protéines microbiennes contenues dans le biofloc est de 18 à 29% pour les crevettes et selon Avnimelech et Kochba (2009), elle est d'environ 25% pour le tilapia. Parmi les tilapias, *O. niloticus* présente de meilleures performances de croissance et d'adaptation dans le biofloc que *O. mossambicus* (Verster, 2017) et *O. andersonii* (Day et al., 2016; Verster, 2017).

1.2.5. Rapport carbone/azote (C/N) dans les systèmes BFT

Dans un système BFT, l'apport de carbone sous forme d'hydrate de carbone permet le développement efficace des bactéries hétérotrophes qui transforment l'azote présent dans le biofloc en protéines microbiennes et contrôle la teneur en ammoniac (Hargreaves, 2013 ; Caipang et al., 2015 ; Daniel et Nageswari, 2017). D'où la nécessité de maintenir le rapport C/N à un niveau optimal compatible avec le développement des bactéries hétérotrophes. Les valeurs de C/N varient selon que le biofloc soit en début (12-20 :1) ou en plein (6 :1) fonctionnement (Emerenciano et al., 2017). L'apport important du carbone au début du biofloc permet le développement rapide et la stabilisation des bactéries dans le milieu (Vijayan et Panigrahi, 2019). Hargreaves (2013) a montré que pour un aliment contenant 30 à 35% de protéines, le rapport C/N se situe autour de 9 à 10 :1. Donc toute augmentation de ce rapport à 12-15 :1 est favorable pour le contrôle de la teneur en ammoniac par les bactéries hétérotrophes qui auront assez de substrat pour se développer. Dans ce sens Caipang et al. (2015) ont utilisé un rapport C/N de 16 :1 pour élever des alevins de *O. niloticus* dans du biofloc avec un apport supplémentaire d'aliment contenant 35% de protéines brutes. Selon Avnimelech (2007) l'utilisation du glucose comme source de carbone avec un rapport C/N d'au moins 10 :1 permet l'absorption complète d'environ 10 mg NH₄⁺-N/l par les microorganismes. Ce même rapport de 10 :1 permet l'élimination de la plus grande partie de l'azote inorganique présent dans les infrastructures de production de crevettes par biofloc (Fontenot et al., 2007 ; Luo et al., 2014).

Cependant Poh (2014) et Emerenciano et al. (2017) proposent respectivement des rapports optimaux de 15 :1 et 12 à 20 :1 pour une bonne élimination de l'azote présent dans le système de production par biofloc. En plus de NH₄⁺ il a été démontré qu'un rapport suffisant de C/N permet d'éliminer d'autre substances toxiques comme les nitrites (NO₂⁻) dans les systèmes bioflocs (Avnimelech, 2005). Le point critique du rapport C/N où les bactéries hétérotrophes surpasseront les bactéries nitrifiantes est variable selon les sources de carbone organique (Michaud et al., 2006). Selon Hari et al. (2006) ; Crab et al. (2010) et Hargreaves, (2013), l'activité des bactéries hétérotrophes dans les systèmes BFT est plus rapide lorsqu'on utilise des glucides simples (saccharose, dextrose, glycérine, l'acétate) et un peu plus lente avec des sucres complexes (amidon ou la cellulose des céréales, mélasse, bagasse de canne à sucre, foin haché, etc.). En plus d'agir sur l'activité bactérienne, la source de carbone utilisée influence la qualité alimentaire du biofloc et donc le bien-être des espèces aquacoles présentes dans ces milieux (Crab et al., 2010 ; Emerenciano et al., 2013). Le tableau 2 ci-dessous présente quelques sources de carbone utilisées dans des bioflocs pour l'élevage de poissons et crevettes.

Tableau 2 : Différentes sources de carbone utilisées dans les systèmes BFT

Sources de carbone	Espèces élevées	Références
Glucose ou farine de manioc	<i>Penaeus monodon</i>	Avnimelech (1999)
Farine de maïs	<i>O. niloticus</i> , <i>O. mossambicus</i> , <i>O. andersonii</i> , <i>Macrobrachium rosenbergii</i>	Asaduzzaman et al. (2006) ; Day et al. (2016) ; Verster (2017)
Mélasse	Tilapia rouge Juvéniles de <i>Clarias gariepinus</i> , <i>Litopenaeus vannamei</i>	Widanarni et al. (2012) Hapsari (2016) ; Arias-Moscoso et al. (2018)
Farine de blé	<i>O. niloticus</i>	Azim et Little (2008) ; (Caipang et al., 2015)
Acétate	<i>O. niloticus</i>	Luo et al. (2014)

1.2.6. Composition nutritionnelle du biofloc

Les bioflocs contiennent les principaux éléments nutritifs (protéines, lipides, fibres, énergies, vitamines et d'autres éléments minéraux, etc.) qui se trouveraient dans un aliment artificiel pour les tilapias ou pour les crevettes (Hargreaves, 2013). Certains auteurs ont estimé les taux de protéines, lipides, fibres, cendres et énergie en poids sec de biofloc (tableau 3).

Tableau 3 : Proportions (%) des nutriments dans le biofloc

Références	Protéines	Lipides	Fibres	Cendres	Energie (Kj/g)
Webster et Lim (2002)	50		4	7	22
Azim et Little (2008)	38	3	6	12	19
Widanarni et al. (2012)	39-48	12-24	3-4	25-28	
Hargreaves (2013)	25-50	0,5-15			
Shyne et al. (2013)	23,3	3,53		31,98	
Rostika (2014)	50,6-53,5	1,9-2,6	3,8-4	7,4-7,5	

Selon Rostika (2014), les normes nutritionnelles des crevettes sont de 18 à 50% de protéines, 10 à 25% de matières grasses, 15 à 20% de glucides et un taux de cendre inférieure à 8,5%. Pour les tilapias les plages sont de 25 à 50% de protéines brutes, 6 à 10% de lipides bruts, 25% de glucides digestifs (Jauncey et Ross, 1982).

1.2.7. Forces et faiblesses du système BFT

– Les forces du système BFT

L'une des forces du système BFT est sa capacité à recycler les déchets solides riches en azote en protéine sous l'action des bactéries hétérotrophes (Hargreaves, 2013 ; Choo et Caipang, 2015 ; Daniel et Nageswari, 2017 ; Emerenciano et al., 2017). Cela permet de réduire les rejets d'effluents organiques et inorganiques dans l'environnement et donc de limiter la pollution (Sorgeloos, 2014 ; Choo et Caipang, 2015 ; Bossier et Ekasari, 2017). Les systèmes BFT contribuent à l'épuration des effluents d'aquaculture avec une plus grande biosécurité tout en réduisant le risque d'introduction et de propagation de pathogènes dans les milieux d'élevage (Arias-Moscoso et al., 2018 ; Vijayan et Panigrahi, 2019). Ils permettent de réduire la consommation d'eau et l'occupation de l'espace (Sorgeloos, 2014; Bossier et Ekasari, 2017). Ils sont donc adaptés pour les zones où la question de disponibilité foncière et d'eau se pose. La richesse du biofloc en organismes planctoniques constitue une source de nourriture pour des espèces comme *O. niloticus* qui est adapté à ce type de condition. Cela contribue à la réduction des quantités d'aliment à fournir aux poissons et donc contribue à la réduction des charges liées à l'alimentation. Selon Avnimelech et al. (1994), le biofoc contribuerait à la réduction de la ration alimentaire de d'environ 20%. Un autre avantage du biofloc est sa contribution à la baisse du taux de conversion alimentaire (FCR) chez les poissons (Hargreaves, 2013; Luo et al., 2014; Verster, 2017). Par sa richesse en protéines (25-50%) et en lipides (Azim et Little, 2008; Widanarni et al., 2012; Hargreaves, 2013), le biofloc pourrait réduire considérablement l'utilisation de la farine et de l'huile de poisson comme respectivement sources de protéines et de lipides dans les aliments utilisés en aquaculture (Schneider et al., 2005). L'absence de

pompes et de biofiltres dans le système BFT constitue un avantage non négligeable en termes de coût d'équipements.

– **Les faiblesses du système BFT**

Le biofloc par la complexité de sa composition et pour son fonctionnement efficace, nécessite une aération permanente afin de permettre le développement des micro-organismes car l'oxygène constitue un facteur limitant dans le biofloc (Vijayan et Panigrahi, 2019 ; Vasava et al., 2020). L'aération permanente consomme assez d'énergie. Cela engendre des coûts supplémentaires de production. De ce point de vue, le système BFT n'est pas assez adapté dans les zones où l'énergie est rare et/ou chère (Hargreaves, 2013). Il nécessite un mélange permanent de l'eau pour éviter que les matières solides ne sédimentent ou ne colmatent les branchies des poissons. Sa composition complexe pourrait être à l'origine d'agents pathogènes (*Vibrio sp.*) pouvant s'attaquer aux poissons. Un temps de démarrage assez long (au moins 4 semaines) est nécessaire pour la mise en place du biofloc (Crab et al., 2010; Hargreaves, 2013). Sa gestion nécessite plus de technicité et de suivi permanent des paramètres afin de les maintenir à des niveaux compatibles avec la vie des organismes qui s'y trouvent.

1.3. Système d'aquaponie

L'aquaponie se définit comme un couplage entre l'aquaculture et la culture végétale hors-sol ou hydroponie avec recirculation de l'eau (Foucard et al., 2015). Les rejets dissous issus de l'aquaculture sont des sources de nutriments assimilables par les plantes via les racines immergées dans l'eau. Selon Foucard et al. (2015) la nitrification de l'ammoniac pour obtenir des nitrates et la minéralisation des matières fécales pour fournir du phosphore et autres éléments sont des processus essentiels qui s'installent dans le système, à la suite de l'installation d'un biofiltre d'une part et parfois d'un bassin de minéralisation d'autre part. Les systèmes d'aquaponie sont essentiellement conçus pour réduire au maximum la consommation d'eau et réduire au mieux l'occupation de l'espace tout en assurant la recirculation d'une eau saine à la fois pour l'élevage de poissons, pour la culture de plantes et pour le développement de colonies de bactéries nitrifiantes (Tyson et al., 2004 ; 2008).

Le principe le plus important de l'aquaponie est l'utilisation des déchets produits par les poissons comme principale source de nutriments pour les plantes (Goddek et al., 2019). Selon Goddek et al. (2019), les systèmes d'aquaponie devraient idéalement être installés dans des structures plus ou moins fermées (serres, bâtiments de production aquacoles, etc.) où les conditions de production (paramètres physico-chimiques de l'eau, intensité d'éclairage, etc.) sont facilement contrôlables.

1.4. Effluents d'aquaculture

1.4.1. Caractérisation des effluents d'aquaculture

Les effluents d'aquaculture sont caractérisés par la présence de matières solides et dissoutes (Miller et Semmens, 2002 ; Dauda et al., 2018).

Les matières solides sont issues essentiellement des aliments non consommés et des matières fécales des espèces d'élevage (Miller et Semmens, 2002 ; Akinwole et al., 2016).

Selon la taille des matières solides, elles sont classées en matières solides en suspension et en matières solides décantables. Les matières en suspension sont composées de fines particules à faibles densités présentes à la surface ou dans la colonne d'eau. Les matières solides décantables ont des tailles plus importantes que celles en suspension. Elles se déposent rapidement dans le fond des infrastructures aquacoles et leur retrait est beaucoup plus simple (Ebeling et Timmons, 2012). Selon Cripps et Bergheim (2000) les concentrations de solides des effluents d'aquaculture non traités à écoulement continu sont estimées entre 5 à 50 mg/l et peuvent transporter 7 à 32% de l'azote total et 30 à 84% du phosphore des eaux usées.

Les matières dissoutes proviennent du métabolisme des poissons et de la décomposition des aliments non consommés. Elles sont présentes dans les effluents aquacoles sous forme d'ammoniac-ammonium ($\text{NH}_3/\text{NH}_4^+$), de nitrites (NO_2^-), de nitrates (NO_3^-), de phosphore (PO_4), de CO_2 , d'urée, etc. (Miller et Semmens, 2002; D'orbcastel, 2008; Foucard et al., 2019). Ces composés sont issus principalement de la dégradation des protéines des aliments distribués aux poissons. Les aliments riches en protéines contiennent de grandes quantités d'azote et de phosphore, mais moins de 50% de celles-ci sont retenues par le poisson (Piedrahita, 2003). De 25% à 30% selon Boy (2003) et 10% à 49% selon Piedrahita (2003) de l'azote est retenu par les poissons avec 17% à 40% de rétention de phosphore.

1.4.2. Valorisation des effluents d'aquaculture

Les exigences de protection de l'environnement contre toute forme de pollution ont suscité le développement de technologies de traitement et de valorisation des effluents. L'une des technologies développées est l'aquaponie (combinaison de l'aquaculture et l'hydroponie). Elle utilise les effluents d'aquaculture après filtrations mécanique et biologique pour la production de plantes qui absorbent les nitrates et le phosphore (Foucard et al., 2015 ; Goddek et al., 2019). L'eau ainsi épurée est renvoyée dans l'unité aquacole pour être réutilisée. Il est vrai que l'aquaponie permet de valoriser les déchets dissous à travers sa composante hydroponique, mais il est à noter que les déchets solides issus de la filtration mécanique des effluents ne sont pas valorisables par les plantes. D'où l'utilité d'intégrer d'autres systèmes comme les systèmes BFT

qui peuvent valoriser ces types de déchets. Les BFT assurent la transformation des déchets solides en protéines à travers des bactéries hétérotrophes en présence de substrat carboné adéquat permettant leur développement (Daniel et Nageswari, 2017 ; Emerenciano et al., 2017 ; Arias-Moscoso et al., 2018). Cela permet de réduire les rejets de déchets dans l'environnement tout en améliorant et diversifiant la production totale avec une utilisation efficiente de l'eau et de l'espace. D'autres techniques de valorisation des effluents d'aquaculture existent. Il s'agit de la concentration et de la stabilisation des boues avec de la chaux vive à raison de 15 à 20 g de chaux vive par litre de boues (Bergheim et Brinker, 2003) pour fertiliser les parcelles agricoles par épandage. Les boues sont aussi utilisées pour produire de la fumure organique par mélange à d'autres matières organiques (Rakocy et al., 2006) telles que les débris végétaux, les matières fécales d'autres animaux, etc. Les effluents aquacoles sont utilisés pour la production d'énergie à travers leur valorisation en biogaz selon le processus de la méthanisation (Marache, 2001 ; Gichana et al., 2018). Ils sont aussi utilisés pour la production de plancton par le processus de lagunage à travers les mécanismes trophiques naturels (Barnabé, 1978). Selon Brazil et Summerfelt (2006) le processus de lagunage permet d'éliminer plus de 50% et 80% de TAN respectivement en conditions d'eau froide et d'eau chaude avec un taux d'élimination de phosphore de plus de 20% en condition d'eau froide et entre 16 et 64% en condition d'eau chaude.

1.4.3. Synthèse des résultats de modélisation théorique des systèmes BFT pour la valorisation des effluents d'aquaponie de Strée

Dans le cadre du processus d'intégration d'un système BFT au système d'aquaponie pour la valorisation des effluents organiques aquacoles, des travaux préliminaires ont été réalisés par Declama (2020). Ces travaux se sont basés d'une part sur la quantification de la production de sandre dans le système d'aquaponie et d'autre part sur la quantification des productions journalière et annuelle des effluents par le système, la caractérisation des matières sèches (MES) des effluents produits ainsi que la proposition de modèles théoriques de systèmes BFT à expérimenter. Le tableau 4 présente les valeurs de quelques paramètres essentiels estimés par Declama (2020) à partir des effluents du système d'aquaponie de Strée.

Tableau 4 : Synthèse de quelques paramètres caractéristiques des effluents d'aquaponie de Strée (Declama, 2020).

Paramètres	Valeurs
Volume annuel d'effluents récolté après filtration mécanique (m ³ /an)	502
Quantité annuelle de MES produits par les effluents (kg/an)	112,5
Taux d'azote dans les MES (%)	6,11
Quantité annuelle d'azote fourni par les MES (kg/an)	6,9
Taux de carbone dans les MES (%)	42,32
Quantité annuelle de carbone fourni par les MES (kg/an)	47,6
Rapport C/N	6,93
Quantité annuelle de mélasse à apporter pour C/N =15 (kg/an)	122,74
Production annuelle bactérienne attendue grâce aux apports en C et N (kg/an)	41,19

Pour la modélisation d'un système BFT valorisant les effluents d'aquaponie, trois scénarios ont été proposés par Declama (2020). Il s'agit de nourrir les poissons avec exclusivement du flocon bactérien (FB) issu des effluents, de substituer respectivement 50% (Lombardo et al., 2018) et 80% (De Schryver et al., 2008) du flocon bactérien par de l'aliment exogène (AE). Les résultats d'une simulation de production de tilapia en utilisant les trois scénarios avec une même densité d'élevage de 25 kg/m³ sont différents (Declama, 2020). Il en est de même des volumes d'élevage, des quantités de MES à apporter pour alimenter le flocon bactérien, des quantités d'eau de compensation des pertes journalières, etc. (tableau 5).

Tableau 5 : Concentration d'effluents, volume d'eau à apporter et production de tilapia en fonction de trois scénarios (Declama, 2020).

Scénarios	100%FB	50%FB +50%AE	20%FB + 80%AE
Volume d'élevage (m ³)	1,5	3	7,49
Quantité totale de MES à apporter (kg/an)	112,46	122,75	153,65
Concentration de solides en suspension dans l'effluent (g/l)	75,07	40,97	20,51
Quantité d'effluents concentrés correspondants (l/an)	1498,07	2996,09	7491,47
Quantité d'aliment exogène (AE) à distribuer (kg/an)	0	41,19	164,78
Apport d'eau pour compenser les pertes journalières (l/an)	2186,35	4372,7	10935,4
Production de tilapia (kg/an)	37,45	74,9	187,85

Afin d'avoir une bonne concentration de matières solides en suspension et ne pas apporter trop d'eau dans les systèmes d'élevage, Declama (2020) propose que les effluents soient au préalable décanté puis concentrées avant leur utilisation dans les bioflocs.

1.5. Présentation de l'espèce d'étude : *Oreochromis niloticus* (Linnaeus, 1758)

C'est une espèce qui s'adapte à une large gamme de conditions du milieu aquatique. En milieu naturel, elle peut supporter des conditions thermiques de 14 à 31°C et 7 à 41°C en conditions

extrêmes pendant plusieurs heures (Amoussou et al., 2016). Toutefois, ses meilleures performances de croissance sont observées entre 24 et 28°C (El-Haroun et al., 2006 ; Day, et al., 2016). Elle peut survivre pendant plusieurs heures dans des eaux à faible taux d'oxygène dissous (de l'ordre de 0,1 mg/l avec au moins 3 mg/l nécessaire pour la croissance), à des pH allant de 5 à 11 (Alhassane, 2004) et des salinités d'environnant 11,5 g/l (Mashaii et al., 2016). *O. niloticus* est caractérisé par un régime alimentaire omnivore à tendance herbivore. En milieu naturel il est principalement phytoplanctonophage (Bamba et al., 2007 ; Ouattara et al., 2009 ; Avit et al., 2012) mais aussi se nourrit du zooplancton et de sédiments riches en bactéries (Ahdulrahaman, 1997; Balirwa, 1998). Cette capacité d'adaptation à différents régimes alimentaires s'explique en partie par la structuration de ses arcs branchiaux qui portent de nombreuses fines et longues branchiospines ainsi que de microbranchiospines qui assurent la filtration de l'eau pour retenir divers types de particules alimentaires de tailles variables. Il est capable de digérer les cyanobactéries à cause de son acidité gastrique élevée (Iga-Iga, 2008). En milieu artificiel, il est pratiquement omnivore (Azaza et al., 2006 ; Ble et al., 2011). Considérée comme l'une des espèces de poissons les plus importantes dans l'aquaculture tropicale et subtropicale (Barriga-Sosa et al., 2005), *O. niloticus* a la capacité de se développer et se reproduire dans des conditions environnementales variables (Siddik et al., 2014). Son régime alimentaire et son adaptation à diverses conditions physico-chimiques de l'eau permettent de l'élever dans divers systèmes de production aquacole. Son élevage dans le biofloc a fait l'objet de plusieurs travaux de recherche (Azim et Little, 2008 ; Luo et al., 2014 ; Abduljabbar et al., 2015 ; Day et al., 2016 ; Verster 2017).

1.6. Problématique et objectifs de l'étude

L'augmentation des quantités d'aliment utilisés dans la production intensive aquacole a pour conséquence la production de grandes quantités d'effluents dont la composition dépend de la qualité de l'aliment distribué aux poissons. La gestion des effluents produits est souvent problématique au vu des contraintes de protection de l'environnement contre toutes les formes de pollution. Face à cette situation, des technologies ont été développées pour assurer leur valorisation dans d'autres systèmes de production comme l'aquaponie. Dans les systèmes d'aquaponie, les plantes valorisent la partie dissoute des effluents et non les matières solides issues de la filtration mécanique. Au vu des teneurs assez importantes d'azote et de phosphore que les déchets solides des effluents aquacoles renferment (Piedrahita, 2003), ils pourraient être valorisés dans d'autres types de systèmes comme les bioflocs. Plusieurs études ont été réalisées sur la caractérisation du biofloc, son fonctionnement et ses effets sur les paramètres

zootechniques (croissance, production, taux de conversion alimentaire, etc.) de certaines espèces de poissons (*O. niloticus*, *O. mossambicus*, *O. andersonii* et *C. gariepinus*) qui y sont élevées (Azim et Little; 2008 ; Luo et al., 2014 ; Abduljabbar et al., 2015 ; Day et al., 2016 ; Verster, 2017). Un autre aspect important est de transformer les déchets solides produits par une espèce en biomasse bactérienne assimilable par une autre espèce élevée en biofloc dans le but de réduire les quantités d'effluents rejetés dans l'environnement. D'où l'intérêt du présent travail qui s'inscrit dans le cadre global d'un processus d'intégration d'un système biofloc au système d'aquaponie de Strée de l'asbl CERER-Pisciculture. Il fait suite aux travaux de Declama (2020) qui se sont plus focalisés sur les aspects de caractérisation des effluents produits par le système d'aquaponie ainsi que la modélisation théorique de systèmes bioflocs (utilisés pour élever du tilapia) à expérimenter afin de définir le système biofloc le plus adéquat à intégrer au système d'aquaponie. L'objectif du travail est donc d'expérimenter les différents modèles théoriques de bioflocs proposés par Declama (2020) sur la base des données issues de la caractérisation des effluents aquacoles du système d'aquaponie de Strée pour élever de l'*O. niloticus*. Spécifiquement il s'agit de (i) caractériser les effluents organiques produits par le système d'aquaponie, (ii) valoriser les déchets solides produits en aquaponie et (iii) tester si on peut réduire la proportion d'aliment exogène apportée dans un BFT.

Pour ce faire, nous avons comparé les performances de croissance de tilapias élevés en RAS (ration 100%) à celles de tilapias élevés dans un biofloc standard (BFTS), recevant 80% de la ration distribuée au RAS, et en biofloc enrichi (BFTE) en effluents organiques provenant du système aquaponique de Strée, recevant 50 % de la ration du RAS.

II. MATERIEL ET METHODE

2.1. Matériel

Les travaux se sont déroulés au Centre de Formation et de Recherche en Aquaculture (CEFRA) de l'Université de Liège. Le matériel utilisé au cours des travaux de recherche comprend le matériel biologique et les infrastructures d'expérimentation.

2.1.1. Matériel biologique

Le matériel biologique utilisé est le tilapia du Nil *Oreochromis niloticus*, de la souche domestiquée du CEFRA. Pour la phase expérimentale, une biomasse totale de 14,7 kg de poissons est répartie en six lots de 2,45 kg (à une densité de 12,23 kg/m³) correspondant à 15 poissons d'un poids corporel moyen de 163,3 ±54,3 g.

2.1.2. Infrastructures d'élevage expérimental de *O. niloticus*

Le dispositif expérimental est composé de 4 bacs rectangulaires de 250 litres chacun en panneau marins recouverts d'une bâche à l'intérieur (figure 3 A) fonctionnant en circuit ouvert et de 2 bassins sub-carrés de 300 litres (figure 3 B) alimentés en eau en circuit fermé avec décantation et filtration biologique. Ce circuit fermé (RAS) est équipé d'un stérilisateur UV et d'une résistance (1500 W) contrôlée par un thermostat. Les quatre bacs de 250 litres, indépendants, constituent le système BFT et les deux bacs de 300 litres constituent le contrôle RAS. L'ensemble du dispositif expérimental est installé dans un local d'environ 10 m² muni d'un éclairage, de radiateur pour assurer le chauffage et d'un thermomètre pour l'enregistrement de la température interne du local.



Figure 3 : Bacs rectangulaires de 250 l contenant du biofloc (A) et bacs sub-carrés de 300 l (B).

2.1.3. Matériel de mesure

– Matériel de mesure des paramètres physico-chimiques

Le suivi des paramètres physico-chimiques des traitements se fait à l'aide d'une série d'appareils comprenant un oxymètre pour la mesure du taux d'oxygène dissous et la

température de l'eau, d'un pH-mètre pour la mesure du pH, d'un spectrophotomètre (HACH DR/2010) pour le dosage des composés azotés (ammoniac, nitrites et nitrates), d'un alcalimètre digital (HACH 10-4000 mg/l Model AL-DT) pour la mesure de l'alcalinité, d'un conductimètre pour la conductivité électrique, des cônes d'Imhoff pour les matières solides des bioflocs, des membranes filtrantes, d'une étuve, d'un dessiccateur et d'une balance électronique pour respectivement la filtration, le séchage et le pesage des matières en suspension des bioflocs.

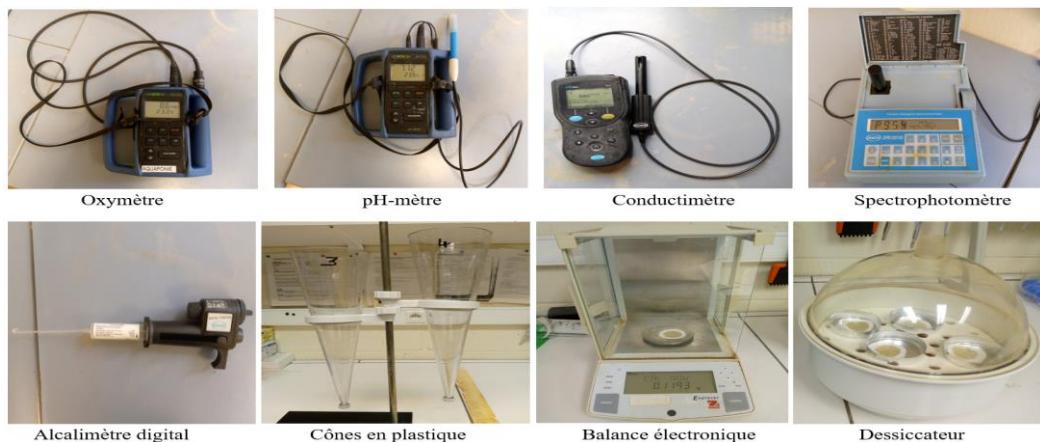


Figure 4 : Matériel utilisé pour le suivi des paramètres physico-chimiques.

– Matériel de mesure des paramètres zootechniques

Les rations journalières, les quantités journalières de sucre à mettre dans les traitements BFT et le poids des poissons ont été mesurés à l'aide d'une même balance électronique (figure 5 B). Un ichthyomètre est utilisé pour la mesure de longueur des poissons (figure 5 A).



Figure 5 : Balance électronique (A) ($\pm 0,1\text{g}$) et ichthyomètre (B).

2.2. Méthode

2.2.1. Mise en place des traitements expérimentaux

Pour la conduite de l'expérience, trois traitements sont testés dont un traitement témoin en RAS, un traitement biofloc standard (BFTS) et un traitement biofloc enrichi (BFTE) avec de la boue d'un système d'aquaponie. Chaque traitement est réalisé en duplicata pour élever des *O. niloticus* pendant 50 jours.

Les bioflocs expérimentaux sont constitués à partir de trois types de bioflocs nommés BFT1, BFT2 et BFT3 (figure 6) préexistant au CEFRA.



Figure 6 : Bioflocs mûrs utilisés pour la constitution des bioflocs expérimentaux

Les caractéristiques physico-chimiques des bioflocs initiaux utilisés pour la constitution des bioflocs expérimentaux sont présentées dans le tableau 6.

Tableau 6 : Paramètres physico-chimiques des bioflocs initiaux.

Paramètres	BFT1			BFT2			BFT3		
	Mini	Maxi	Moy	Mini	Maxi	Moy	Mini	Maxi	Moy
T(°C)	23,8	28,3	25,4±1,5	23,4	28	25,1±1,4	23,8	27,7	25±1,1
O ₂ (mg/l)	7,1	8,3	7,9±0,4	6,6	8	7,3±0,4	7,1	7,9	7,5±0,2
pH	7,8	8,68	8,4±0,3	7,7	8,2	7,9±0,2	7,5	8,2	7,9±0,3
NH ₄ ⁺ (mg/l)	0,4	2,9	1,9±0,9	2	13,5	5,6±3,7	2,5	12,7	5,7±3,5
NO ₂ ⁻ (mg/l)	0,2	3,4	1,2±1,1	2,3	12,4	6,5±3,4	1,8	10,4	4,9±2,4
NO ₃ ⁻ (mg/l)	31,7	175	98,7±55,6	33,7	220	123,5±71,4	40,3	226,1	140,2±74,1
CaCO ₃ (mg/l)	88	264	173,6±52,4	83	192	120,1±31,9	44	211	109,9±45,8
TSS (mg/l)	4	813	241,8±280	24	568	194,7±196,6	10,8	701,7	251,3±229,1
FV (ml/l)	17	75,5	43,1±25,7	0,3	190	35,2±56,5	0,4	112,5	34,3±33,8

Mini : Minimum ; Maxi : Maximum ; Moy : Moyenne± écart-type.

Les traitements BFT de notre expérimentation sont constitués à partir d'un mélange homogène des BFT1 ; 2 et 3 présentés ci-dessus et répartis équitablement en termes de volume et de conditions physico-chimiques dans les quatre bacs rectangulaires de 250 litres (figure 7). Le contenu de chaque bac est complété à 200 litres avec l'eau de puits utilisée par le CEFRA.

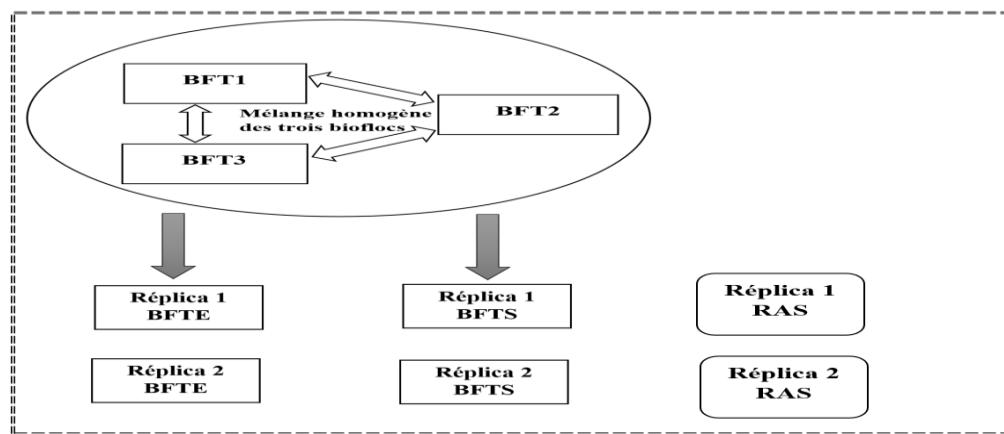


Figure 7 : Schéma explicatif du dispositif expérimental.

Le traitement témoin (RAS) est constitué de deux bacs sub-carrés de 300 litres chacun alimenté en eau en circuit fermé. Les poissons de ce traitement sont nourris avec un aliment contenant 37% de protéines brutes et 10% de lipides bruts (Coppens, Pearl EF 3 mm) à une ration journalière moyenne de 2% de leur biomasse totale. La ration de ce traitement a été considérée comme la ration normale à partir de laquelle les rations des poissons des deux autres traitements sont fixées.

Le traitement BFTS est constitué de deux bacs rectangulaires de 250 litres chacun. Dans ce traitement, la ration journalière des poissons est fixée à 80% de celle du RAS. Selon Avnimelech et *al.* (1994), dans les systèmes BFT, la ration alimentaire du tilapia pourrait être diminuée de 20% par rapport à la ration normale. Sur cette base nous avons considéré que les 20% de la ration manquante dans le traitement BFTS sont apportés par le biofloc produit dans les bacs après la décomposition par les bactéries des déchets des poissons et des aliments non consommés.

Le traitement BFTE est constitué de deux bacs rectangulaires de 250 litres chacun. Dans ce traitement, la ration journalière des poissons est fixée à 50% de celle du RAS. 20% manquant de la ration sont considérés comme compensés par le biofloc. Les 30% manquant de la ration sont apportés sous forme d'enrichissement du biofloc par des boues issues des effluents d'un système aquaponique élevant des sandres.

Chacun des bacs des trois traitements est mis en charge avec 15 poissons d'un poids corporel moyen de $163,3 \pm 54,3$ g ($12,23$ kg/m³ de poissons par bac).

Dans les traitements BFTS et BFTE, des quantités variables d'eau neuve sont apportées épisodiquement dans les bacs pour compenser les pertes par évaporation et lorsque la concentration de floc dépasse les limites fixées entre 25-50 ml/l pour le tilapia (d'après Hargreaves, 2013). Trois aérateurs sont installés dans chaque bac afin d'assurer un bon niveau d'oxygénation (> 4 mg/l).

2.2.2. Quantité de matières sèches apportées au BFTE sous forme d'effluents

L'estimation de la quantité journalière de matières sèches (MES) apportées au BFTE s'est faite en considérant qu'un kg d'aliment consommé par les poissons produit environ 250 g de MES (Timmons et Ebeling, 2007) et que celles-ci sont utilisées sous forme de biofloc par les poissons après leur transformation par les bactéries présentes dans le milieu d'élevage. La quantité de MES ainsi produite et utilisée sous forme de biofloc par les poissons représente environ 20% de la ration normale selon Avnimelech et *al.* (1994). La quantité de MES produite après consommation d'une quantité d'aliment est déterminée par la formule suivante :

$$\text{Quantité MES produit (g)} = \frac{\text{quantité aliment consommé (g)}}{1000 \text{ g}} * 250\text{g}$$

Etant donné que les MES produites sont consommées par les poissons sous forme de biofloc (estimé à environ 20% de la ration normale), la quantité totale d'aliment consommé par jour par les poissons du BFTS (QBFTS) est estimée à partir de la formule suivante :

QBFTS= Quantité d'aliment distribué + MES produite.

- Quantité d'aliment distribué : représente 80% de la ration des poissons du RAS ;
- Quantité MES produite : est issue de la consommation des aliments. Elle est estimée à 20% de la ration du RAS.

La quantité totale d'aliment consommé par jour par les poissons du BFTE (QBFTE) est donc :

QBFTE = Quantité aliment distribué + MES produite + MES des effluents.

La quantité de MES à apporter dans le BFTE sous forme d'effluents aquaponiques est :

Quantité MES effluents = Ration du RAS – (aliment distribué dans BFTE + MES produite après consommation des aliments).

Aliment distribué = 50% de la ration RAS et MES produite = 20% de la ration du RAS.

L'équivalence en volume de la quantité de MES à apporter au BFTE sous forme d'effluents concentrés est déterminée par la formule suivante :

$$\text{Vol. effluents concentrés à apporter} = \frac{\text{quantité MES effluents à apporter}}{\text{concentration MES dans effluents}}$$

2.2.3. Collecte des effluents et caractérisation de leurs matières sèches

Les effluents sont collectés au niveau de l'unité aquacole du système d'aquaponie de Strée relevant du CERER-Pisciculture en fonction des besoins en MES au niveau du BFTE. Trois collectes de 24 h ont été initialement effectuées afin d'estimer la quantité moyenne d'effluents produite par jour ainsi que la quantité moyenne journalière de matières sèches.

L'estimation des quantités de MES des effluents non décantés et des boues décantées est chaque fois effectuée sur des échantillons respectifs de 25 ml et 2 ml en duplicita en utilisant la méthode standardisée sur la séparation des MES de l'eau par filtration (American Public Health Association, 2005). Cette méthode consiste à peser les filtres avant et après filtration de l'échantillon pour déterminer la quantité de MES. Les filtres utilisés sont des membranes filtrantes en fibre de verre Whatman 934-AH de 47 mm de diamètre et 0,45 µm de porosité. Après filtration, les filtres et leurs contenus sont séchés à l'étuve à 105°C pendant 2 heures puis refroidis dans un dessicateur (contenant du gel de silice) pendant 10 minutes environ. Une fois refroidis, les filtres sont pesés à l'aide d'une balance analytique (balance OHAUS, 210 g ± 0,1mg). La différence entre le poids des filtres avant (Pi) et après (Pf) filtration et séchage

correspond à la quantité de MES contenue dans l'échantillon filtré. La quantité de MES estimée dans les échantillons est ramenée au litre selon la formule suivante :

$$\text{Concentration MES (mg/L)} = \frac{\text{Pf (mg)} - \text{Pi (mg)}}{\text{V (L)}}$$

Les productions totales journalière (g/jour) et annuelle (g ou kg/an) de MES des effluents sont estimées à partir du volume moyen total d'effluents collecté en 24 h :

Production journalière MES = Vol. journalier d'effluents * concentration MES.

Production annuelle MES = Production journalière MES * 365 jours.

2.2.4. Estimation de la quantité de carbone apportée sous forme de sucre

La quantité journalière de sucre apporté sous forme de sirop de riz (Natu-Rice 35-75 bx) aux deux traitements BFT pour un rapport C/N suffisant dans chaque bac est fixée à 600 g de sucre/kg d'aliment distribué soit 60% de la ration journalière des poissons du BFTS. Les lots en BFTE reçoivent la même quantité de substrat carboné que le BFTS. Cette proportion est fixée en tenant compte de celle proposée par Hargreaves (2013) qui se situe entre 500 g à 1 kg de sucre par kg d'aliment contenant 30 à 38% de protéines brutes.

Tableau 7 : Synthèse des conditions expérimentales.

Traitements	RAS	BFTS	BFTE
Biomasse initiale (kg)	2450	2450	2450
Densité initiale (kg/m ³)	12,23	12,23	12,23
Ration alimentaire (%)	100	80	50
Proportion d'aliment fourni par le biofloc (% ration RAS)	0	20	20
Apport de MES d'effluents (% de ration RAS)	0	0	30
Quantité de sucre apporté (% ration BFTS)	0	60	60

2.2.5. Suivi des paramètres des traitements

- **Suivi des paramètres physico-chimiques**

Au cours de l'expérimentation, les paramètres physico-chimiques des traitements sont mesurés à des fréquences différentes selon le type de paramètre. La température, l'oxygène dissous et le pH sont mesurés quotidiennement. La conductivité, l'alcalinité, les concentrations d'ammoniac, de nitrites, de nitrates, des matières en suspension totale et des flocs sont mesurées 2 fois par semaine. Les matières sèches des bioflocs de chaque bac sont quantifiées sur des échantillons de 25 ml en deux réplicas en utilisant la même méthode que celles des effluents aquaponiques. Les matières solides des bioflocs (flocs) ont été quantifiées en décantant un litre de biofloc de chaque bac dans un cône d'Imhoff (figure 8) pendant 30 minutes.



Figure 8 : Flocs décantés dans des cônes d'Imhoff.

– Suivi des paramètres zootechniques des poissons

Il consiste au suivi quotidien de la ration alimentaire, des quantités d'effluents et de sucre apportés dans les bacs BFT et le nombre de poissons morts par bac. La mesure des poids des poissons est réalisée toutes les deux semaines. Tous les poissons d'un même bac sont capturés, comptés et pesés individuellement. Les longueurs totales de 50 poissons sont mesurées à la mise en charge et celles de tous les poissons à la fin de l'expérience. Les paramètres zootechniques calculés pour chaque traitement sont :

Le taux de survie (%) = $\frac{N_f}{N_i} * 100$. Avec **N_i** et **N_f** les nombres initial et final de poissons.

Le taux de croissance spécifique SGR (%/j) = $\frac{\ln P_f - \ln P_i}{T_f - T_i} * 100$

In est le logarithme népérien ; **P_f** et **P_i** sont les poids final et initial des poissons ; **T_f-T_i** la durée de l'expérience.

La ration totale (kg) = Σ rations distribuées aux poissons durant l'expérience

Le taux de conversion alimentaire (FCR) = $\frac{\text{ration totale distribuée}}{\text{gain de poids}}$

Le facteur de condition k = $\frac{P}{(L_t)^3} * 100$ Avec **P** et **L_t**, le poids et la longueur totale des poissons.

2.2.6. Saisie, traitement et analyse des données

Les données sont encodées dans un tableur Microsoft Excel 2016 qui a aussi servi à la réalisation des tableaux et des graphiques. L'effet des traitements sur les paramètres physico-chimiques et certains paramètres zootechniques des poissons comme les poids individuels, les longueurs et les facteurs de condition est évalué en comparant les moyennes de ces paramètres par l'analyse de variance à un facteur (ANOVA I) avec un seuil de 5%. L'utilisation de l'ANOVA I, est précédé d'un test de normalité de Shapiro-Wilk et d'un test d'homogénéité des variances de Hartley pour vérifier la distribution normale des données et l'homogénéité des variances des paramètres. Le test de comparaison des moyennes de Scheffé est utilisé pour identifier les traitements qui sont différents dans les cas où l'ANOVA I montre l'existence de différence significative. Le test de t de Student au seuil de 5% est utilisé pour vérifier l'absence de différences statistiques entre les répliques d'un même traitement (pour les poids individuels et les longueurs totales des poissons) afin de les regrouper au cas où il n'y a pas de différences.

III. RESULTATS

3.1. Caractérisation des effluents d'aquaponie

La production moyenne journalière d'effluents non décantés est estimée à 518,17 l avec une concentration moyenne en matières sèches de 0,22 g/l (tableau 8). Après décantation, la concentration moyenne en MES est $14,2 \pm 1,6$ g/l avant ajout au BFTE.

Tableau 8 : Productions moyennes et concentrations d'effluents et de boues décantées.

Paramètres	Effluents non décantés	Boues décantées
Production moyenne journalière (l)	518,7	18,6
Concentration moyenne en MES (g/l)	0,22	14,2
Production moyenne journalière de MES (kg)	0,11	0,3
Production moyenne annuelle de MES (kg)	40,75	96,4

3.2. Paramètres physico-chimiques des traitements

Les températures des trois traitements ont évolué entre 24 et 29°C et celle du local dans lequel sont installés les systèmes d'élevage entre 28 et 32°C (figure 9 A). Quant aux taux d'oxygène dissous des trois traitements, ils sont compris entre 6 et 9 mg/l (figure 9 B). Pour ces deux paramètres, l'ANOVA I ne montre pas de différences significatives entre les trois traitements (tableau 9). La concentration de NH_4^+ du RAS est restée en dessous de 1 mg/l et celles des traitements BFT sont passées en dessous de 1 mg/l vers le 16^{ème} jour (J16) après la mise en charge pour le BFTE et à partir du 20^{ème} jour (J20) pour le BFTS (figure 9 C). La concentration de NO_2^- (figure 9 D) du RAS est restée inférieure à 0,5 mg/l durant l'expérimentation et celles des BFT sont passées d'environ 3 mg/l à la mise en charge pour se stabiliser entre 0,5 et 1,5 mg/l à partir du 8^{ème} jour (J8). L'ANOVA I montre que les concentrations de NH_4^+ et NO_2^- du RAS sont significativement différentes de celles des BFT (tableau 9).

La concentration en NO_3^- (figure 9 E) du RAS (avec une moyenne de $30,1 \pm 27,8$ mg/l) a diminué pour se stabiliser en dessous de 20 mg/l vers J16 pendant que celles des traitements BFT ont en général augmenté avec le temps bien que des baisses soient constatées entre le 36^{ème} et le 40^{ème} après la mise en charge. Les concentrations maximales de NO_3^- atteintes dans les traitements BFT sont de 143,1 mg/l et 99 mg/l respectivement pour le BFTS et le BFTE.

Quant au pH dans les trois traitements, il est resté globalement entre 7 et 8,5 (figure 9 F).

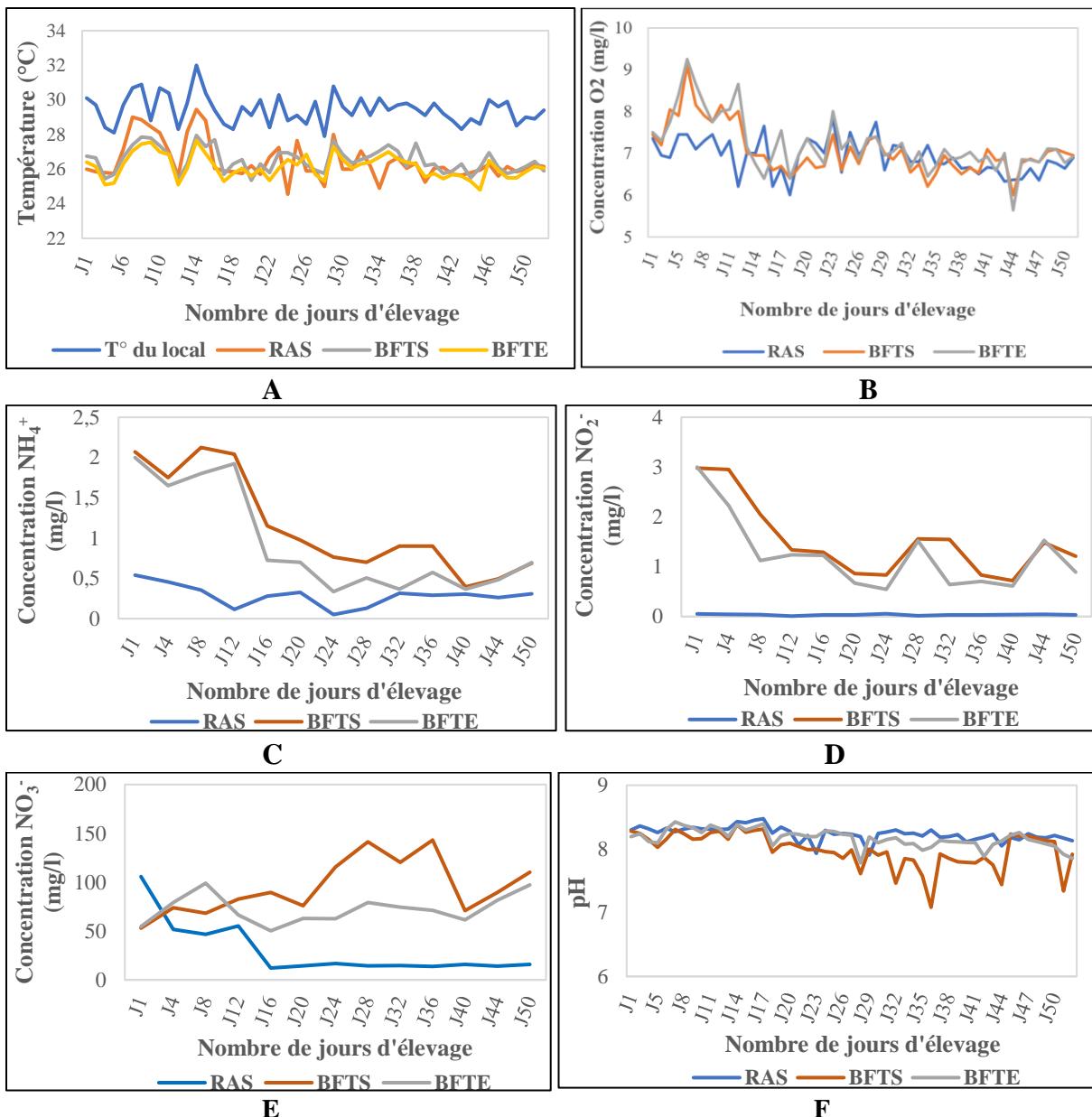


Figure 9 : Evolution des paramètres physico-chimiques des traitements en fonction du temps (**A** = température ; **B** = oxygène dissous ; **C** = NH₄⁺ ; **D** = NO₂⁻ ; **E** = NO₃⁻ et **F**=pH).

L'alcalinité (CaCO₃) du RAS varie entre 221,5 mg/l et 259 mg/l et entre 50 mg/l et 150 mg/l dans les deux traitements BFT même si des valeurs proches de 200 mg/l sont observées au 4^{ème} jour (J4) après la mise en charge (figure 10 A).

La conductivité du RAS est restée autour de 800 $\mu\text{s}/\text{cm}$. Les valeurs maximales de conductivité atteintes sont d'environ 1200 $\mu\text{s}/\text{cm}$ et 1000 $\mu\text{s}/\text{cm}$ respectivement dans le BFTS et le BFTE avec des minima d'environ 900 $\mu\text{s}/\text{cm}$ (figure 10 B).

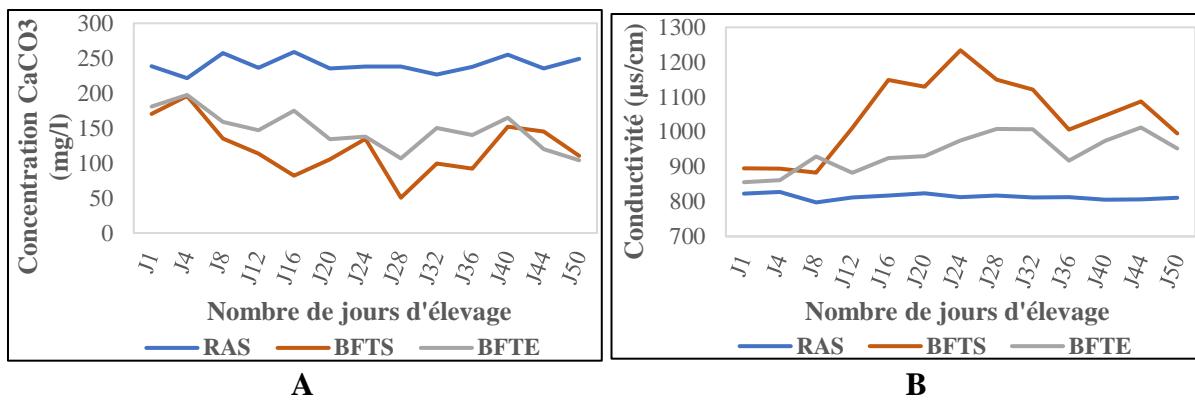


Figure 10 : Evolution de l'alcalinité (**A**) et de la conductivité électrique (**B**) des traitements en fonction du temps.

Les volumes de floc (FV) sont globalement en dessous de 50 ml/l dans les deux traitements BFT avec des valeurs supérieures à 50 ml/l observées dans le BFTE au 8^{ème} et au 24^{ème} jours (figure 11 A). Les concentrations des matières en suspension (TSS) (figure 11 B) évoluent dans le même sens que celles des FV.

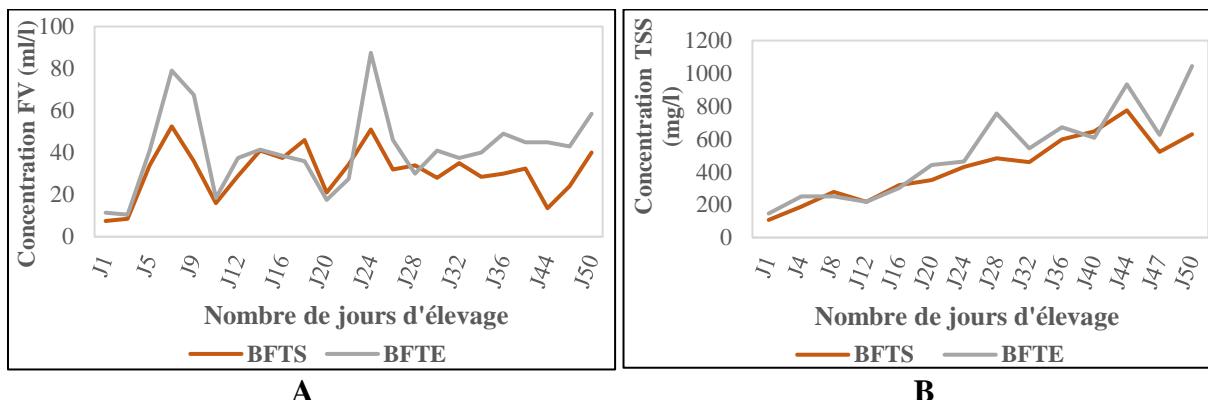


Figure 11 : Evolution des concentrations de flocs (**A**) et des matières en suspension (**B**) des traitements BFT en fonction du temps.

Tableau 9 : Valeurs moyennes des paramètres physico-chimiques des trois traitements.

Paramètres	RAS	BFTS	BFTE	P value
T(°C)	26,4±1,1 ^a	26,5±0,7 ^a	26,1±0,7 ^a	0,11
O ₂ (mg/l)	6,9±0,4 ^a	7,1±0,6 ^a	7,2±0,7 ^a	0,10
NH ₄ ⁺ (mg/l)	0,2±0,1 ^a	1,2±0,6 ^b	0,9±0,6 ^b	0,02
NO ₂ ⁻ (mg/l)	0,04±0,01 ^a	1,4±0,7 ^b	1,2±0,7 ^b	0,01
NO ₃ ⁻ (mg/l)	30,1±27,8 ^a	94,9±28,7 ^b	72,3±14,9 ^{ab}	0,04
pH	8,2±0,1 ^a	8±0,3 ^a	8,2±0,1 ^a	0,08
CaCO ₃ (mg/l)	240,6±11,4 ^a	122,5±38,9 ^b	147,9±9 ^b	0,03
Conductivité (µs/cm)	814,0±8,6 ^a	1050,8±115,1 ^b	939,8±56,0 ^c	0,02
FV (ml/l)		31,0±11,3 ^a	41,3±19,0 ^a	
TSS (mg/l)		429±195,3 ^a	518,1±274,0 ^a	

Les lettres **a**, **b** et **c** correspondent aux différences significatives observées, entre les traitements

3.3. Paramètres zootechniques des poissons

3.3.1. Quantités d'aliment, d'effluents aquaponiques, de sucre et d'eau utilisés

Les quantités d'aliment, d'effluents et de sucre utilisés au cours de l'expérimentation sont présentées dans le tableau 10 ci-dessous. Ces quantités varient d'un traitement à un autre.

Tableau 10 : Quantités d'aliment, de matières sèches apportées par les effluents, de sucre utilisés et d'eau apportée dans les traitements.

Paramètres	RAS	BFTS	BFTE
Quantité totale d'aliment distribué (g)	2009,0±17,3	1538,2±55,2	1035,1±0,0
Quantité totale de MES utilisée (g)			740,6±0,0
Volume d'effluents apportés (l)			83,3±0,0
Quantité totale de sucre (g)		937,8±12,1	976,2±0,0
Quantité totale d'eau neuve apportée (l)	1210,0±28,3	390,5±24,8	492,5±19,1
Proportion d'eau neuve journalière (%/j)	12,1±0,3	3,9±0,3	4,9±0,2

3.3.2. Paramètres de croissance des poissons

Les poids moyens des poissons varient de 163,3±54,3 g à la mise en charge à 289,6±14,4 g ; 246,9±26,4 et 234,4±4,2 g respectivement dans le RAS, le BFTS et le BFTE au 50^{ème} jour (figure 12 A). Les gains de poids moyens périodiques des poissons dans les trois traitements (figure 12 B) sont quasiment identiques pendant les deux premières semaines d'élevage (27,1±4,3 g pour le RAS ; 27,8±4,3 g pour le BFTS et 28,6±8,6 g pour le BFTE). Le gain de poids du RAS augmente de 27,1±4,3 g à J14 à 45,28±6,8 g puis diminue à 12,8±4,7 g entre J42 et J50. Ceux des BFT diminuent entre J14 et J28 puis augmentent légèrement entre J28 et J42 avant de diminuer entre J42 et J50.

Les SGR moyens périodiques (figure 12 C) suivent les mêmes tendances d'évolution que celles des gains de poids moyens périodiques. Leurs valeurs diminuent entre J14 et J28 dans les traitements BFT pendant que celle du RAS augmente. Les plus faibles SGR sont observés entre J42 et J50 dans tous les traitements.

Les FCR des traitements varient différemment en fonction du temps (figure 12 D). Celui du BFTE varie de 0,6±0,2 à J14 à 1,5±0,4 à J50. Dans le BFTS sa valeur augmente entre J14 et J28 puis se stabilise à 1,6±0,3 entre J28 et J42 avant de diminuer à 1,4 entre J42 et J50. Le FCR du RAS diminue entre J14 et J28 de 1,2±0,2 à 1,0±0,4 puis augmente à 1,6±0,6 à J50.

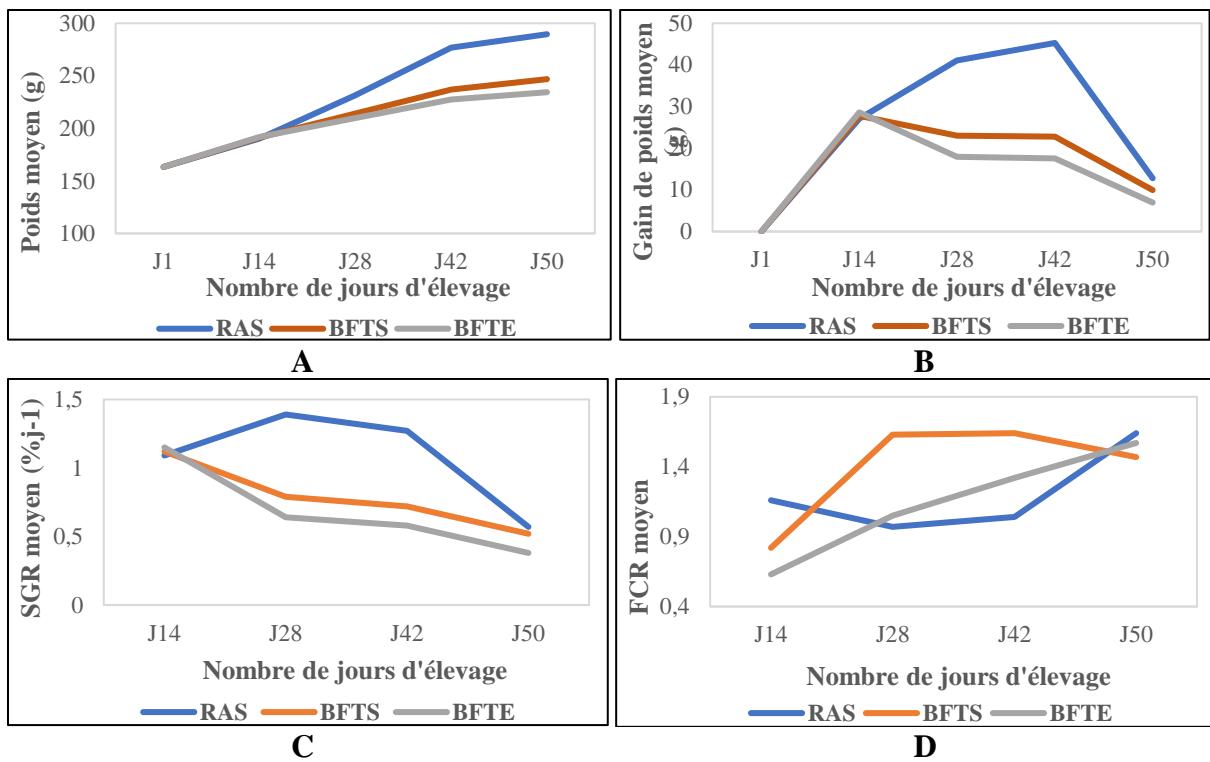


Figure 12 : Evolution du poids moyen (**A**), du gain de poids moyen (**B**), du SGR moyen (**C**) et du FCR moyen (**D**) des traitements en fonction du temps.

Le poids moyen final, le gain de poids moyen, le SGR moyen et le taux de production moyen du RAS sont supérieurs à ceux des deux traitements BFT (tableau 11). Mais l'ANOVA I au seuil de 5% suivi du test de comparaison des moyennes de Scheffé ne montre pas de différence significative ($P>0,05$) entre le RAS et le BFTS en ce qui concerne le poids moyen final. Il en est de même entre le BFTS et le BFTE bien que le poids moyen final du BFTS ($246,9\pm26,4$ g) soit supérieur à celui du BFTE ($234,4\pm4,2$ g). Cependant le test de Scheffé montre l'existence de différence significative ($P<0,05$) entre le poids final du RAS ($289,6\pm14,4$ g) et celui du BFTE. S'agissant du FCR, il est légèrement meilleur dans le BFTE ($0,9\pm0,0$) par rapport au RAS ($1,1\pm0,1$) et au BFTS ($1,3\pm0,4$).

Tableau 11 : Paramètres de croissance des poissons dans les traitements

Paramètres	RAS	BFTS	BFTE
Taux de survie (%)	100	100	100
Poids moyens final (g)	$289,6\pm14,4^a$	$246,9\pm26,4^{ab}$	$234,4\pm4,2^b$
Gain de poids (g)	$126,3\pm14,4$	$83,5\pm26,4$	$71,1\pm4,2$
SGR ($\%j^{-1}$)	$1,1\pm0,1$	$0,8\pm0,2$	$0,7\pm0,0$
FCR	$1,1\pm0,1$	$1,3\pm0,4$	$0,9\pm0,0$
Taux de production (kg/m ³ /an)	$69,1\pm7,9$	$45,7\pm14,5$	$38,9\pm2,3$

Les lettres **a** et **b** correspondent aux différences significatives observées entre les traitements.

3.3.3. Relations poids-longueurs et facteur de condition

Les valeurs moyennes de poids, de longueurs totales et de facteurs de condition sont présentées dans le tableau 12. L'ANOVA I au seuil de 5% indique que les valeurs moyennes finales de poids et de longueurs totales des trois traitements sont significativement différentes ($P=0,02$) des valeurs à la mise en charge ($163,3\pm54,3$ g et $19,6\pm3,3$ cm). Aucune différence significative ($P=0,07$) n'existe entre les longueurs totales moyennes des trois traitements en fin d'expérience. Les facteurs de condition dans les trois traitements et à la mise en charge ne sont pas significativement différents ($P=0,1$).

Tableau 12 : Poids, longueurs totales et facteurs de condition moyens par traitements

Paramètres	Mise en charge	RAS	BFTS	BFTE
Poids (g)	$163,3\pm54,3^a$	$289,6\pm14,4^b$	$246,9\pm26,4^{bc}$	$234,4\pm4,2^c$
Longueur totale (cm)	$19,6\pm3,3^a$	$24,1\pm2,0^b$	$22,7\pm2,8^b$	$22,8\pm2,5^b$
Facteur de condition	$2,3\pm1,1^a$	$2,0\pm0,2^a$	$2,3\pm0,7^a$	$1,9\pm0,2^a$

Les lettres a, b et c correspondent aux différences significatives observées, entre les traitements.

Les figures 13 présentent les relations poids-longueurs des poissons à la mise en charge et à la fin de l'expérimentation dans les trois traitements. Le BFT et le RAS ont chacun un coefficient de régression $R^2 = 0,9$ et celui du BFTS est de 0,7. Il est d'environ 0,6 à la mise en charge. Les coefficients allométriques dans les trois traitements sont inférieurs à 3. Cependant ils ont été améliorés dans le RAS et le BFT passant de 1,4 à la mise en charge à 2,7 dans chacun des deux traitements. Celui du BFTS (1,8) est inférieur à ceux du RAS et du BFTE mais légèrement supérieur à celui à la mise en charge.

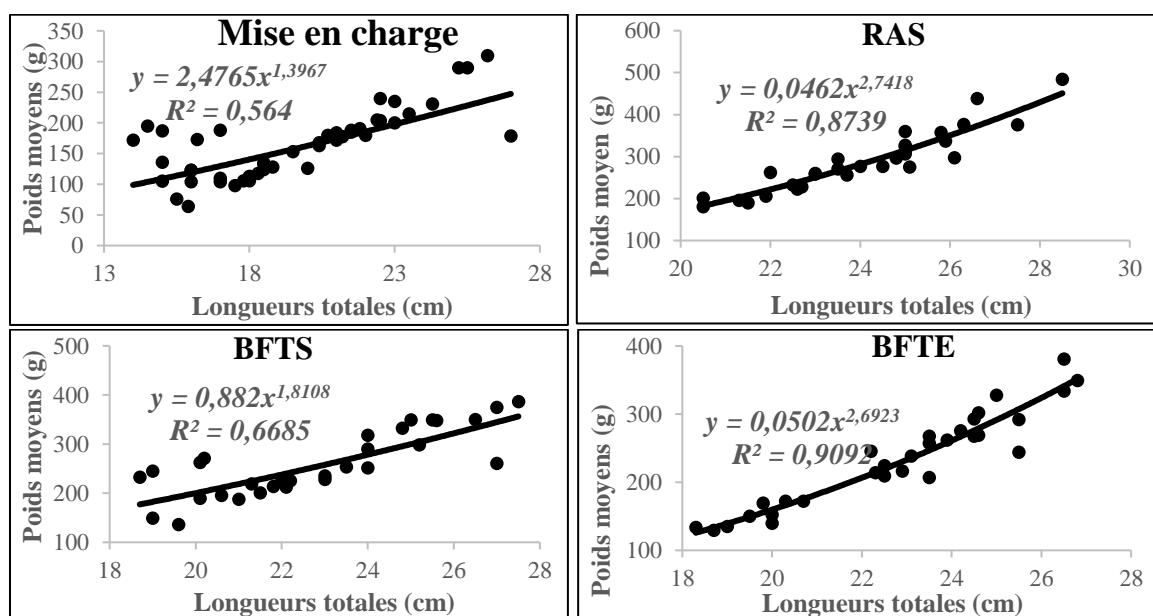


Figure 13 : Relations poids-longueur à la mise en charge et en fin d'expérimentation dans les trois traitements.

3.4. Estimation de la production de poisson à partir des effluents d'aquaponie

Le gain de biomasse moyen dans le BFTE (traitement avec 50% de réduction de la ration alimentaire normale) durant l'expérience est de 1,1 kg avec une quantité d'aliment utilisé de 1,04 kg. La quantité de matières sèches (issues des boues d'aquaponie) utilisée pour enrichir le BFTE est de 0,74 kg avec une quantité de sucre utilisé de 0,98 kg (tableau 13). La quantité totale annuelle de matières sèches des boues d'aquaponie estimée à 96,4 kg pourrait contribuer à la production d'environ 143 kg de poissons avec un apport en aliment d'environ 135 kg et une quantité de sucre estimée à environ 128 kg. En considérant une densité de poissons de 25 kg/m³, il faudra un volume d'élevage d'environ 6 m³ pour contenir la production estimée de poissons à partir des effluents d'aquaponie et un apport journalier d'eau neuve d'environ 283 litres. Les résultats de stimulations faites avec les deux autres traitements (BFTS et RAS) en utilisant les mêmes indicateurs que celui du BFTE sont présentés dans le tableau 13 ci-dessous.

Tableau 13 : Estimation de la production de poissons à partir de la production annuelle des effluents d'aquaponie et dimensionnement du volume d'élevage.

Paramètres	BFTE	BFTS	RAS
Volume d'élevage (l)	200	200	200
Durée de l'expérience (jour)	50	50	50
Résultats de l'expérimentation avec les traitements			
Quantité d'aliment utilisé (kg)	1,04	1,53	2,0
Quantité de matières sèches utilisées (kg)	0,74	0	0
Quantité de sucre utilisé (kg)	0,98	0,94	0
Quantité totale d'eau neuve apportée (l)	493	391	1210
Proportion journalière d'eau neuve apportée (%j ⁻¹)	4,93	3,91	12,1
Production de poisson (kg)	1,1	1,25	1,9
Production de poissons à partir de la production annuelle d'effluents d'aquaponie			
Quantité annuelle de matières sèches d'aquaponie (kg)	96,4		
Quantité d'aliment à apporter (kg)	135	216	270
Quantité de sucre nécessaire (kg)	128	128	0
Production de poissons possible (kg)	143	177	257
Dimensionnement du volume d'élevage et de la quantité d'eau neuve à apporter			
Densité considérée (kg/m ³)	25	29,5	42,9
Volume d'élevage nécessaire (m ³)	6	6	6
Quantité journalière d'eau neuve à apporter (l)	283	235	726

IV. DISCUSSION

4.1. Caractérisation des effluents du système d'aquaponie

La concentration des matières sèches dans les effluents est similaire à celle estimée par Declama (2020) (0,224 g/l) sur les effluents du même système d'aquaponie utilisant un tambour filtrant dont les mailles (60 µm) sont inférieures à celles présentes actuellement (100 µm). Cependant Les quantités annuelles d'effluents et de matières sèches estimées à partir des boues décantées (190 m³ et 96,4 kg) sont inférieures à celles obtenues par Declama (2020) qui étaient respectivement de 502 m³ et 112,5 kg. Ces diminutions seraient liées au changement de mailles (qui sont passées de 60 µm à 100 µm) du tambour filtrant du système d'aquaponie. En effet les mailles de 60 µm retiennent plus de matières solides que celles de 100 µm. Une autre raison de ces diminutions serait la différence entre les quantités d'aliment distribué aux sandres. En effet les quantités d'aliment distribué aux sandres pendant les prélèvements de MES par Declama (2020) sont trois supérieures à celles distribuées pendant les prélèvements dans le cadre de notre expérience.

4.2. Paramètres physico-chimiques des traitements

L'analyse des données sur les paramètres physico-chimiques montre l'absence de différences significatives entre les traitements pour certains paramètres (température, taux d'oxygène dissous, pH) et l'existence de différences significatives pour d'autres paramètres (NH₄⁺, NO₂⁻, NO₃⁻, conductivité, alcalinité). Mais de façon générale, ils sont restés dans les limites acceptables pour l'élevage d'*O. niloticus* (tableau 14) aussi bien dans le RAS que dans les bioflocs. Cela s'expliquerait par le fait que les paramètres d'élevage ont été bien contrôlées et maintenus semblables dans les différents traitements.

Tableau 14 : Valeurs optimales de paramètres physico-chimiques pour l'élevage d'*O. niloticus*.

Paramètres	Limites optimales de croissance	Références
Température (°C)	24-28	Lacoix (2004) ; El-Haroun et al. (2006) ; Day, et al. (2016)
Oxygène dissous (mg/l)	> 3	Kestemont et al. (1989)
pH	7-8	Alhassane, 2004
Alcalinité (mg/l CaCO ₃)	100-150	Hargreaves (2013)
NH ₄ ⁺ /NH ₃ (mg/l)	< 2	Malcolm et al. (2000)
NO ₂ ⁻	< 1	Balarin et Haller (1982) ; Malcolm et al. (2000)
FV (ml/l)	25-50	Hargreaves (2013)
TSS (mg/l)	200-500 et 1000 au maximum	Hargreaves (2013)

La valeur de l'alcalinité élevée dans le RAS serait liée au renouvellement continu d'eau avec de l'eau de puits qui est naturellement dure (teneur élevée en ions Ca²⁺ et Mg²⁺). En effet selon

Delloye et al. (2018) la plupart des eaux distribuées en région wallonne présentent une alcalinité (CaCO_3) élevée, pouvant atteindre 300 mg/l.

Les concentrations de flocs (FV) et des matières en suspension (TSS) font partie des caractéristiques importantes définissant la qualité d'un biofloc. En effet ces deux paramètres sont restés en moyenne dans les limites proposées par Hargreaves (2013) bien que des valeurs assez élevées soient enregistrées par moment (environ 90 ml/l pour les FV et 900 mg/l pour les TSS) dans le BFTE. Une situation similaire a été rapportée par Day (2016) qui a enregistré des concentrations de flocs et de matières en suspension respectives d'environ 240 ml/l et 900 mg/l lors de l'élevage de tilapia dans du biofloc en bassin.

4.3. Paramètres zootechniques des poissons

4.3.1. Quantités d'aliment, d'effluents d'aquaponie et de sucre utilisé

Les quantités d'aliment sous forme de granulés distribués aux poissons varient d'un traitement à un autre. Cette variation est d'une part due à la différence dans les rations journalières (100% pour le RAS, 80% pour le BFTS et 50% pour le BFTE) et d'autre part à l'augmentation différente de la biomasse avec le temps dans les différents traitements. Initialement, la quantité journalière de sucre ajouté dans chaque biofloc représentait 60% de la quantité d'aliment distribué dans le BFTS qui est considéré comme le biofloc standard (où la ration des tilapias est diminuée de 20% par rapport à la ration normale) comme recommandé par Avnimelech et al. (1994). La différence constatée dans les quantités totales moyennes de sucre apporté dans chaque traitement BFT serait liée à la variation de la quantité d'aliment consommé par les poissons. En effet, dans le BFTS, certains jours, les poissons n'ont pas consommé la totalité de leur ration entraînant donc la diminution de la quantité de sucre à ajouter dans ce biofloc. D'où la diminution de la quantité totale moyenne de sucre apporté dans le BFTS par rapport à celle apportée dans le BFTE. La non-consommation de toute la ration dans le BFTS serait en partie due à une hétérogénéité de taille des poissons constatée à travers le coefficient de variation assez élevé (environ de 30%) dans ce traitement par rapport aux autres traitements (25% dans le RAS et 25,7 dans le BFTE). L'hétérogénéité de taille aurait joué en défaveur des poissons dominés dans la prise alimentaire. Une autre explication de la non-consommation de la totalité des rations par moment serait liée aux comportements de reproduction constatés chez les poissons de certains bacs étant donné que l'élevage s'est fait avec des mélanges d'individus mâles et femelles. L'apport de boues dans le BFTE a par moment augmenté excessivement les concentrations de flocs et de matières en suspension. Des ajouts d'eau ont été alors effectués pour ramener ces concentrations à des niveaux acceptables. C'est ce qui traduit le fait que la

quantité totale moyenne d'eau apportée au BFTE est supérieure à celle du BFTS. En dehors de ces cas, l'eau était apportée dans les bioflocs pour compenser à hauteur de 1% du volume d'élevage les pertes journalières par évaporation estimées entre 0,5 et 1% par Hargreaves (2013). De façon générale, les quantités d'eau utilisées dans les bioflocs sont environ 2,5 fois inférieures à celle utilisée dans le RAS. Cela montre que l'utilisation du biofloc pour la production piscicole contribue à la réduction de la consommation d'eau et à la gestion durable des ressources en eau (Hargreaves, 2013 ; Sorgeloos, 2014 ; Abduljabbar, 2015; Bossier et Ekasari, 2017).

4.3.2. Paramètres de croissance des poissons

L'absence de mortalité dans les traitements BFT malgré qu'ils soient chargés en matières solides et qu'ils aient des taux de nourrissage inférieurs à celui du RAS, pourrait s'expliquer par le maintien dans ces traitements, des conditions physico-chimiques compatibles avec le bien-être de *O. niloticus*. Dans le même sens, Suresh et Lin (1992) et Widanarni et al. (2012) ont rapporté qu'à densités égales, les taux de survie des tilapias élevés dans du biofloc et dans un RAS étaient sensiblement égaux si toutefois les paramètres physico-chimiques du biofloc sont maintenus dans les limites tolérables pour l'espèce. Des taux de survie de 100% sont aussi enregistrés par Amzi et Little (2008) après avoir élevé dans des bioflocs pendant 12 semaines deux lots de tilapias dont un lot était nourri avec un aliment contenant 35% de protéines brutes et l'autre avec un aliment contenant 24% de protéines brutes. Ces auteurs ont aussi noté que le biofloc réduirait l'effet du stress que pourrait subir les poissons pendant le cycle d'élevage et améliorerait le système immunitaire des poissons selon Abduljabbar et al. (2015).

La faiblesse du gain de poids moyen, du SGR et du taux de production enregistrés dans le BFTE par rapport au RAS et au BFTS serait en partie liée à la faible quantité d'aliment apporté aux poissons de ce traitement par rapport aux deux autres traitements. En effet, malgré l'apport de boues d'aquaponie pour enrichir le BFTE afin d'accroître la production de la biomasse microbienne consommable par les poissons, le poids moyen de ces derniers a augmenté mais est resté inférieur à ceux des autres traitements. Cela pourrait s'expliquer par le faible apport nutritif des boues qui serait dû à leur faible teneur en éléments nutritifs (azote notamment) transformables par les bactéries hétérotrophes pour produire la biomasse microbienne malgré l'ajout régulier de sucre. Cette hypothèse semble être confirmée par le taux de conversion alimentaire moyen dans le BFTE qui est de 0,9 (proche de 1) et non significativement différent de celui du RAS qui est de 1,1. Day et al. (2016) en élevant des tilapias dans du biofloc avec une ration (2,5% de la biomasse) inférieure à celle du RAS (6%) ont constaté une faible

amélioration des paramètres de croissance chez les poissons du biofloc par rapport à ceux du RAS. Cependant, le FCR dans le biofloc était meilleur que celui du RAS. L'amélioration des paramètres de croissance et de taux de conversion alimentaire chez des tilapias élevés dans du biofloc par rapport à ceux élevés dans un RAS rapportée par certains auteurs serait en partie liée à l'égalité des rations distribuées aux poissons des deux types de systèmes. C'est le cas de Luo et *al.* (2014) qui ont rapporté une amélioration des paramètres de croissance et du FCR chez des tilapias élevés dans du biofloc (avec une ration de 2% de leur biomasse) par rapport à ceux du RAS (nourris avec la même ration) après 87 jours d'élevage. Des résultats similaires à ceux de Luo et *al.* (2014) sont rapportés par Abduljabbar et *al.* (2015), en jouant sur le taux d'échange d'eau dans le biofloc tout en maintenant la ration identique à celle du traitement témoin qui n'est pas BFT, et par Amzi et Little (2008) en nourrissant des tilapias élevés dans du biofloc et ceux élevés dans de l'eau propre sans biofloc avec la même ration de 1,5% contenant 35% de protéine brute. Les FCR de nos traitements BFT sont meilleurs que ceux rapportés par Avnimelech (1999) qui sont de 2,62 et 2,17 chez deux lots de tilapias ayant un poids moyen initial de 112 g élevés pendant 51 jours respectivement en étangs sans biofloc (avec un aliment contenant 30% de protéines brutes à la ration de 2% de la biomasse) et en étangs avec biofloc (avec un aliment contenant 20% brutes à la ration de 2,6% de la biomasse). Cependant les SGR respectifs ($1,59$ et 2 \%j^{-1}) de ces lots de tilapias sont supérieurs à ceux de nos traitement BFT. En élevant deux autres lots de tilapias de poids moyen de 205 g dans les mêmes conditions que précédemment Avnimelech (1999) rapporte 2,62 et 2,02 comme étant les valeurs respectives de FCR et 1,63 et $2,22 \text{ \%j}^{-1}$ celles de SGR.

La forte baisse de gain poids moyens et de SGR moyens entre J42 et J50 serait liée à la durée d'élevage qui n'a pas atteint deux semaines comme les autres phases avant la pêche de contrôle. La réduction du temps d'élevage a impacté les quantités d'aliment distribué aux poissons qui représentent moins de 50% de celles qu'ils auraient consommés pendant deux semaines d'élevage. Cela confirmerait encore que la faible croissance observée dans le BFTE serait liée à la faiblesse de la ration dans ce traitement et que les poissons n'ont pas valorisé les boues d'aquaponie qui y étaient ajoutées de façon optimale.

4.3.3. Relation poids-longueur et facteur de condition

Les valeurs positives élevées de coefficients de régression observées dans le BFTE et le RAS traduirait l'existence de fortes corrélations positives entre les poids et les longueurs totales des poissons de ces deux traitements. Autrement dit plus les poissons augmentent en poids, plus ils augmentent en longueur aussi. Ce qui n'est pas parfaitement le cas dans le BFTS car certains

poissons avec des poids élevés ont des longueurs totales inférieures à celles d'autres poissons qui ont des poids inférieurs.

Le facteur de condition (K) est important pour déterminer le degré relatif de robustesse des poissons et leur capacité relative à se nourrir (Mortuza et Al-Misned, 2013). Il peut être influencé par l'espèce, le sexe, l'âge et les conditions environnementales (Anyanwu et al., 2007). Les valeurs de K dans les trois traitements sont supérieures à 1. Selon Ayode (2011) ; Shahabuddin et al. (2015) un facteur de condition supérieur à 1 chez des poissons comme le tilapia suggère un bon état de santé du poisson. Donc les poissons de nos trois traitements étaient en bon état sanitaire durant l'expérimentation. Cela pourrait être l'une des raisons du taux de survie de 100% enregistré dans tous les traitements. Les valeurs de K dans le RAS ($2,0 \pm 0,2$) et le BFTE ($1,9 \pm 0,2$) sont similaires à celles rapportées par Vester (2017) lors de l'élevage de tilapias en RAS ($K = 2,1$) et en BFT ($K = 1,9$).

4.4. Production de poisson à partir des effluents d'aquaponie

La quantité de poisson qui pourrait être produite à partir de la quantité totale annuelle de matières sèches que produirait le système d'aquaponie à partir des effluents n'est pas assez différente de la quantité d'aliment qui devra être distribuée aux poissons sur la base de 50% la ration normale. Cela s'expliquerait par le fait que le FCR moyen déterminé dans le BFTE (0,9) est proche de 1. Cette valeur de FCR proche de 1 traduirait une très faible valorisation des boues (apportées dans le BFTE) par les poissons. Les résultats satisfaisants d'amélioration de la production de tilapia dans du biofloc rapportés par certains auteurs sont essentiellement dus à la fourniture de la ration normale aux poissons en plus du biofloc. En plus, dans le cadre de notre expérimentation l'absence d'un traitement où les poissons sont exclusivement élevés dans du biofloc enrichi avec les boues d'aquaponie sans aucun apport d'aliment exogène, ne permet pas de conclure sur la contribution des boues dans la croissance et l'amélioration de la production de poisson. Mais la réduction de la consommation d'eau et du coût d'investissement (absence de pompes et de biofiltres) dans le biofloc sont satisfaisantes par rapport au RAS même si le biofloc nécessite plus de main d'œuvre pour le suivi de son bon fonctionnement. Au vu de cette limite et du faible taux de production de poisson dans le biofloc enrichi avec les boues et où les poissons sont nourris avec 50% de la ration normale, il ne serait pas assez bénéfique d'initier à ce stade une telle production à grande échelle. Cependant la production pourrait être bénéfique si en plus de l'enrichissement du biofloc avec les boues, les poissons sont nourris avec une ration normale.

V. CONCLUSION

La valorisation des déchets d'aquaculture à travers le système BFT est un défi à relever afin de réduire les rejets d'effluents aquacoles dans l'environnement. L'objectif de ce travail était donc de valoriser les effluents d'aquaponie par la technique du biofloc. Pour cela, trois traitements différents (RAS avec 100% de ration, biofloc avec 80% de ration et biofloc enrichi avec des effluents d'aquaponie et 50% de ration) ont été utilisés pour évaluer les performances de croissance de *O. niloticus*.

La production journalière des effluents d'aquaponie est estimée à 518,17 litres avec une concentration en matières sèche de 0,22 g/l. Les boues concentrées issues de la décantation de cette production ont un volume moyen journalier de 18,6 l et concentration moyenne de matières sèches de 14,2 g/l.

Les paramètres physico-chimiques sont globalement restés dans les limites optimales de croissance de *O. niloticus*. Cependant les quantités totales d'eau apportée dans les traitements BFT sont environ 2,5 fois inférieures à celles du RAS. La quantité totale de matières sèches utilisées pour enrichir le BFTE est estimée à $740,6 \pm 0,0$ g correspondant à $83,3 \pm 0,0$ l de boues. Le taux de survie enregistré dans les trois traitements est de 100% avec un bon état sanitaire des poissons exprimé par des valeurs de $K > 1$. Le poids moyen final, le gain de poids moyen, le SGR et le taux de production sont en faveur du RAS et en défaveur du BFTE. Cependant le FCR est en faveur du BFTE avec une légère amélioration par rapport à ceux du RAS et du BFTS.

La quantité de poissons que pourrait produire l'enrichissement de biofloc avec la production annuelle de matières sèches des effluents d'aquaponie de Strée sur la base des résultats obtenus est estimée à 143 kg avec un volume d'élevage de 6 m³ (densité de 25 kg/m³), une quantité d'aliment de 135 kg, une quantité de sucre de 128 kg et un apport journalier d'eau neuve de 283 l.

Au vu des résultats obtenus sur la valorisation des effluents d'aquaponie pour la production de *O. niloticus* dans du biofloc et de l'importance de la gestion des effluents, il serait important de poursuivre l'expérimentation tout en mettant en place un traitement où les poissons seront élevés dans du biofloc enrichi avec les effluents sans aucun apport d'aliment extérieur. Cela permettra de conclure sur l'effet réel des effluents sur les performances de croissance des poissons. Il serait aussi judicieux que la poursuite de l'expérience puisse se faire avec des juvéniles de *O. niloticus* de taille homogène afin d'éviter tout phénomène de dominance pouvant impacter la prise alimentaire.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Abduljabbar A.A., Nour A.M., Srour T. El-bermawy N., Fayed W.A., Mansour A.T., 2015.** Intensive Nile Tilapia (*Oreochromis niloticus*) Production Under Biofloc Technology Systems. *Global Journal of Fisheries and Aquaculture Researches* 2 : 64-80.
- Ahdulrahaman A.K., 1997.** Food, size and condition of *Oreochromis niloticus* in Nigeria (Pisces : Cichlidae). *Revista de Biologia Tropical*, 655-58.
- Akinwole A.O., Dauda A.B., Ololade O.A., 2016.** Growth Performance of African Catfish (*Clarias gariepinus*) Juveniles Reared in Wastewater Treated with Alum and Moringa oleifera Seed. *Journal of Aquaculture & Research & Development* 7 : 12.
- Alhassane M., 2004.** Optimisation de la production d'alevins et de la croissance par le contrôle de la reproduction chez le Tilapia (Pisces, Cichlidae) *Oreochromis niloticus* (Linneaus, 1758) : cas des élevages en étangs et en cages flottantes dans la vallée du fleuve Niger au Niger. Thèse de doctorat de l'école pratique des hautes études du Niger, 92 p.
- Amoussou T.O., Toguyeni A., Toko I.I., Chikou A., Karim I.Y.A., 2016.** Caractéristiques biologiques et zootechniques des tilapias africains *Oreochromis niloticus* (Linnaeus, 1758) et *Sarotherodon melanotheron* Rüppell, 1852 : une revue ». *International Journal of Biological and Chemical Sciences* 10 (4) : 1869-87.
- Anyanwu P.E., Okoro B.C., Anyanwu A.O., Matanmi M.A., Ebonwu, B.I., Ayabu-Cookey I.K., Hamzat M.B., Ihumekpen F., Afolabi S., 2007.** Length-weight relationship, condition factor ans sex ratio of African mud catfish (*Clarias gariepinus*) reared in indoor water recirculating system tanks. Research, *Journal of Biological Science* 2 : 780-783.
- Arias-Moscoso J.L., Espinoza-Barrón L.G., Miranda-Baeza A.M-B.A., Rivas-Vega M.E., Nieves-Soto M., 2018.** Effect of commercial probiotics addition in a biofloc shrimp farm during the nursery phase in zero water exchange. *Aquaculture Reports* 11 : 47-52.
- Asaduzzaman M.M.A., Salam M.A., Wahab M.K., Rahman M.B., 2006.** Effects of control of C/N ratio by low-cost carbohydrate addition on water quality and pond ecology in freshwater prawn *Macrobrachium rosenbergii* post-larvae nursing system. *Bangladesh Journal of Fisheries Research* 10 (2) : 121-30.
- Avit J-B.L.F., BONY K.Y., Kouassi N.C., Konan K.F., Assemian O., Allouko J.R., 2012.** Conditions écologiques de production de fingerlings de *Oreochromis niloticus* (Linné, 1758) en association avec le riz WITA 12 en étang. *Journal of Applied Biosciences* 59 : 4271-85.
- Avnimelech Y., 2005.** Using the pond as a biofilter : review of theory and practice. *International Journal of Recirculating Aquaculture*, 6 : 1-12.

- Avnimelech Y., Kochba M., 2009.** Evaluation of nitrogen uptake and excretion by tilapia in bio floc tanks, using ^{15}N tracing. *Aquaculture* 287 : 163-168.
- Avnimelech Y., 1999.** Carbon/nitrogen ratio as a control element in aquaculture systems. *Aquaculture* 176 : 227-35.
- Avnimelech Y., Kochva M., Diab S., 1994.** Development of controlled intensive aquaculture systems with a limited water exchange and adjusted carbon to nitrogen ratio. Israeli *Journal of Aquaculture-Bamidgeh* 46 : 119-131.
- Avnimelech Y., 2007.** Feeding with microbial flocs by tilapia in minimal discharge bio-flocs technology ponds. *Aquaculture* 264 : 140-47.
- Ayode A.A., 2011.** Length-Weight relationship and diet of african Carp *Labeo ogunensis* (Boulenger, 1910) in Asejire lake Southwestern Nigeria. *Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*. 6 : 472-478.
- Azaza M.S.F., Mensi F., Toko I. I., Dhraief M.N., Abdelmoula A., Brini B., Kraiem M.M., 2006.** Effets de l'incorporation de la farine de tomate dans l'alimentation du tilapia du nil (*Oreochromis niloticus*, Linnaeus, 1758) en élevage dans les eaux géothermales du sud Tunisien. *Bulletin de l'Institut national des sciences et technologies de la mer (INSTM)*, 33, p. 47-58.
- 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.
- Balirwa J.S., 1998.** *Lake Victoria Wetlands and the Ecology of the Nile Tilapia, Oreochromis Niloticus Linné*. Rotterdam ; Brookfield, VT, USA, 247 p.
- Bamba Y., Ouattara A., Moreau J., Gourène G., 2007.** Apports relatifs en nourritures naturelle et artificielle dans l'alimentation du tilapia *Oreochromis niloticus* en captivité. *Bulletin français de la pêche et de la pisciculture*, 386 : 55-68.
- Balarin J.D., Haller R.D., 1982.** La culture intensive du tilapia dans les réservoirs, les raceways et les cages *in Aquaculture, vol. 1*. Croom Helm, Londres.
- Barnabé G., 1978.** Utilisation des chaînes alimentaires naturelles et du recyclage des eaux usées dans la production à grande échelle de juvéniles pour l'aquaculture. In *Colloque national « ECOTRON » -Mécanismes et contrôle de la production biologique marine–Systèmes clos artificiels, écosystèmes littoraux–Brest, France*, Actes du colloque n°7 pp 221 à 238.
- Barriga-Sosa I.D.L.A., Jiménez-Badillo M.D.L., Libnez 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.

- Bergheim A., Brinker A., 2003.** Effluent treatment for flow through Systems and european environmental regulations. *Aquacultural Engineering* 27 (1) : 61-77.
- Blancheton J-P., Dosdat A., Paoli. J-M.D., 2004.** Minimisation des rejets biologiques issus d'élevages de poissons. *Aquaculture et environnement* 26 : 68-79
- Blancheton J-P., Bosc P., Hussenot J.M-E., D'Orbcastel E.R., Romain D., 2009.** Tendances pour la pisciculture européenne de demain : cages au large, systèmes en eau recirculée et systèmes intégrés. *Cahiers Agricultures* 18 (2-3) : 227-34.
- Ble M.C., Otchoumou K.A., Alla Y.L., KAUSHIK S.J., 2011.** Utilisation des farines végétales dans l'alimentation des poissons d'élevage en milieu tropical, 47p.
- Bossier P., Ekasari J., 2017.** Biofloc technology application in aquaculture to support sustainable development goals. *Microbial biotechnology* 10 (5) : 1012-16.
- Brazil B.L., Summerfelt S.T., 2006.** Aerobic treatment of gravity thickening tank supernatant. *Aquacultural Engineering* 34 (2) : 92-102.
- Burford M.A., Thompson P.J., McIntosh R.P., Bauman R.H., Pearson D.C., 2004.** The contribution of flocculated material to shrimp (*Litopenaeus Vannamei*) nutrition in a high-intensity, zero-exchange system. *Aquaculture* 232 : 525-37.
- Caipang C.M.A., Choo H.X., Bai Z., Huang H., Lay-Yag C.M., Lim J., 2015.** Small-scale production of biofloc using various carbon sources for the freshwater culture of tilapia, *Oreochromis Sp.* *International journal of the bioflux Society* 7 (1) : 9.
- Choo Han X., Caipang C.M.A., 2015.** Biofloc technology (BFT) and its application towards improved production in freshwater tilapia culture. *International journal of the bioflux Society*, 8 (3) : 5.
- Crab R., Lambert A., Defoirdt T., Bossier P., Verstraete W., 2010.** The application of bioflocs technology to protect brine shrimp (*Artemia franciscana*) from pathogenic *Vibrio harveyi*. *Journal of applied microbiology* 109 (5) : 1643-1649.
- Cripps S.J., Bergheim A., 2000.** Solids management and removal for intensive land-based aquaculture production systems. *Aquacultural Engineering* 22 (1) : 33-56.
- Daniel N., Nageswari P., 2017.** Exogenous probiotics on biofloc based aquaculture : A review. *Current agriculture research journal* 5 : 88-107.
- Dauda A.B., Ajadi A., Adenike S.T-F., Akinwole A.O., 2018.** Waste production in aquaculture : sources, components and managements in different culture systems. *Aquaculture and Fisheries* 4 (3) : 81-88.
- Day S.B., Salie K., Stander H.B., 2016.** A growth comparison among three commercial tilapia species in a biofloc system. *Aquaculture International* 24 (5) : 1309-22.

Decamp O., Conquest L., Cody J., Forster I., Tacon A.G.J., 2008. Effect of shrimp stocking density on size-fractionated phytoplankton and ecological groups of ciliated protozoa within zero-water exchange shrimp Culture Systems. *Journal of the World Aquaculture Society* 38 (3) : 395-406.

Declama E., 2020. *Valorisation des effluents d'une production aquaponique de sandres par la technologie biofloc.* Travail de fin d'étude de Master de spécialisation en gestion des ressources aquatiques et aquaculture, Université de Liège, 39 p.

De Schryver P., Crab R., Defoirdt T., Boon N., Verstraete W., 2008. The basics of bioflocs technology : The added value for aquaculture. *Aquaculture* 277, 125-137.

Delloye F., Hanon M., Rouelle A., 2018. Qualité des eaux distribuées par le réseau public en Wallonie. Cinquième révision, 11 p. http://environnement.wallonie.be/de/eso/eau_distribution.

D'orbcastel R., 2008. Optimisation de deux systèmes de production piscicole : biotransformation des nutriments et gestion des rejets, 144.

Ebeling J.M., Timmons M.B., 2012. Recirculating Aquaculture Systems. In *Aquaculture Production Systems*, 245-77.

El-Haroun E.R., Goda A.M.A-S., Kabir Chowdhury M.A., 2006. Effect of dietary probiotic Biogen® supplementation as a growth promoter on growth performance and feed utilization of Nile tilapia *Oreochromis niloticus*. *Aquaculture Research* 37 (14) : 1473-80.

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.

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) : 1713-26.

Emerenciano M., 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*, édité par Hlanganani Tutu. InTech. pp 91-109.

Emerenciano M., Gaxiola G., Cuzon G., 2013. Biofloc technology (BFT) : a review for aquaculture application and animal food industry. *Biomass now-cultivation and utilization*, pp 301-328.

FAO., 2010. La situation mondiale des pêches et de l'aquaculture. 224p.

FAO., 2020. La situation mondiale des pêches et de l'aquaculture, 28 p.

- Fontenot, Q., Bonvillain, C., Kilgen, M., Boopathy, R., 2007.** Effects of temperature, salinity, and carbon : nitrogen ratio on sequencing batch reactor treating shrimp aquaculture wastewater. *Bioresource Technology* 98 (9) : 1700-1703.
- Foucard P., Tocqueville A., Gaumé M., Labbé L., Baroiller J-F., Lejolivet C., Darfeuille B., 2019.** Potentiel de développement de l'aquaponie en France : Le programme APIVA ® aquaponie innovation végétale et aquaculture. *Innovations agronomiques* 71, 385-400.
- Foucard P., Tocqueville A., Gaumé M., Labbé L., Baroiller J-F., Lejolivet C., Lepage S., Darfeuille B., 2015.** Tour d'horizon du potentiel de développement de l'aquaponie en France : présentation et regard critique sur cette voie de développement alternative pour les productions piscicoles et horticoles. *Innovations Agronomiques* 45 : 125-139
- Gichana Z.M., Liti D., Waidbacher H., Zollitsch W., Drexler S., Waikibia J., 2018.** Waste management in recirculating aquaculture system through bacteria dissimilation and plant assimilation. *Aquaculture International* 26 (6) : 1541-72.
- Goddek S., Joyce A., Kotzen B., Burnell G., Dos-Santos M., 2019.** Aquaponics and Global Food challenges *in Goddek S., Joyce A., Kotzen B., Burnell G* aquaponics food production systems : combined aquaculture and hydroponic production technologies for the future. Springer Open, pp 3-17.
- Green B.W., 2015.** Performance of a temperate-zone channel catfish biofloc technology production system during Winter. *Aquacultural Engineering* 64 : 60-67.
- Green B.W., Rawles S.D., Schrader K.K., Gaylord T.G., McEntire M.E., 2019.** Effects of dietary protein content on hybrid tilapia (*Oreochromis Aureus* × *O. niloticus*) performance, common microbial off-flavor compounds, and water quality dynamics in an outdoor biofloc Technology Production System. *Aquaculture* 503 : 571-82.
- Green B.W., Schrader K.K., Rawles S.D., Webster C.D., McEntire, M.E., 2020.** Comparison of Unused Water and Year-Old Used Water for Production of Channel Catfish in the Biofloc Technology System. *Aquaculture* 519 : 734-739.
- Hapsari F. 2016.,** The Effect of Fermented and Non Fermented Biofloc Inoculated with Bacterium *Bacillus Cereus* for Catfish (*Clarias gariepinus*) Juveniles 9 (2) : 6.
- Hargreaves J.A., 2013.** Biofloc production systems for aquaculture. Southern regional aquaculture center, publication N°. 4503, 11 p.
- Hari B., Kurup B.M., Varghese J.T., Schrama J.W., Verdegem M.C.J., 2006.** The effect of carbohydrate addition on water quality and the nitrogen budget in extensive shrimp culture systems. *Aquaculture* 252 (2-4) : 248-63.

Iga-Iga, R., 2008. Contribution à la mise au point d'aliments pour tilapia *Oreochromis niloticus* à base d'intrants locaux : cas du Gabon. Mémoire de Master sciences agronomiques et agroalimentaire spécialité sciences halieutiques et aquacole de l'institut de recherche agronomique et forestière du Gabon, 47p.

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) : 401-9.

Jauncey K., Ross B., 1982. A guid to tilapia feed and feeding. Institute of aquaculture, University of Stirling, Scotland. 111 p.

Kestemont P., Micha J.C., Falter U., 1989. Les méthodes de production d'alevins de *Tilapia nilotica*, ADCP/Rep/89/46. FAO, Rome, 132 p.

Khanjani M.H., Sajjadi M.M., Alizadeh M., Sourinejad I., 2017. Nursery performance of pacific white shrimp (*Litopenaeus vannamei* Boone, 1931) cultivated in a biofloc system : the effect of adding different carbon sources. *Aquaculture Research* 48 (4) : 1491-1501.

Kumar S., Anand P.S.S., De D., Deo A., D., Ghoshal, T., K., Sundaray, J., K., Ponniah, A., G., 2015. Effects of biofloc under different carbon sources and protein levels on water quality, growth performance and immune responses in black tiger shrimp *Penaeus monodon* (Fabricius, 1978). *Aquaculture Research* 48 (3) : 1168-82.

KUYPERS M., 2009. Impacts de l'aquaculture de saumon sur l'environnement et analyse des politiques de gestion. 81 p.

Luo G., Gao Q., Wang C., Liu W., Sun D., Li L., Tan H., 2014. Growth, digestive activity, welfare, and partial cost-effectiveness of genetically improved farmed tilapia (*Oreochromis niloticus*) cultured in a recirculating aquaculture system and an indoor biofloc system. *Aquaculture* 422 : 1-7.

Malcolm C., Beverdije H., McAndrew B., 200. Tilapias : biologie and exploitation. Institute of aquaculture. University of stirling, Scotland. *Kluwer Academic Publishers*, 185 p.

Marache L.M., 2001. *Méthanisation des effluents et déchets organiques : état des connaissances sur le devenir pathogène.* Thèse de docteur vétérinaire de l'école nationale vétérinaire de Toulouse. 152 p.

Martha P. H-V., Carlos I., P-R., Jorge A. 2014. Biofloc, a technical alternative for culturing malaysian prawn *Macrobrachium Rosenbergii*. In *sustainable aquaculture techniques*, édité par Martha Hernandez-Vergara, 88-97 p.

- Mashaii N.F., Mohammadi R.M., Sarsangi H., Bitaraf A., Hossein-Zadeh H., Sharif-Rohani M.S-R., 2016.** Reproduction of Nile tilapia, *Oreochromis niloticus* in brackish water. *Journal of Applied Aquaculture* 28 (1) : 1-8.
- Michaud L., Blancheton J.P., Bruni V., Piedrahita R., 2006.** Effect of particulate organic carbon on heterotrophic bacterial populations and nitrification efficiency in biological filters. *Aquacultural engineering* 34 (3) : 224-33.
- Miller, D., Semmens, K., 2002.** Waste management in aquaculture. *Aquaculture Information Series*. 1-12.
- Mortuza M.G., Al-Misned F., 2013.** Length-weight relationships, condition factor and sex-ratio of Nile tilapia, *Oreochromis niloticus* in Wadi Hanifah, Riyadh, Saudi Arabia. *World Journal of Zoology* 1 :106-109.
- Ouattara I.N., Iftime A., Antipa G., 2009.** Âge et croissance de deux espèces de cichlidae (pisces) : *Oreochromis niloticus* (Linnaeus, 1758) et *Sarotherodon melanotheron* Rüppell, 1852 du lac de barrage d'Ayamé (Côte d'Ivoire, Afrique de l'Ouest). *Travaux du muséum national d'histoire naturelle « Grigore Antipa »* Vol. LII : pp. 313–324.
- Piedrahita R.H., 2003.** Reducing the potential environmental impact of tank aquaculture effluents through intensification and recirculation. Management of aquaculture Effluents. *Aquaculture*, 226 (1) : 35-44.
- Poh Y.T., 2014.** Biofloc technology in shrimp farming : success and failure. *Aquaculture Asia Pacific Magazine* 10 : 13-16.
- Rakocy J.E., Masser M.P., Losordo T.M., 2006.** Recirculating aquaculture tank production systems : aquaponics-integrating fish and plant culture. *Southern regional aquaculture center Publication N°454*, 16 p
- Rostika R., 2014.** The reduction feed on shrimp vaname (*Litopenaeus vannamae*) replaced by the addition biofloc in Ciamis District. *Research journal of biotechnology* 9 : 29-35.
- Schneider O., Sereti V., Eding E.H., Verreth J.A.J., 2005.** Analysis of nutrient flows in integrated intensive aquaculture systems. *Aquacultural engineering* 32 (3-4) : 379-401.
- Shahabuddin A.M., Khan M.N.D., Saha D., Ayna E., Wonkwon K., Murray W.W., Yoshimatsu T., Araki T., 2015.** Length-weight relationship and condition factor of juvenile Nile Tilapia *Oreochromis niloticus* (Linnaeus 1758) fed diets with *Pyropia* spheroplasts in closed recirculating system. *Journal of Asian fisheries sciences* 28 :117-129.
- Shyne Anand P.S., Kohli M.P.S., Dam Roy S., Sundaray J.K., Kumar S., Sinha A., Pailan G.H., Sukham M.K., 2013.** Effect of dietary supplementation of periphyton on growth performance and digestive enzyme activities in *Penaeus Monodon*. *Aquaculture* 7 : 392-395.

- Siddik M.A.B., Nahar A., Ahamed F., Hossain M.Y., 2014.** Over-wintering growth performance of mixed-sex and mono-sex Nile tilapia *Oreochromis niloticus* in the northeastern Bangladesh. *Croatian Journal of Fisheries* 72 (2) : 70-76.
- Sorgeloos P., 2014.** Can aquaculture become the blue biotechnology of the future ? *Cahiers agricultures* 23 (1) : 53-64.
- Suresh A.V., Lin C.K., 1992.** Effect of stocking density on water quality and production of red tilapia in a recirculated water system. *Aquaculture* 11 :1-22.
- Timmons M.B., Ebeling J.M., 2007.** Recirculating aquaculture, 906 p.
- Tyson R.V., Simonne E.H., White J.M., Lamb E.M., 2004.** Reconciling water quality parameters impacting nitrification in aquaponics : the pH levels. In *Proceedings of the Florida State Horticultural Society*, 117 :79-83.
- Tyson R.V., Simonne E.H., Treadwell D.D., White E.M., Simonne A., 2008.** Reconciling pH for ammonia biofiltration and cucumber yield in a recirculating aquaponic system with perlite biofilters. *HortScience* 43 (3) : 719-24
- Vasava R.J., Hodar A.R., Elchelwar V.R., Deepak A.P., Patel K.M., Shrivastava V., Yusufzai S.I., Acharya P., Prabhakar P., 2020.** Biofloc technology: An innovative approach to zero-water exchange and tentative zero-feed system: A review. *Journal of Entomology and Zoology Studies*, 8 (2) : 1036-1040.
- Verster N., 2017.** Comparison of growth rates of tilapia species (*Oreochromis mossambicus* and *Oreochromis niloticus*) raised in a biofloc and a standard recirculating aquaculture (RAS) system, 79.
- Vijayan K.K., Panigrahi A., 2019.** Introduction to biofloc technology : Principles, prospects and challenges. *Training manual on biofloc technology for nursery and growout. Aquaculture*, 15 : 13-21.
- Webster C.D., Lim C., 2002.** *Nutrient requirements and feeding of finfish for aquaculture*. CABI. 440 p.
- Widanarni J., Ekasari J., Maryam, S., 2012.** Evaluation of biofloc technology application on water quality and production performance of red tilapia *Oreochromis sp.* Cultured at different stocking densities. *HAYATI journal of biosciences* 19 (2) : 73-80.