



Université Mohamed Khider de Biskra  
Faculté des Sciences Exactes et des Sciences de la Nature et de la Vie  
Département des Sciences Agronomiques

**Thèse pour l'obtention du diplôme de  
de doctorat troisième cycle**

**en Sciences Agronomiques**  
Option : Production végétale

Réf. : .....

---

Préparé par :

**BENAISSA Sarra**

# **Optimisation biotechnique d'une culture hydroponique intégrée à un élevage piscicole (Aquaponie)**

**Jury :**

<b>M. DEGHTOUCHE Kahramane</b>	Professeur	Université de Biskra	<b>Présidente</b>
<b>M. HADJEB Ayoub</b>	Professeur	Université de Biskra	<b>Rapporteur</b>
<b>M. MEHAOUA Mohamed Seghir</b>	Professeur	Université de Biskra	<b>Examineur</b>
<b>M. NOURANI Ahmed</b>	Directeur de recherche	CRSTRA	<b>Examineur</b>

**Année universitaire : 2023 – 2024**

## *Dédicaces*

*Afin d'être reconnaissante envers ceux qui m'ont appuyé et encouragé à effectuer ce travail de recherche, je dédie cette thèse:*

*À ma très chère mère Zahwa et à mon très cher père Ameer pour leur soutien moral, leur finance durant tout mon parcours scientifique, pour tous les sentiments d'affection et d'amour qui représentent pour moi le pilier de tous mes efforts.*

*À mon très cher époux qui n'a cessé de me combler par son amour et sa tendresse.*

*À ma très chère sœur et mes chers frères.*

*À tous les membres de ma famille et ma belle-famille sans aucune exception.*

## *Remerciement*

*Après avoir rendu grâce à Dieu, le tout puissant et le miséricordieux, par ces quelques lignes, je tiens à remercier toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin au bon déroulement de cette thèse, en espérant n'avoir oublié personne...*

Je tiens à remercier spécialement mon directeur de thèse **Pr HADJEB Ayoub**. Je vous remercie d'avoir bien assuré la direction et l'encadrement de mes travaux de thèse et d'avoir cru en mes capacités, pour le temps et la patience que vous m'avez accordés tout au long de ces années en me fournissant d'excellentes conditions logistiques. Je garderai dans mon cœur votre générosité, votre compréhension et votre efficacité. Pour tout ce que vous m'avez donné. J'ai beaucoup apprécié travailler à vos côtés tant sur le plan scientifique que sur le plan humain, je vous remercie très sincèrement.

Je tiens à remercier Madame DEGHNOUCHE, (Professeur) à l'université Mohamed Kheider Biskra pour l'honneur qu'elle m'a fait pour présider le jury de cette thèse.

Je remercie aussi Monsieur MEHAOUA, (Professeur) à l'université Mohamed Keider Biskra et Monsieur NOURANI (Directeur de recherche) au Centre de Recherche Scientifique et Technique sur les Régions Arides (CRSTRA) pour avoir accepté de juger le présent travail.

Je tiens aussi à remercier les deux étudiants de master Salsabil et Aymen pour leurs aides, et leurs contributions dans la réalisation de l'expérimentation.

Un grand merci à tous les enseignants et le personnel de département de sciences agronomiques qui ont contribué à ma formation et à la réalisation de l'expérimentation.

Merci très chaleureux enfin à ma famille. Merci du fond du cœur à mes parents et sans qui je ne serai probablement pas arrivée où je suis actuellement. Merci à mes parents qui m'ont encouragée depuis le début à avoir confiance en moi et m'ont soutenue tout au long de ces 4 années même au plus fort des tempêtes des blocus et des rédactions d'articles.

Merci tout particulièrement à mon époux pour sa présence, son soutien, sa patience et d'avoir supporté mon stress et mes sauts d'humeur durant la rédaction de cette thèse.

<b>INTRODUCTION</b> .....	1
<b>SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE</b> .....	7
1 L'aquaponie .....	8
1.1 Historique de l'aquaponie.....	8
1.2 Définition de l'aquaponie .....	10
1.3 Les principes de l'aquaponie .....	11
1.3.1 Présentation du système aquaponique à low-tech : .....	13
1.3.2 Bassins d'élevage des poissons .....	13
1.3.3 Les filtres mécaniques .....	14
1.3.4 Les filtres biologiques .....	16
1.3.5 Système hub et flow .....	17
1.3.6 Le réservoir de vidange .....	18
1.4 Les composantes hydroponiques .....	19
1.4.1 C'est quoi l'hydroponie ? .....	19
1.4.2 Les types de systèmes hydroponiques.....	20
1.5 Mouvement de l'eau dans le système aquaponique.....	26
1.6 L'aération dans le système aquaponique .....	27
1.7 L'aquaculture.....	28
1.7.1 Définition .....	28
1.7.2 Aperçu général sur la production des Tilapias : .....	29
1.8 Aquaculture en recirculation (RAS) .....	31
1.8.1 C'est quoi l'aquaculture en recirculation ?.....	31
1.9 Aperçue du Tilapia ( <i>Oreochromis niloticus</i> ) en aquaponie.....	32
1.10 Quantité de poissons dans les systèmes aquaponiques.....	34
1.11 Aperçue de la laitue ( <i>Lactuca sativa</i> ) en aquaponie.....	35
1.12 Cycle des nutriments en aquaponie .....	37
1.12.1 Source de nutriments .....	37

## Table des matières

1.12.2	Processus microbiologiques .....	39
1.13	Equilibre de masse : qu'arrive-t-il aux nutriments une fois qu'ils entrent dans le système aquaponique ? .....	41
1.13.1	Facteurs influençant les cycles de nutriments .....	SEGHIR 42
<b>MATÉRIELS ET MÉTHODES .....</b>		<b>43</b>
1	Présentation du milieu d'étude.....	44
2	Matériels biologiques.....	45
2.1	Le Tilapia ( <i>Oreochromis niloticus</i> ) .....	45
2.1.1	Exigences physico-chimiques .....	46
2.2	La laitue ( <i>Lactuca sativa</i> ) .....	47
3	Conception et fonctionnement du système aquaponique.....	48
3.1	La mise en place et démarrage de système aquaponique .....	48
4	Procédure de l'élevage .....	50
4.1	Préparations de bassins d'élevage .....	50
4.2	Stockage de poissons dans les bassins.....	50
4.3	Nourrissage des poissons et contrôles .....	51
5	Configuration de l'unité hydroponique NFT (escalier ou superposé) .....	51
5.1	Préparation de la pépinière .....	51
5.1.1	Test de germination des semences : .....	52
5.1.2	La pépinière :.....	52
5.2	Transplantation et mise en unités hydroponiques.....	53
6	Dispositif expérimental.....	53
7	Méthodes.....	54
7.1	Effet de la densité de stockage de Tilapia ( <i>Oreochromis niloticus</i> ) sur la qualité de l'eau dans un système aquaponic NFT .....	54
7.1.1	Paramètres de la qualité physicochimique de l'eau .....	54
7.2	Effet de la densité de stockage sur les performances de croissance du tilapia ( <i>Oreochromis niloticus</i> ) dans un système aquaponique .....	54

## *Table des matières*

7.2.1	Paramètres zootechniques de Tilapia .....	54
7.3	Effet de la densité de stockage du tilapia ( <i>Oreochromis niloticus</i> ) sur les performances de croissance de la laitue ( <i>Lactuca sativa</i> ) dans un système aquaponique....	56
7.3.1	Détermination des paramètres morphologiques et biochimiques de la laitue ....	56
8	Analyses statistiques .....	59
<b>RÉSULTATS ET DISCUSSIONS .....</b>		<b>60</b>
1	Effet de la densité de stockage de Tilapia ( <i>Oreochromis niloticus</i> ) sur la qualité de l'eau dans un système aquaponic NFT.....	61
1.1	Analyse physico-chimique des eaux.....	61
2	Effet de la densité de stockage sur les performances de croissance du tilapia ( <i>Oreochromis niloticus</i> ) dans un système aquaponique.....	63
2.1	Paramètres zootechniques de Tilapia .....	63
3	Effet de la densité de stockage du tilapia ( <i>Oreochromis niloticus</i> ) sur les performances de croissance de la laitue ( <i>Lactuca sativa</i> ) dans un système aquaponique .....	65
3.1	Paramètres morphologiques et biochimiques de la laitue .....	65
3.1.1	Test de germination des semences .....	65
3.1.2	Paramètres morphologiques .....	66
3.1.3	Paramètres biochimiques.....	70
1	Discussion :.....	73
1.1	Effet de la densité de stockage de Tilapia ( <i>Oreochromis niloticus</i> ) sur la qualité de l'eau dans un système aquaponic NFT .....	73
1.2	Effet de la densité de stockage sur les paramètres zootechniques du tilapia ( <i>Oreochromis niloticus</i> ) dans un système aquaponique .....	75
1.3	Effet de la densité de stockage du tilapia ( <i>Oreochromis niloticus</i> ) sur les performances de croissance de la laitue ( <i>Lactuca sativa</i> ) dans un système aquaponique....	77
<b>CONCLUSION.....</b>		<b>82</b>
<b>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....</b>		<b>85</b>

## **Liste des abréviations**

% : Pourcentage

°C : Degrés Celcius

µs : Micro simens

AFNOR : Association Française de Normalisation

CaCO : Carbonate de calcium

CO<sub>2</sub> : Dioxyde de carbone

DESA: Department of Economic and Social Affairs

DP : Densité de poissons

DWC : Deep Water Culture

EC : Electro- conductivité

FCFA : Franc de la Communauté Financière en Afrique

FAO: Food and Agriculture Organization of the United Nation

g : Gramme

GH : Dureté totale

ha : hectare

HR : Humidité relative

IBC : Intermediate Bulk Container

INSAE : Institut National de Normalisation

INRAB : Institut National de Recherche Agronomique du Bénin

Kg : Kilogramme

KH : Dureté carbonatée

KWH : Kilowattheure

L : Litre

LN: Logarithme Népérien

m : Mètre

m<sup>2</sup> Mètre carré

m<sup>3</sup> : Mètre cube

MAEP : Ministère de l'Agriculture de l'Elevage et de la Pêche

mg : milligramme

MS : Matière sèche

NFT : Nutrient Film Technique

## *Liste des abréviations*

NH<sub>3</sub> : Ammoniaque

NH<sub>4</sub><sup>+</sup> : Ion Ammonium

NO<sub>2</sub><sup>-</sup> : Nitrite

NO<sub>3</sub><sup>-</sup> : nitrate

O<sub>2</sub> : Dioxygène

OD : Oxygène Dissout

PEBD : Polyéthylène Basse Densité

pH : Potentiel hydronium Potentiel hydronium

PIB : Produit Intérieur Brute

PVC : Polychlorure de vinyle

RAS : Recirculating Aquaculture System

UN : United Nation

UV : Ultra-Violet

**Liste de figures**

Figure 1 : Production mondiale de l'aquaculture (1990-2022)

Figure 2 : Chinampas (jardins flottants) en Amérique centrale – la construction d'îles artificielles comme ancêtre de la technologie aquaponique.

Figure 3: le cycle symbiotique de l'aquaponie.

Figure 4 : Filter à tambour.

Figure 5 : filtre à sable

Figure 6: filtre à tourbillon

Figure 7: les types de bio-filtres utilisés en aquaponie

Figure 8 : Siphon de forme U

Figure 9 : un système hydroponique simple

Figure 10 : système hydroponique de type NFT.

Figure 11 : système hydroponique de type DWC.

Figure 12: système de lit de culture.

Figure 13 : système d'aquaculture en recirculation.

Figure 14 : Localisation géographique de la région de Biskra

Figure 15 : Diagramme schématique du système aquaponique et les directions du débit de l'eau.

Figure 16 : germination de semences de la laitue.

Figure 17 : la température de l'eau dans les bassins d'élevage avec les trois densités de stockage durant l'expérimentation.

Figure 18 : Évolution du poids (g) d'alevins de Tilapia élevés avec de la laitue (*Lactuca sativa*) dans un système aquaponique sous trois densités de stockage (1,5 kg/m<sup>3</sup>, 3 kg/m<sup>3</sup> et 4,5 kg/m<sup>3</sup>).

Figure 19 : Jeunes laitues prêts à transplanter aux unités hydroponiques NFT

Figure 20 : le poids frais moyen de la laitue à travers la densité de stockage.

Figure 21 : La biomasse fraîche de la laitue à travers la densité de stockage

Figure 22 : La hauteur des plantes dans un système aquaponique sous trois densités de stockage (1,5 kg/m<sup>3</sup>, 3 kg/m<sup>3</sup> et 4,5 kg/m<sup>3</sup>).

## *Liste de figures*

Figure 23 : la longueur des racines des laitues dans un système aquaponique sous trois densités de stockage ( $1,5 \text{ kg/m}^3$ ,  $3 \text{ kg/m}^3$  et  $4,5 \text{ kg/m}^3$ ).

Figure 24 : la surface foliaire de la laitue dans un système aquaponique sous trois densités de stockage ( $1,5 \text{ kg/m}^3$ ,  $3 \text{ kg/m}^3$  et  $4,5 \text{ kg/m}^3$ ).

Figure 25 : le taux de la matière sèche de la laitue dans un système aquaponique sous trois densités de stockage ( $1,5 \text{ kg/m}^3$ ,  $3 \text{ kg/m}^3$  et  $4,5 \text{ kg/m}^3$ ).

Figure 26 : taux de sucres soluble dans les laitues dans un système aquaponique sous trois densités de stockage ( $1,5 \text{ kg/m}^3$ ,  $3 \text{ kg/m}^3$  et  $4,5 \text{ kg/m}^3$ ).

Figure 27 : Le taux de Sodium, Calcium, Magnésium, et Potassium chez les plantes à travers les différentes densités de stockage ( $1,5$ ,  $3$  et  $4,5 \text{ Kg/m}^3$ ) au sein du système aquaponique.

**Liste des tableaux**

Tableau 1 : Caractéristiques de la qualité de l'eau du système aquaponique (moyenne  $\pm$  SD) à différentes densités de peuplement de *O. niloticus* (1,5 ; 3 et 4,5 kg/m<sup>3</sup>).

Tableau 2. Paramètres de croissance du tilapia (*O. niloticus*) dans le système aquaponique à différentes densités de stockage.

## Abstract

Aquaponics is a sustainable food production method that combines aquaculture and hydroponics, minimizing resource demand and environmental impact. This method is still in its early stages of adoption in Algeria, and its operations and basic principles are still largely unexplored to various fish and vegetable species. The present study intitled Technical optimization of hydroponic cultivation integrated into a fish farm (Aquaponics), aimed to determine the impact of an aquaponic system on the performance of the system in terms of fish and plant yields, and water quality in an arid region conditions, case of Biskra. in this sense, we carried out an experiment in order to evaluate the influence of fish stocking density on water quality and growth performance of the Nile Tilapia (*Oreochromis niloticus*) and Lettuce (*Lactuca sativa*) in an NFT aquaponic system under arid region conditions. Three fish stocking densities were established: 1.5 kg/m<sup>3</sup>, 3 kg/m<sup>3</sup>, and 4.5 kg/m<sup>3</sup>, each with three replicates. For each stocking density, we measured plant growth performance as well as fish growth. Furthermore, water quality parameters in both the fish and the vegetable tanks were monitored. The results showed that the production of lettuce significantly varied and increased with increasing stocking density as, 196.91±2.66, 205.14±12.27 and 250.74 ± 17.7 g for 1.5, 3 and 4.5 kg/m<sup>3</sup>, respectively. However, the final weight of Tilapia decreased when stocking density increased and was 55.97 ± 1.66, 34±1.98 and 27.35±1.97g for 1.5, 3 and 4.5 kg/m<sup>3</sup>, respectively. The pH was approximated to be neutral and fluctuated between 6.78 ±0.04 to 7.78 ±0.02. With increased stocking density, the dissolved oxygen declined and ranged from 3.39±0.49 to 5.56±1.27 mg/L in the fish tanks. The ranges of nutrient accumulation across the different stocking densities of Tilapia were: 0.033±0.004 - 0.038±0.003 mg/ L for total ammonium nitrate (TAN); 1.13±0.032-1.38±0.022 mg /L for nitrate and 0.01±0.001- 0.07±0.062 mg/ L for nitrite. Overall, the results showed that the medium stocking density of 3 kg/m<sup>3</sup>, which provided the best performance for the tested aquaponics system, is highly recommended.

**Keywords:** Optimization-aquaponics-biofilter-Tilapia-culture-recycling.

الأكوابونيك هي طريقة مستدامة لإنتاج الغذاء تجمع بين تربية الأحياء المائية والزراعة المائية، مما يقلل الطلب على الموارد والأثر البيئي. ولا تزال هذه الطريقة في المراحل الأولى من اعتمادها في الجزائر، ولا تزال عملياتها ومبادئها الأساسية غير مستكشفة إلى حد كبير بالنسبة لمختلف أنواع الأسماك والخضروات. تهدف الدراسة الحالية بعنوان التحسين التقني للزراعة المائية المدمجة مع تربية أسماك، إلى تحديد تأثير نظام الأكوابونيك على أداء النظام من حيث إنتاجية الأسماك والنباتات، ونوعية المياه في ظروف المنطقة القاحلة، حالة بسكرة. وبهذا المعنى، قمنا بإجراء تجربة لتقييم تأثير كثافة تربية الأسماك على جودة المياه وأداء النمو للبلطي النيلي (*Oreochromis niloticus*) والخس (*Lactuca sativa*) في نظام الزراعة المائية NFT في ظل ظروف المنطقة القاحلة. تم تحديد ثلاث كثافات تخزينية للأسماك: 1.5 كجم/م<sup>3</sup>، 3 كجم/م<sup>3</sup>، 4.5 كجم/م<sup>3</sup>، لكل منها ثلاث مكررات. لكل كثافة تخزين، قمنا بقياس أداء نمو النبات وكذلك نمو الأسماك. علاوة على ذلك، تم رصد معايير جودة المياه في كل من خزانات الأسماك والخضروات. أظهرت النتائج أن إنتاج الخس يتباين معنوياً ويزداد مع زيادة كثافة التربية حيث بلغ  $2.66 \pm 196.91$ ،  $12.27 \pm 205.14$  و  $17.7 \pm 250.74$  جم لـ 1.5، 3 و 4.5 كجم/م<sup>3</sup> على التوالي. ومع ذلك، انخفض الوزن النهائي للبلطي عند زيادة كثافة التربية وكان  $55.97 \pm 1.66$ ،  $1.98 \pm 34$  و  $1.97 \pm 27.35$  جم لـ 1.5، 3 و 4.5 كجم/م<sup>3</sup> على التوالي. تم تقريب الرقم الهيدروجيني ليكون محايداً ويتقلب بين  $6.78 \pm 0.04$  إلى  $7.78 \pm 0.02$ . مع زيادة كثافة التخزين، انخفض الأكسجين المذاب وتراوح من  $3.39 \pm 0.49$  إلى  $5.56 \pm 1.27$  ملجم / لتر في أحواض الأسماك. كانت نطاقات تراكم المغذيات عبر كثافات التخزين المختلفة للبلطي هي:  $0.004 \pm 0.033$  -  $0.003 \pm 0.038$  ملجم / لتر لإجمالي نترات الأمونيوم (TAN) ؛  $1.13 \pm 0.032$ - $1.38 \pm 0.022$  ملجم / لتر للنترات و  $0.01 \pm 0.001$  -  $0.07 \pm 0.062$  ملجم / لتر للنترت. بشكل عام، أظهرت النتائج أنه يوصى بشدة باستخدام كثافة تخزينية متوسطة تبلغ 3 كجم/م<sup>3</sup>، والتي قدمت أفضل أداء لنظام الأكوابونيك الذي تم اختباره.

**كلمات مفتاحية:** التحسين-الأكوابوني-الفانتر الحيوي-البلطي-استزراع-إعادة التدوير.

## Résumé

L'aquaponie est une méthode de production alimentaire durable qui combine l'aquaculture et la culture hydroponique, minimisant la demande en ressources et l'impact environnemental. Cette méthode en est encore à ses premiers stades d'adoption en Algérie, et ses opérations et principes de base sont encore largement inexplorés pour diverses espèces de poissons et de légumes. La présente étude intitulée Optimisation technique de la culture hydroponique intégrée dans une ferme piscicole (Aquaponie), visait à déterminer l'impact d'un système aquaponique sur les performances du système en termes de rendements en poissons et en plantes, et de qualité de l'eau dans des conditions de région aride, cas de Biskra. En ce sens, nous avons réalisé une expérience afin d'évaluer l'influence de la densité de peuplement en poissons sur la qualité de l'eau et les performances de croissance du tilapia du Nil (*Oreochromis niloticus*) et de la laitue (*Lactuca sativa*) dans un système aquaponique NFT dans des conditions de région aride. Trois densités d'empoisonnement ont été établies : 1,5 kg/m<sup>3</sup>, 3 kg/m<sup>3</sup> et 4,5 kg/m<sup>3</sup>, chacune avec trois répétitions. Pour chaque densité de peuplement, nous avons mesuré les performances de croissance des plantes ainsi que la croissance des poissons. De plus, les paramètres de qualité de l'eau dans les aquariums à poissons et à légumes ont été surveillés. Les résultats ont montré que la production de laitue variait de manière significative et augmentait avec l'augmentation de la densité de peuplement, soit  $196,91 \pm 2,66$ ,  $205,14 \pm 12,27$  et  $250,74 \pm 17,7$  g pour 1,5, 3 et 4,5 kg/m<sup>3</sup>, respectivement. Cependant, le poids final du Tilapia diminuait lorsque la densité de peuplement augmentait et était respectivement de  $55,97 \pm 1,66$ ,  $34 \pm 1,98$  et  $27,35 \pm 1,97$  g pour 1,5, 3 et 4,5 kg/m<sup>3</sup>. Le pH était considéré comme neutre et fluctuait entre  $6,78 \pm 0,04$  et  $7,78 \pm 0,02$ . Avec l'augmentation de la densité de peuplement, l'oxygène dissous a diminué et variait entre  $3,39 \pm 0,49$  et  $5,56 \pm 1,27$  mg/L dans les aquariums. Les plages d'accumulation de nutriments pour les différentes densités de peuplement du tilapia étaient :  $0,033 \pm 0,004$  -  $0,038 \pm 0,003$  mg/L pour le nitrate d'ammonium total (TAN) ;  $1,13 \pm 0,032$ - $1,38 \pm 0,022$  mg/L pour le nitrate et  $0,01 \pm 0,001$ -  $0,07 \pm 0,062$  mg/L pour le nitrite. Dans l'ensemble, les résultats ont montré que la densité de stockage moyenne de 3 kg/m<sup>3</sup>, qui offre les meilleures performances pour le système aquaponique testé, est fortement recommandée.

**Mots clés :** Optimisation-aquaponie-biofiltre-Tilapia-culture-recyclage.

# **INTRODUCTION**

La population mondiale humaine a connu une croissance constante au fil du temps, atteignant aujourd'hui 7.3 billion (Melrose *et al.*,2015). Selon l'association des Nations Unies, il est évident que "la population mondiale est presque certaine de croître dans le court-à-moyen terme". En ajoutant environ 83 million de personnes chaque année, la population mondiale est prévue pour atteindre 8,5 billion d'habitants d'ici 2030 et encore 9,7 billion d'habitants d'ici 2050 (Melrose *et al.* ; 2015).

Les ressources en eau et en terres pour l'agriculture diminuent et les pêcheries mondiales ont atteint ou dépassé leur rendement maximal durable. Pour nourrir l'humanité pendant les 40 prochaines années, on suppose qu'il faudra produire plus de nourriture que toute la nourriture produite depuis le début de l'histoire (Parker, 2002). Les ressources extractives sont extraites de la nature puis consommées dans certaines applications alimentaires ou énergétiques. Des ressources renouvelables telles que les arbres et les poissons existent en quantités limitées à tout moment mais peuvent se régénérer (Rasband *et al.* 2004).

La pêche est une ressource renouvelable extractible lorsqu'elle est gérée correctement. La consommation et la demande récentes de produits de la mer, principalement motivées par le développement technologique de la pêche et la demande du marché (découlant des connaissances récentes sur les bienfaits du poisson pour la santé et de l'augmentation de la population), ont conduit à une mauvaise gestion du système.

Les tendances actuelles de la production halieutique mondiale montrent que l'offre de poisson provenant des pêches marines devrait demeurer constante, voire baisser, car les captures ont atteint le rendement maximal. En effet, depuis des années 90, 44 % des principaux stocks sont pleinement exploités et leur production a donc quasiment atteint la limite maximale, sans autres perspectives d'accroissement (FAO, 2014). Ceci a eu pour effet de réduire leur contribution à couvrir les besoins croissants d'une population mondiale en expansion. Face à ce constat, une volonté considérable a été manifestée pour établir des approches durables et effectives pour le développement de l'aquaculture comme une panacée afin de couvrir la demande importante et croissante des produits de la pêche et limiter la pression sur les stocks naturels.

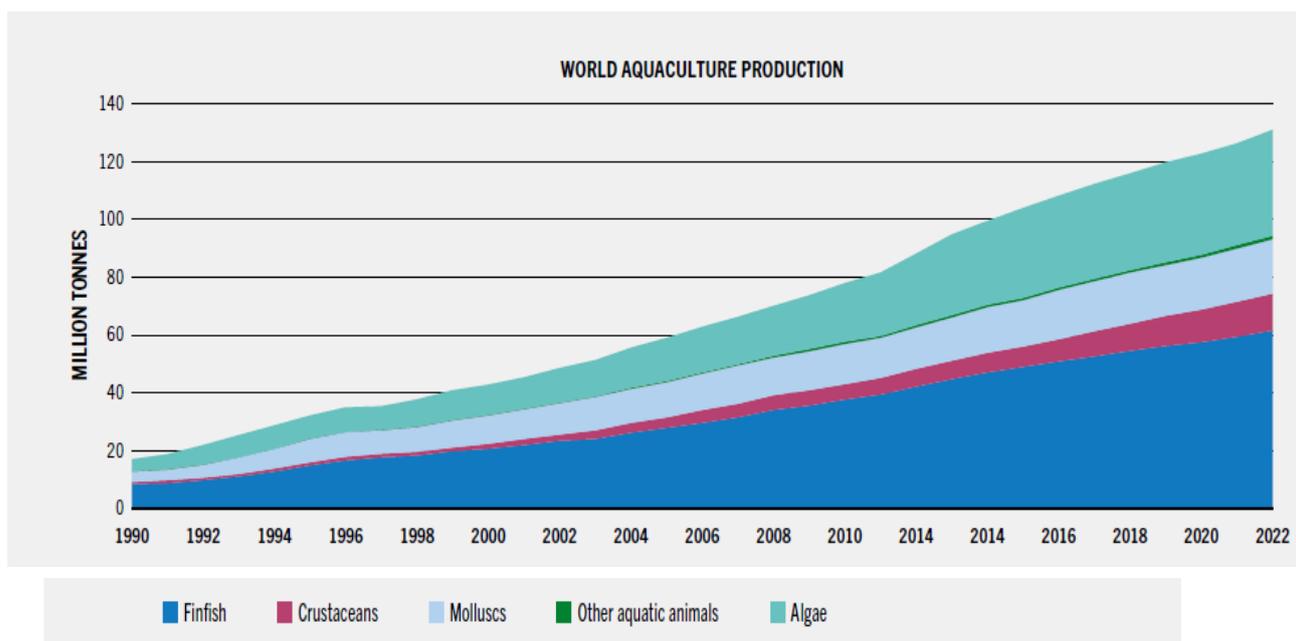
Pendant les trois dernières décennies, l'aquaculture s'est développée, diversifiée, intensifiée et a engendré d'importants progrès technologiques. La contribution de l'aquaculture à la production halieutique mondiale ne cesse d'augmenter, passant de 5,3 % en 1970 à 31,9 % du volume en 2006 (FAO, 2007). De plus, l'aquaculture est le secteur de production vivrière qui connaît l'essor le plus rapide; elle continue à dominer l'ensemble des

secteurs de productions animales en termes de croissance. En effet, depuis 1984, la production aquacole mondiale a enregistré un taux moyen annuel de croissance d'environ 8,9 %, contre 1,4 % pour la pêche et 2,8 % pour les filières viande. Selon la FAO (2008 a), l'aquaculture est devenue un facteur primordial de sécurité alimentaire et d'atténuation de la pauvreté dans de nombreux pays en voie de développement.

Depuis 1990, la production issue des captures plafonne aux alentours de 80 millions de tonnes (Mt). Selon Chamberlain (1993), pour satisfaire les besoins d'une population mondiale estimée à 8,5 milliards en 2025, il faudrait atteindre une production totale de 190 Mt. Cet objectif ne peut se réaliser qu'à travers l'aquaculture via l'augmentation des surfaces de production, l'intensification des systèmes d'élevage et l'optimisation des rendements.

Les poissons d'eau douce continuent de dominer la production globale de poissons d'aquaculture en 2006 (FAO, 2007) (28,9 Mt soit 60,4 % de la production totale de poissons). Selon les statistiques mondiales de la pêche et de l'aquaculture continentale (FAO, 2007), les tilapias occupent le deuxième rang après les carpes en termes de production à l'échelle mondiale, avec un taux d'accroissement annuel de 11,2 % entre 2002 et 2007. Les tilapias constituent le second groupe de poissons, après les pangasius, dont l'élevage a connu le plus fort taux de croissance ces dix dernières années (Lazard, 2009). Sa production est estimée à environ 2,5 millions de tonnes en 2010 dont 80 % proviendrait d'aquaculture (Josupeit, 2005) et plus que 85 % sont représentés par l'espèce *Oreochromis niloticus* (Lazard, 2009). Depuis une vingtaine d'années, les tilapias sont apparus sur les marchés internationaux, notamment au Japon, aux États-Unis et en Europe, où ils occupent une place croissante aux côtés de deux autres espèces tropicales, le pangasius et la perche du Nil. D'ailleurs certaines perspectives (Fitzsimmons, 2000) positionnent le tilapia comme l'espèce susceptible d'être la plus élevée au 21<sup>e</sup> siècle et de remplacer certaines espèces marines en situation de surexploitation.

En 2022, la production mondiale d'aquaculture a atteint un record historique de 130,9 millions de tonnes, soit une hausse de 8,1 million de tonnes par rapport aux 122,8 millions en 2020. Elle représentait 52 % de la consommation humaine. La production aquacole mondiale totale en 2022 a augmenté de 87,9 millions de tonnes par rapport aux 43 millions de tonnes de 2000, soit une augmentation importante de 204 pour cent (taux de croissance annuel moyen de 5,2 pour cent) (Fao, 2024) (**Figure 1**). Les 30 dernières années ont connu une augmentation significative de la production aquacole, avec une variété de plus de 345 espèces de poissons élevés en aquaculture (Boxman *et al.*, 2017). Cependant, le tilapia lui-même (*O. niloticus*) a représenté 8,3 % de la production totale en 2018, ce qui en fait la troisième production la plus importante de l'aquaculture (FAO, 2020).



**Figure 1 :** Production mondiale de l'aquaculture (1990-2022). Les données sur les animaux aquatiques excluent les crocodiles, les alligators, les caïmans, les produits aquatiques (coraux, perles, coquillages et éponges) et les algues. Les données sont exprimées en équivalent poids vif pour les animaux aquatiques et en poids humide pour les algues (Fao, 2024).

Cette espèce reste parmi les poissons les plus appréciés par les consommateurs et les plus compatibles avec leur pouvoir d'achat. En élevage, sa croissance très rapide, sa reproduction aisée en captivité, sa rusticité d'élevage due à une résistance remarquable aux maladies, son aptitude à transformer efficacement les aliments composés en font une espèce de choix pour une pisciculture de type intensif. Son importante aire de répartition et son intérêt en aquaculture s'expliquent, entre autres, par ses faibles exigences écologiques et sa capacité à survivre dans une large gamme des conditions environnementales (température, salinité, oxygène dissous...). Tirant profit de ces caractéristiques, des technologies simples et peu coûteuses furent mises au point, accessibles à de "petits" entrepreneurs, permettant à l'aquaculture de ce poisson de connaître des développements spectaculaires dans certains pays où les conditions étaient favorables. L'élevage de cette espèce peut se faire à différents niveaux d'intensification, depuis le système étang extensif jusqu'à l'élevage super intensif en circuit fermé, circuit ouvert et/ou en cages flottantes. Cette espèce peut aussi être élevée en monoculture ou en polyculture, notamment avec le poisson chat africain, (Kanangire, 2001), la carpe (Da Silva *et al.*, 2008), la crevette d'eau douce (Sharif uddin *et al.*, 2008) etc.

Le Sahara Algérien particulièrement la ville de Biskra est caractérisée par un sol sableux et un climat chaud, ce qui en fait nécessite une grande quantité d'engrais et d'eau, Ce qui pose un gros problème pour les agriculteurs dans la région. Donc nous proposons de mener un nouveau système hors-sol qui produit au même temps un produit végétal, et un produit animal.

Une solution à l'étude passe par le recyclage et la valorisation des rejets piscicoles par des cultures hors-sol, c'est l'aquaponie ; elle permet de gérer à la fois une dépendance trop forte à la disponibilité en eau, le problème des rejets d'effluents piscicoles dans l'environnement tout en limitant la dépendance du hors-sol vis-à-vis des intrants chimiques (Foucard *et al.*, 2015).

De ce fait, L'objectif de notre projet est de promouvoir l'idée d'aquaponie en Algérie et de montrer la possibilité de l'appliquer avec un minimum de moyens et d'outils.

L'aquaponie est une combinaison de deux modèles d'élevage et de culture qui vise à exploiter les avantages de l'aquaculture et des systèmes hydroponiques. Une production de poisson raisonnable peut être maintenue et, en même temps, une large gamme de plantes et de légumes verts bénéficie des effluents riches en produits métaboliques et aliments non consommés (solides en suspension, ammoniac, nitrite et nitrate) comme sources d'azote pour leur production (Simeonidou *et al.*, 2012). Par ce procédé, la substance hautement toxique (l'ammoniac) produite par les poissons est convertie par des bactéries nitrifiantes en nitrate moins toxique et assimilable par les plantes (Tokuyama *et al.*, 2004).

Dans l'aquaponie, les bactéries (*Nitrosomonas* et *Nitrobacter*) transforment l'ammoniac ( $\text{NH}_3$  et  $\text{NH}_4$ ) en nitrite ( $\text{NO}_2$ ) et ensuite en nitrate ( $\text{NO}_3$ ), c'est-à-dire en azote assimilable par les plantes et moins toxique pour les poissons (DeLong, Losordo, & Rakocy, 2009). L'eau ainsi purifiée peut retourner vers les aquariums à poissons. Ce processus fonctionne en cycle fermé grâce au processus de nitrification effectué par les bactéries. La nitrification ne s'effectuant que sous certaines conditions environnementales (pH, température), il est essentiel de toujours tenir ces paramètres en compte pour assurer le bon fonctionnement du système (Nelson, 2008).

Dans ce contexte cette thèse a pour objectif principal, présenter une technique d'agriculture intégrée qui peut augmenter l'efficacité de l'utilisation des ressources naturelles sans réduire la production et de pouvoir produire de la nourriture à partir d'eau douce pour répondre à la demande alimentaire de la population mondiale et en particulier contribuer à la sécurité alimentaire de l'Algérie.

## *Introduction*

Dans un premier temps, nous allons approfondir le concept de l'AQUAPONIE étant donné que c'est une nouvelle technique en Algérie. Le concept a donc été correctement défini et l'état de l'art de la technique a été établi. Tout cela a été abordé dans la 1ère partie de cette thèse sous forme de revue bibliographique.

Nous installerons un système aquaponique durable avec les matériels locaux et abordable à utiliser dans les régions arides, cas de Biskra.

Nous évaluerons la capacité de ce système de produire et obtenir un rendement adéquat et une bonne qualité de la laitue cultivée dans un système aquaponic à récirculation en utilisant uniquement des engrais organiques produits par les poissons sans complément d'engrais minéraux.

Ensuite, nous allons étudier l'effet de stockage de tilapia sur les performances de la croissance de la laitue et de tilapia ainsi que sur la qualité de l'eau afin d'optimiser la production aquacole et végétale au sein du système aquaponique.

La présente thèse comporte trois parties ;

Partie 1 : Revue bibliographique globale sur l'aquaponie et ses principes.

Partie 2 : Protocole expérimental et les méthodes adoptés dans la présente recherche.

Partie 3 : les résultats obtenus et leur discussions.

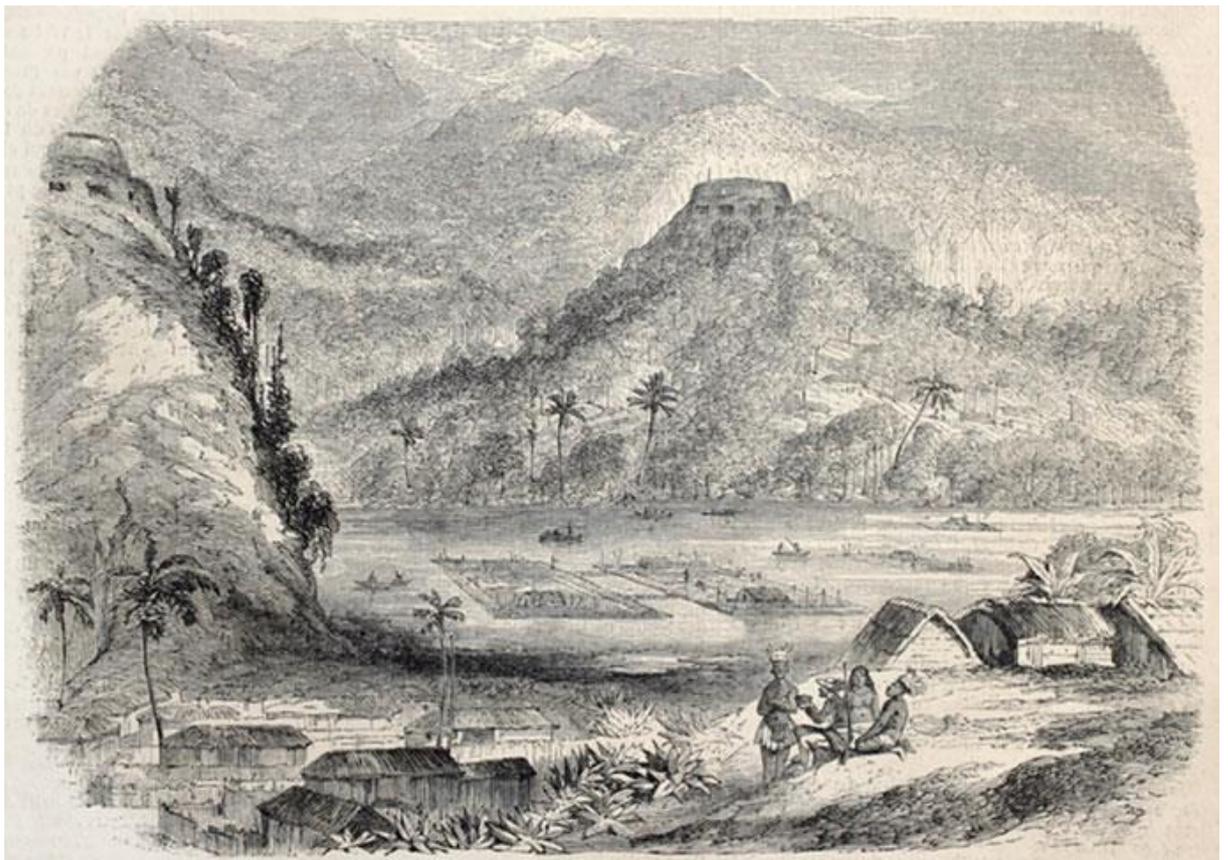
# **SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE**

## 1 L'aquaponie

### 1.1 Historique de l'aquaponie

L'origine historique du système aquaponique a suscité de nombreuses controverses, mais de nombreux documents indiquent que des formes précurseur de ce système remontent à l'époque médiévale des Aztèques vivant à l'intérieur du Mexique vers l'an 1000 après JC (Shabeer, 2016).

Les Aztèques auraient développé la première version du système de production aquaponique en raison du manque de terres disponibles pour cultiver leur nourriture. Pour résoudre ce problème foncier, ils ont adopté une approche "archaïque" consistant à construire des radeaux recouverts de terre pour permettre la plantation de légumes. Ces radeaux, connus sous le nom de "jardins flottants ou Chinampas", représentaient les premières formes de systèmes aquaponiques conçus pour produire de la nourriture (**figure 2**) (Jones, 2002).



**Figure 2 :** Chinampas (jardins flottants) en Amérique centrale – la construction d'îles artificielles comme ancêtre de la technologie aquaponique. (De Marzolino/[Shutterstock.com](https://www.shutterstock.com)).

Cependant, jusqu'à ce moment, le système de production semblait décrire davantage une culture hors sol simple plutôt qu'un système aquaponique. L'introduction de poissons dans

le système établi décrit ci-dessus pourrait être liée aux agriculteurs du sud de la Chine et de la Thaïlande qui cultivaient des espèces de poissons adaptées aux côtés du riz dans les rizières (Shabeer, 2016). Une autre variante serait celle des agriculteurs chinois élevant des canards dans des cages situées au-dessus des bassins d'élevage de poissons à nageoires. Ainsi, les excréments de canard étaient utilisés pour nourrir les poissons, tandis que les excréments de poisson et les eaux usées étaient transférés dans un aquarium à poisson-chat puis dans les cultures de riz (Rakocy *et al.*, 2004). En 1969, William McLarney, Nancy et John Todd ont construit un prototype réplique du système aquaponique des Aztèques (avec quelques modifications) fournir un abri, des légumes et du poisson tout au long de l'année (Shabeer, 2016). Les nombreux enregistrements de tentatives de développement dans l'histoire des systèmes de production aquaponique, tous ont conduit au niveau actuel d'efficacité et prototype de système dont nous disposons aujourd'hui.

De nos jours, les pisciculteurs explorent des méthodes d'élevage de poissons tout en essayant de réduire leur dépendance à l'égard de la terre, de l'eau et des ressources. L'aquaponie est donc issue de l'industrie aquacole. Traditionnellement, l'aquaculture se faisait dans de grands étangs. Cependant, au cours des 35 dernières années, de nombreuses recherches ont été menées sur les systèmes d'aquaculture en recirculation (RAS).

L'un des avantages de l'aquaculture en recirculation est que vous pouvez élever jusqu'à 0,34 kg de poisson par 3,78 litres (gallon) d'eau. Cela signifie que de grandes quantités de poissons peuvent être élevées dans une fraction de l'espace et de l'eau qu'exigerait une méthode d'aquaculture traditionnelle. L'inconvénient est que dans les populations de poissons très concentrées, un grand volume d'eaux usées s'accumule quotidiennement.

Au début, dans la recherche sur le RAS (système d'aquaculture à recirculation), des expériences ont été réalisées pour déterminer l'efficacité des plantes aquaponiques à consommer les nutriments contenus dans ces eaux usées, contribuant ainsi à purifier l'eau des poissons dans le système. Des experts du New Alchemy Institute et de l'État de Caroline du Nord L'université est réputée pour être à l'origine de l'aquaponie moderne. Motivés par la quête visant à réduire la dépendance excessive à l'égard de ressources naturelles limitées comme la terre et l'eau, ces scientifiques ont développé les technologies modernes et intégration efficace du système d'aquaculture et de culture hydroponique.

La combinaison de la culture de plantes hors-sol et de la pisciculture est encore relativement nouvelle, même si leur pratique remonte à l'Antiquité. La recherche en aquaponie a débuté dans les années 1970 et se poursuit aujourd'hui dans plusieurs universités du monde entier.

L'aquaponie à l'échelle commerciale probablement a été créée dans les années 1980 par le Dr James Rakocy et son équipe de l'Université des Îles Vierges (UVI). L'enquête menée par Love *et al.* (2014) montre que la popularité du système de production aquaponique s'est accrue depuis les années 80, justifiant son importance croissante en matière d'amélioration de la sécurité alimentaire grâce à des approches innovantes.

Les progrès récents dans la recherche aquaponique ont ouvert des possibilités supplémentaires, les parties prenantes développant des modèles opérationnels aquaponiques brillants et diversifiés pour une production alimentaire viable et pratique (Graber & Junge, 2009 ; La Crosse *et al.*, 2017). Cela inclut le développement de la culture hydroponique en eau profonde et l'adoption du biogaz comme source d'énergie pour le système. Tous ces éléments mettent en valeur les excellentes idées créatives des acteurs de l'aquaculture.

Avec le besoin progressif de nourrir une population humaine toujours croissante (Chan *et al.*, 2017 ; FAO, 2016 ; Junge *et al.*, 2017 ; Mancuso, 2014), on espère que la production aquaponique jouera un rôle important dans la réduction des courts-circuits. le grand écart dans la demande de poisson. Il convient également de noter que la consommation de légumes a tendance à augmenter à mesure que le salaire humain moyen augmente (Smith, 2010). Plus encore, la prise de conscience croissante des bienfaits pour la santé de la consommation de légumes et de la réduction de la viande rouge laisse entendre que la consommation de légumes et de poisson par habitant dans de nombreux pays devrait augmenter au cours des prochaines décennies (FAO, 2019).

Pour répondre à cette demande croissante de produits alimentaires de meilleure qualité (c'est-à-dire le poisson et les légumes), les progrès technologiques en aquaponie deviendront de plus en plus nécessaires.

### **1.2 Définition de l'aquaponie**

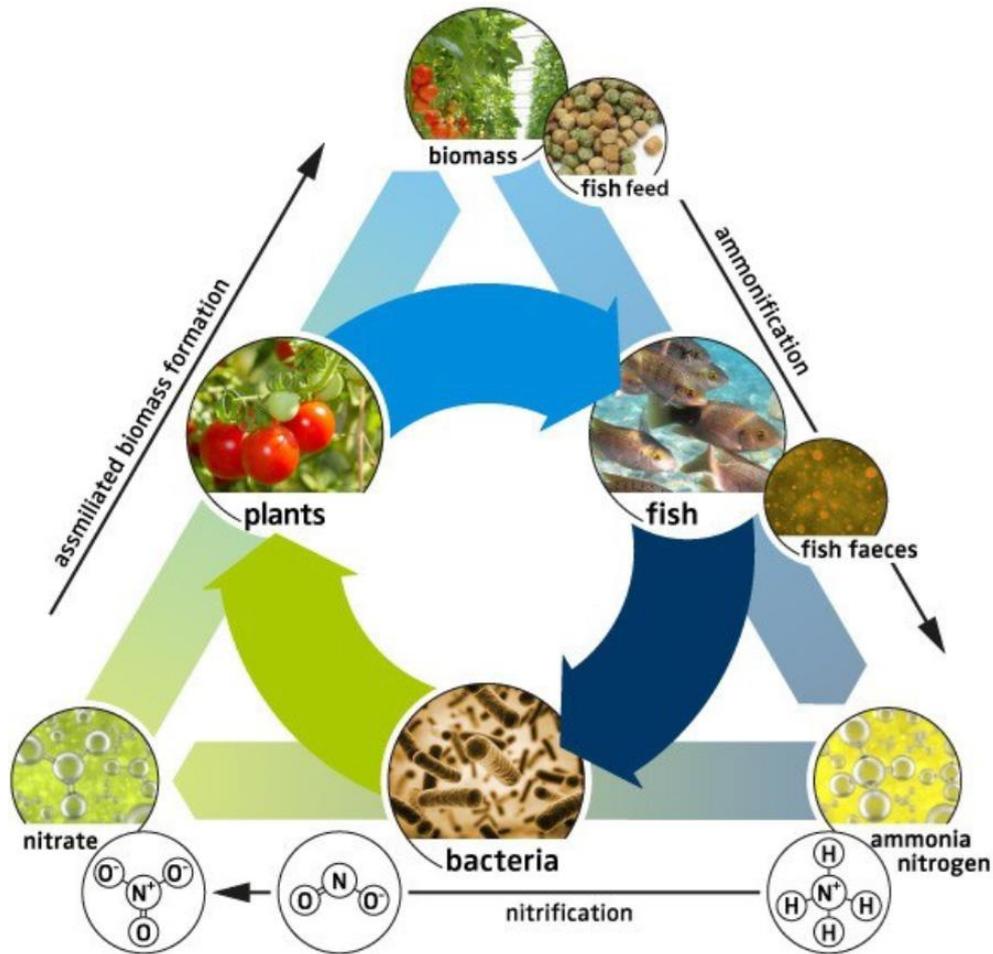
L'aquaponie est un système multitrophique intégré qui combine des éléments de l'aquaculture en recirculation et de la culture hydroponique (Rakocy, 1989), dans lequel l'eau des aquariums enrichie en nutriments est utilisée pour la croissance des plantes.

L'aquaponie est le processus de culture symbiotique d'organismes et de plantes aquatiques, dans lequel les effluents de l'aquaculture subissent des transformations microbiennes pour être utilisés comme source de nutriments pour la croissance des plantes, tandis que l'absorption des nutriments par les plantes assainit l'eau pour l'aquaculture. D'autres ont systématiquement défini l'aquaponie comme « ... un système de production

d'organismes et de plantes aquatiques dans lequel la majorité (> 50 %) des nutriments soutenant la croissance optimale des plantes provient de déchets provenant de l'alimentation des organismes aquatiques » (Lennard, 2005 ; Palm *et al.*, 2018). Le terme « aquaponie » est un mot-valise de l'aquaculture et de la culture hydroponique. L'aquaculture a été définie comme « l'élevage d'organismes aquatiques, y compris les poissons, les mollusques, les crustacés et les plantes aquatiques » (Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture, 1988), tandis que la culture hydroponique a été définie comme « ... la production de plantes dans un milieu sans sol » milieu dans lequel tous les nutriments apportés à la culture sont dissous dans l'eau » (Diver, 2006). Bien que la culture hydroponique soit considérée comme une technologie bien connue, le terme « aquaponie » est relativement peu familier au grand public, comme le montre une enquête européenne menée par Miličić *et al.*, (2017) dans laquelle plus de 50 % des individus ont admis qu'ils n'avaient pas entendu parler de l'aquaponie.

### **1.3 Les principes de l'aquaponie**

L'aquaponie combine des éléments de culture hydroponique et d'aquaculture en recirculation. La culture hydroponique conventionnelle nécessite des engrais minéraux afin de fournir aux plantes les nutriments nécessaires, mais les systèmes aquaponiques utilisent l'eau de poisson disponible, riche en déchets de poisson, comme nutriments pour la croissance des plantes. Un autre avantage de cette combinaison réside dans le fait qu'il n'est pas nécessaire d'éliminer l'excès de nutriments par un échange périodique d'eau de poisson enrichie avec de l'eau douce comme cela est pratiqué dans les systèmes aquacoles. Le système entraîne une symbiose entre les poissons, les micro-organismes et les plantes et encourage l'utilisation durable de l'eau et des nutriments, y compris leur recyclage (**figure 3**). Au sein de cette interaction synergique, les faiblesses écologiques respectives de l'aquaculture et de la culture hydroponique se transforment en atouts. Cette combinaison minimise considérablement le besoin d'apport de nutriments et de production de déchets, contrairement au fonctionnement en systèmes séparés.



**Figure 3 :** le cycle symbiotique de l'aquaponie (Delaide, 2017)

Les macronutriments (C, H, O, N, P, K, Ca, S et Mg) et les micronutriments (Fe, Mn, B, Zn, Cu et Mo) sont indispensables à la croissance des plantes. Les solutions hydroponiques contiennent des proportions bien définies de ces éléments (Resh, 2012) et sont ajoutées à la solution hydroponique sous forme ionique à l'exception des C, H et O, qui sont disponibles à partir d'air et d'eau. Dans les systèmes d'aquaponie, l'entrée de nutriments végétaux provenant des réservoirs de poissons contient des déchets de poisson riches en éléments nutritifs dissous (excrétion de la gale, urine et excréments), composés à la fois de composés organiques solubles et solides qui sont solubilisés sous forme ionique dans l'eau et assimilés par les plantes. Pour maintenir une croissance végétale adéquate, les concentrations de micro- et macronutriments doivent être surveillées. Périodiquement, certains nutriments peuvent avoir besoin d'être ajoutés pour ajuster leur concentration, par exemple, le fer est souvent déficient dans les déchets de poissons (Seawright *et al.*, 1998 ; Rakocy *et al.*, 2004 ).

### **1.3.1 Présentation du système aquaponique à low-tech :**

L'efficacité d'un système aquaponique repose sur sa capacité à éliminer les formes toxiques d'azote et une partie des éléments nutritifs provenant du bac à poissons. Pour cela, un bon dimensionnement est essentiel pour équilibrer la production d'éléments nutritifs provenant de l'aquaculture et leur absorption par les plantes (Foucard *et al.*, 2015). Les systèmes aquaponiques se présentent sous différentes configurations. Tous les systèmes comprennent un lit de culture, un bac à poissons et un biofiltre. Ces composants sont reliés à des filtres (mécaniques et biologiques), à un système d'oxygénation de l'eau, à une pompe pour la recirculation de l'eau et à des siphons pour les marées. Tous ces systèmes nécessitent de l'énergie pour faire circuler l'eau à travers les tuyaux et la plomberie, ainsi que pour l'aération (Somerville *et al.*, 2014).

### **1.3.2 Bassins d'élevage des poissons**

L'élevage des poissons joue un rôle crucial dans les systèmes aquaponiques, nécessitant des conditions optimales pour favoriser leur développement harmonieux. Ainsi, le choix du bac à poissons est une étape essentielle qui doit être réalisée avec soin, en tenant compte de plusieurs aspects importants tels que la forme, le matériau et la couleur.

La forme du réservoir a un impact significatif sur la circulation de l'eau. Les réservoirs de forme ronde à fond plat favorisent une circulation uniforme de l'eau, facilitant le transport des déchets solides vers le centre du réservoir par force centripète. Les réservoirs carrés à fond plat sont également acceptables mais nécessitent une élimination plus active des déchets solides.

Le choix du matériau du réservoir doit tenir compte de sa durabilité, de sa facilité de manipulation et de sa résistance aux UV. Selon Somerville *et al.* (2014), les réservoirs en polyéthylène basse densité (PEBD) sont souvent préférés en raison de leur grande résistance et de leurs caractéristiques alimentaires de qualité (Courard, 2005; Gélina & Olivier, 2013). Les baignoires, les barils ou les cuves IBC sont également adaptés. Il est crucial de s'assurer que le conteneur n'a pas été utilisé précédemment pour stocker des substances toxiques.

Les réservoirs de couleur claire, en particulier blancs, sont fortement recommandés car ils réfléchissent la lumière et maintiennent l'eau fraîche. De plus, ils offrent une meilleure visibilité des poissons et de leur comportement, facilitant ainsi l'évaluation visuelle des

déchets accumulés au fond du réservoir (DeLong, Losordo, & Rakocy, 2009 ; Somerville *et al.*, 2014).

### 1.3.3 Les filtres mécaniques

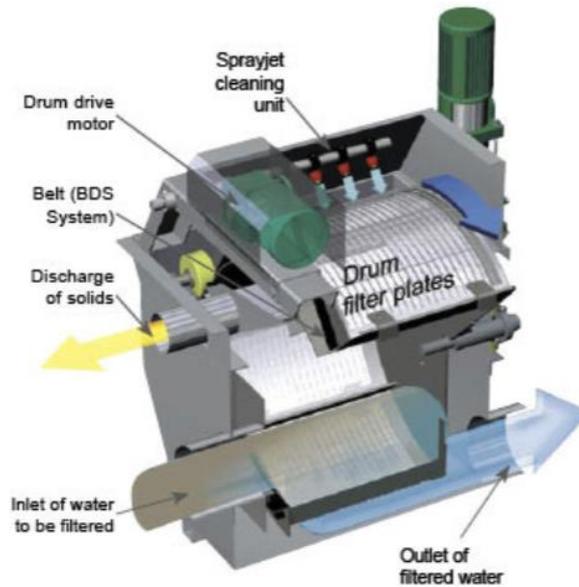
Le filtre mécanique joue un rôle essentiel dans les systèmes aquaponiques en séparant et en éliminant les déchets solides en suspension, ce qui maintient une bonne qualité de l'eau et assure le bon fonctionnement du système (Somerville *et al.*, 2014 ; Thorarinsdottir *et al.*, 2015). Les déchets non filtrés peuvent obstruer les racines, les conduits d'eau et le substrat du système. Leur accumulation augmente la demande en oxygène du système pour se décomposer, créant des zones anoxiques. De plus, sous l'action des bactéries anaérobies, ces déchets se décomposent et libèrent des gaz nocifs tels que le sulfure d'hydrogène à l'intérieur des réservoirs de poissons. Thorarinsdottir *et al.*, 2015, estiment que l'élimination inefficace des déchets solides entraîne plus de 85% des défaillances des systèmes aquaponiques.

La filtration mécanique peut être réalisée de plusieurs manières. La méthode la plus simple consiste à utiliser un écran ou un filtre mécanique positionné entre le réservoir de poissons et le lit de culture. Cet écran capture les déchets solides et doit être régulièrement rincé. Il existe différents types de filtres mécaniques, notamment les bassins de décantation, les clarificateurs à flux radial, les filtres à sable ou à billes, les filtres à tambour et les filtres à chicanes, chacun adapté à la quantité de déchets solides à éliminer (Somerville *et al.*, 2014).

Pour les unités NFT (Nutrient Film Technique) et DWC (Deep Water Culture), il est fortement recommandé d'utiliser une filtration mécanique pour piéger et éliminer les déchets solides. Sans ce processus préliminaire, les déchets solides en suspension s'accumulent dans les canaux et obstruent les surfaces radiculaires des cultures.

#### 1.3.3.1 a. Le filtre à tambour

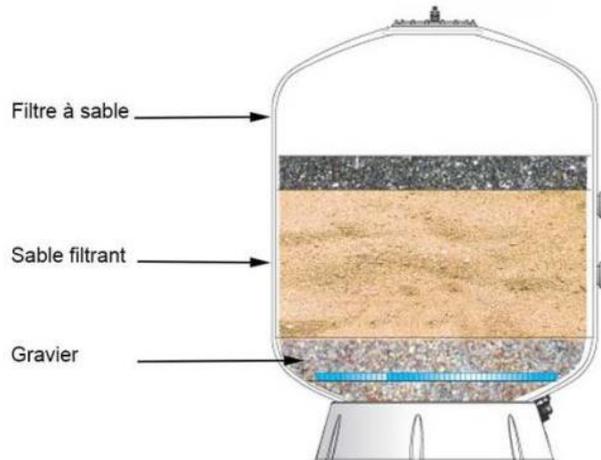
Le filtre à tambour est un dispositif qui utilise un tambour rotatif sur lequel l'eau à filtrer est déversée (**figure 4**). Ce tambour est revêtu d'une toile en acier inoxydable de 63 microns sur sa périphérie. Les impuretés plus grosses que les mailles sont piégées dans le tambour et sont évacuées lors du rinçage automatique. Le tambour tourne à une vitesse de 15 tours par minute, ce qui entraîne les impuretés vers le canal de sortie des boues. L'eau finement filtrée est ensuite dirigée vers la filtration biologique via deux refoulements.



**Figure 4 :** Filter à tambour (Lennard, 2012)

### 1.3.3.2 b. Le filtre à sable

Un filtre à sable est un type de filtre mécanique qui utilise des couches de sable disposées avec une granulométrie croissante de haut en bas (**figure 5**). Ce type de filtre est couramment utilisé pour le traitement de l'eau afin d'obtenir un haut degré de purification. Il élimine non seulement les matières en suspension, mais il contribue également à la dégradation de la matière organique dissoute dans l'eau.



**Figure 5 :** filtre à sable (Lennard, 2012)

### 1.3.3.3 c. Un filtre à tourbillon :

Un filtre à tourbillon, également appelé clarificateur, est un dispositif conçu pour accélérer et ralentir l'eau afin de concentrer les particules au fond pour ensuite les éliminer. Dans ce type de clarificateur, l'eau provenant du réservoir de poisson entre par un tuyau près

de la plaque inférieure du clarificateur (**figure 6**). Ce tuyau est positionné tangentiellement par rapport au récipient, ce qui force l'eau à tourner dans un mouvement circulaire à l'intérieur du récipient. La force centripète créée par ce mouvement circulaire dirige les déchets solides vers le centre et le bas du conteneur, car l'eau au centre du tourbillon se déplace plus lentement que celle à l'extérieur.



**Figure 6:** filtre à tourbillon (Harlaut, 2016)

Il est recommandé d'avoir un séparateur mécanique représentant environ 1/6 du volume du réservoir, mais cela dépend de la densité de stockage et de la conception exacte du système. Il est crucial de dimensionner le filtre en fonction du volume d'eau qu'il traite. Pour assurer un filtrage efficace, le temps de passage de l'eau dans le filtre doit être compris entre 40 secondes et 2 minutes. La taille du filtre correspondant à cette durée de passage peut être déterminée à l'aide de la formule suivante : Temps que l'eau passe dans le filtre en secondes =  $3600 \times \text{Volume en litres} / \text{Débit en litres par heure à l'entrée du filtre}$ .

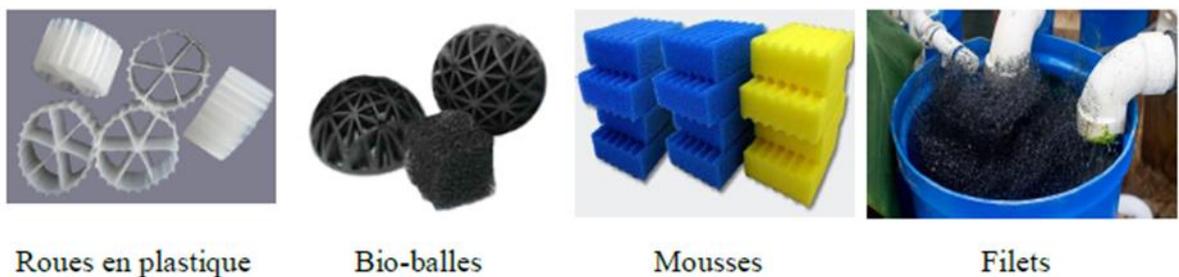
### 1.3.4 Les filtres biologiques

Les biofiltres sont des composants essentiels dans les systèmes aquaponiques, car ils sont responsables de la transformation de l'ammoniac, un métabolite toxique produit par les poissons dans l'eau, en nitrate, qui est plus facilement assimilable par les poissons et les plantes grâce à l'action des bactéries. Ces bactéries sont hébergées dans le biofiltre, où le mouvement dynamique de l'eau contribue à décomposer les particules très fines qui ne sont pas capturées par le clarificateur, réduisant ainsi l'accumulation de déchets (Somerville *et al.*, 2014).

Un biofiltre typique est un réservoir ou un baril contenant un support poreux fortement aéré. Il est généralement installé entre le filtre mécanique et les conteneurs hydroponiques. Le volume minimum du biofiltre doit représenter environ un sixième du volume du réservoir de poissons, bien que ce volume puisse varier en fonction du type de substrat utilisé. Dans les

systèmes aquaponiques utilisant la technique du lit de culture, une biofiltration séparée n'est pas nécessaire car les lits de culture agissent eux-mêmes comme des biofiltres efficaces. Tout biofiltre doit avoir un rapport surface/volume élevé, être inerte et facile à rincer. Les matériaux couramment utilisés comme support de biofiltre comprennent le gravier volcanique, les bouchons en plastique, les poufs de douche en nylon, les filets, les copeaux de chlorure de polyvinyle (PVC) et les tampons à récurer en nylon (**figure 7**).

Pour que les bactéries nitrifiantes puissent oxyder l'ammoniac, un accès adéquat à l'oxygène est nécessaire. Le processus d'aération implique de forcer de l'air dans l'eau pour augmenter les niveaux d'oxygène dissous, favorisant ainsi l'activité bactérienne bénéfique dans le biofiltre (Somerville *et al.*, 2014; Wongkiew *et al.*, 2017; Wright, 2018).



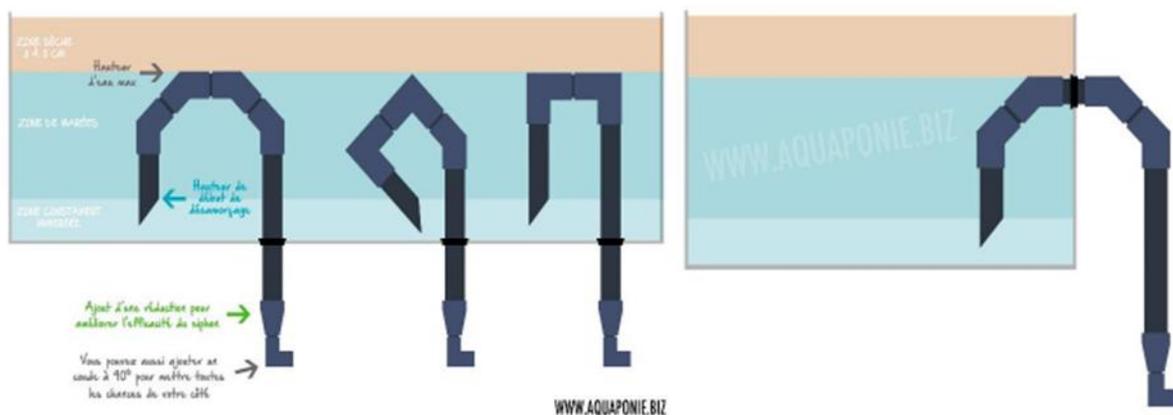
**Figure 7:** les types de bio-filtres utilisés en aquaponie (Somerville *et al.*, 2014)

### 1.3.5 Système hub et flow

Le système de flux et reflux, de plus en plus utilisé dans les systèmes aquaponiques commerciaux et domestiques, présente de nombreux avantages, notamment une meilleure oxygénation des racines et une circulation continue de l'eau. Dans ce système, les déchets riches en ammoniac produits par les poissons sont acheminés du réservoir vers les lits de culture par gravité ou à l'aide d'une pompe. Les bactéries nitrifiantes convertissent ensuite l'ammoniac en nitrites, puis en nitrates. Lorsque les lits de culture sont inondés, les plantes absorbent les nitrates de l'eau pour se nourrir. L'eau circule en permanence dans le système, produisant finalement une eau propre qui peut être renvoyée aux poissons. Le cycle entre l'humidité et la sécheresse peut être contrôlé de différentes manières, notamment par une minuterie de pompe, une vanne d'irrigation à indexation ou l'utilisation de siphons automatiques. En général, les unités hydroponiques sont drainées toutes les 20 à 30 minutes pour permettre l'incorporation d'oxygène dans la zone racinaire des plantes. Le contrôle

automatique le plus simple du cycle d'inondation et de drainage se fait à l'aide de siphons, notamment les siphons cloches et les siphons en U (**figure 8**).

Ces avantages contribuent à améliorer la croissance des plantes en leur fournissant une eau riche en nutriments provenant du réservoir, tout en réduisant les problèmes liés à la stagnation de l'eau. De plus, ce système contribue à filtrer les déchets de poisson de l'eau, ce qui favorise la santé des poissons.



**Figure 8 :** Siphon de forme U (Somerville *et al.*, 2014).

### 1.3.6 Le réservoir de vidange

Le réservoir de vidange, également appelé puisard, est un réservoir collecteur d'eau situé au point le plus bas du système aquaponique. Son rôle principal est de protéger les poissons contre les stress liés aux variations du niveau d'eau dans le bac à poissons. Souvent, la pompe submersible est installée à cet emplacement. Les bassins de rétention peuvent être plus petits que les aquariums et peuvent contenir entre un quart et un tiers du volume de l'aquarium. Pour les systèmes de type flux et reflux, ils doivent avoir au moins le volume total d'eau contenu dans les lits de culture.

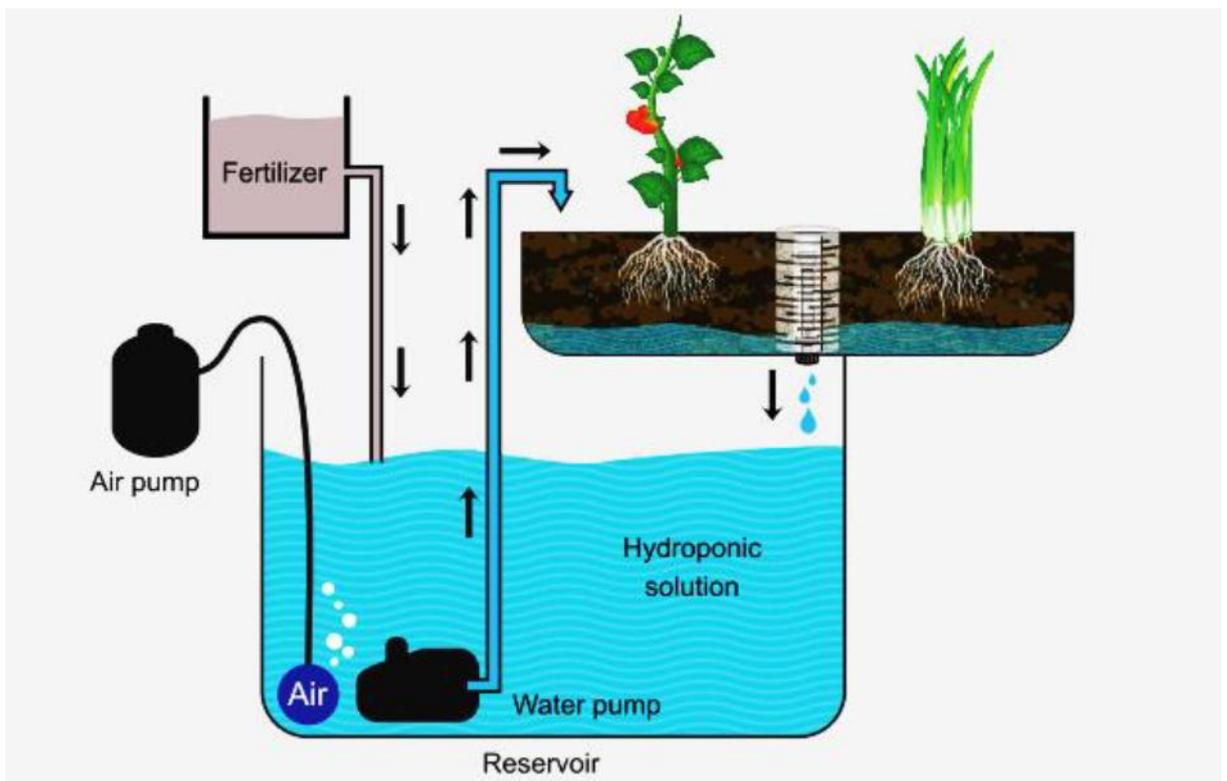
Les réservoirs externes sont principalement utilisés dans les unités de lit de médias. Dans les unités DWC (Deep Water Culture), le canal hydroponique peut également servir de réservoir de vidange. Cependant, bien que utile, le réservoir de vidange n'est pas un composant essentiel du système et de nombreuses conceptions n'utilisent pas de réservoir externe. Dans de très petites unités, avec des réservoirs de poissons d'une capacité allant jusqu'à 200 litres, l'eau est simplement pompée des réservoirs de poissons vers les lits de culture, puis retourne dans le réservoir de poissons.

## 1.4 Les composantes hydroponiques

### 1.4.1 C'est quoi l'hydroponie ?

L'hydroponie est une technique de production des végétaux hors sol basée sur l'utilisation d'une solution enrichie en nutriments pour irriguer et fertiliser les plantes (**Figure 9**), permettant ainsi le développement de l'agriculture dans des régions ayant des sols pauvres et peu d'accès à l'eau douce (Joyce *et al.*, 2019).

Les cultures hors-sol existent sous différents modèles et peuvent être réalisées totalement sans substrat de culture (technique du film nutritif (NFT), culture en eau profonde (DWC)) ou à l'aide d'un substrat inerte tel que la laine de roche, la tourbe, les billes d'argex etc. (Maucieri *et al.*, 2019). Ces techniques sont aujourd'hui largement utilisées en horticulture en Europe (Maucieri *et al.*, 2019) en utilisant des solutions commerciales prêtes à l'emploi (Sonneveld et Voogt, 2009) et sont principalement mises en œuvre en intérieur.



**Figure 9** : un système hydroponique simple (Somerville *et al.*, 2014).

## **1.4.2 Les types de systèmes hydroponiques**

Il existe plusieurs modèles de systèmes hydroponiques et les plus utilisés sont les systèmes NFT (Nutrient Film Technique), les Systèmes en eau profond (DWC) ou raft et le système de lits de culture encore appelé media Bed (Somerville *et al.*, 2014) :

### **1.4.2.1 Le système NFT**

Le système de Nutrient Film Technique (N.F.T.) est une méthode hydroponique qui utilise des tuyaux horizontaux légèrement inclinés (1 à 2 %), à travers lesquels s'écoule un mince filet d'eau aquaponique riche en nutriments. Les plantes sont positionnées dans des ouvertures au sommet des tuyaux et absorbent les nutriments de cette fine pellicule d'eau. L'eau nutritive est injectée au point le plus élevé du système et s'écoule vers le point le plus bas, où elle est récupérée puis renvoyée au réservoir des poissons. **(Figure 10)**

Ce flux nutritif circule sous forme de mince film sur les plateaux, entrant en contact avec les racines. L'écoulement peu profond de l'eau n'atteint que la partie inférieure de la masse racinaire qui se développe dans le canal, tandis que la partie supérieure des racines est exposée à l'air, recevant ainsi suffisamment d'oxygène. Selon Connolly (2010), un système N.F.T. bien conçu peut supporter des densités de plantation très élevées.

La pente, la longueur et le débit du canal doivent être soigneusement calculés pour garantir que les plantes reçoivent une quantité suffisante d'eau, d'oxygène et de nutriments. Dans les systèmes N.F.T. aquaponiques, le biofiltre devient essentiel car il n'y a pas de grande surface pour le développement des communautés bactériennes (Nelson, 2008).

Pour la fabrication des canaux, le choix des tuyaux dépend du diamètre optimal pour les types de plantes cultivées. Les tuyaux de section carrée sont préférables, bien que les tuyaux ronds soient plus courants et tout à fait acceptables. Les légumes fruitiers plus volumineux nécessitent des tuyaux de 11 cm de diamètre, tandis que les légumes à feuilles à croissance rapide et les petits légumes à petites racines peuvent se contenter de tuyaux de 7,5 cm de diamètre. Pour une polyculture à petite échelle, des tuyaux de 11 cm de diamètre sont recommandés, bien que cela puisse entraîner une densité de plantation plus faible.



**Figure 10** : système hydroponique de type NFT (Somerville *et al.*, 2014).

#### ***1.4.2.1.1 La circulation de l'eau au sein de système NFT***

La circulation de l'eau se fait par gravité depuis l'aquarium, à travers le filtre mécanique, puis dans le biofiltre. Ensuite, l'eau est pompée du biofiltre dans chaque tuyau hydroponique à un débit modéré et uniforme, créant ainsi un courant peu profond d'eau aquaponique riche en nutriments qui circule au fond des tuyaux. Une variation de ce système peut inclure l'utilisation d'un puisard. Dans ce cas, l'eau est pompée du puisard dans les deux directions à travers des raccords et des vannes. Une partie de l'eau est directement renvoyée dans l'aquarium. Le reste de l'eau est pompé dans un collecteur qui distribue l'eau de manière égale à travers les tuyaux NFT. L'eau s'écoule à nouveau par gravité dans les tuyaux de culture où poussent les plantes. En sortie des tubes de culture, l'eau retourne dans le biofiltre ou le puisard où elle est à nouveau pompée dans l'aquarium ou dans les tubes de culture. Le débit d'eau pour chaque tube de culture ne doit pas dépasser 1 à 2 litres par minute et est contrôlé par des vannes, tout excès d'eau étant renvoyé dans le réservoir à poissons (Somerville *et al.*, 2014 ; Pattillo, 2017).

Cependant, l'inconvénient de ce système réside dans le fait que la combinaison du puisard et du biofiltre peut diluer la concentration en éléments nutritifs de l'eau atteignant les tubes de culture tout en renvoyant de l'eau au poisson avant que les nutriments ne soient complètement éliminés. Cependant, cette légère dilution est gérée en contrôlant le flux bidirectionnel sortant du puisard/biofiltre et, dans l'ensemble, elle a peu d'effet sur l'efficacité globale du système compte tenu des avantages qu'il procure. En général, la pompe renvoie 80

% de l'eau dans les aquariums et les 20 % restants dans les lits de culture ou les canaux, ce qui peut être ajusté à l'aide de vannes. La longueur des tubes de culture doit être comprise entre 1 et 12 mètres. Pour les tubes plus longs, des carences en éléments nutritifs peuvent survenir chez les plantes situées à l'extrémité des tuyaux, car les premières plantes auront déjà absorbé une partie des nutriments.

### 1.4.2.2 Le système de culture en eau profond (DWC : Deep Water Culture) ou raft

Les systèmes de culture en eau profonde (DWC), également appelés culture sur radeau, utilisent une plateforme flottante ou suspendue perforée pour soutenir les plantes et immerger leurs racines dans l'eau. Les radier sont généralement fabriqués en polystyrène et des pots en plastique sont utilisés pour maintenir les plantes en place. (Figure 11). Ce type de système présente de nombreux avantages, notamment une facilité d'utilisation, une mobilité accrue, un nettoyage simplifié et un risque réduit de perte de plantes en cas de panne de courant. Les plantes cultivées dans un système DWC peuvent survivre jusqu'à deux semaines sans circulation d'eau ou aération, ce qui est plus long que d'autres systèmes où les plantes peuvent souffrir après quelques heures ou jours. La culture sur radeau est largement utilisée dans le commerce en raison de sa simplicité et de sa fiabilité (Pattillo, 2017a).



**Figure 11** : Système hydroponique de type DWC (Somerville *et al.*, 2014).

#### **1.4.2.2.1 Circulation de l'eau dans le système DWC**

La circulation de l'eau dans un système DWC est similaire à celle d'un NFT. Le débit d'eau entrant dans chaque canal est généralement faible, avec un temps de rétention compris entre 1 et 4 heures. Le temps de rétention fait référence au temps nécessaire pour remplacer tout le volume d'eau dans un conteneur donné. Par exemple, si un canal contient 600 litres d'eau et que le débit d'entrée est de 300 litres par heure, le temps de rétention serait de 2 heures (600 litres / (300 litres par heure)).

Pour assurer une bonne aération des racines, des pierres à air doivent être disposées dans le lit flottant, une tous les 10 pieds carrés, selon Mullins, Nerrie et Sink (2010). Étant donné que des microbes nitrifiants colonisent les radeaux, il est recommandé de les nettoyer à l'eau pour éliminer les algues et les débris, tout en évitant de les laisser sécher pour ne pas tuer ces microbes. De plus, la hauteur des lits doit permettre un accès facile de tous les côtés.

#### **1.4.2.3 Le système de lits de culture (Media Bed)**

Le système de lit de culture est une méthode largement répandue et adaptée aux pays en développement. Ces systèmes sont efficaces en termes d'utilisation de l'espace, ont un coût initial relativement bas pour les petites installations et conviennent aux débutants en raison de leur simplicité (**Figure 12**).

L'avantage principal des lits de culture est qu'ils servent à soutenir les racines des plantes tout en agissant comme un filtre, à la fois mécanique et biologique. Un autre avantage significatif est la possibilité de recycler des matériaux pour leur construction, ce qui rend ces systèmes économiques et durables. Cependant, à grande échelle, ces systèmes peuvent être coûteux en raison du poids important du milieu de culture utilisé. Ils peuvent également se boucher en raison des déchets solides provenant des bassins de poissons, et une évapotranspiration accrue peut se produire si le milieu de culture est fortement exposé au soleil. Ce dernier problème peut être atténué en maintenant la surface du substrat exposée au soleil aussi sèche que possible (Somerville *et al.*, 2014 ; Love, Uhl, & Genello, 2015).

Les lits de culture peuvent être fabriqués à partir de divers matériaux tels que le plastique, la fibre de verre ou le bois, revêtus à l'intérieur de feuilles de caoutchouc ou de polyéthylène pour les rendre imperméables. Les lits de culture les plus courants sont fabriqués à partir de conteneurs en plastique. Les légumes à feuilles vertes ne nécessitent généralement

que 15 à 20 cm de profondeur, ce qui en fait un choix pratique si l'espace est limité. Des expériences ont montré que même les cultures plus grandes peuvent être cultivées dans des lits peu profonds si les concentrations de nutriments sont adéquates.



**Figure 12:** Système de lit de culture (Somerville *et al.*, 2014).

### **1.4.2.3.1 Circulation de l'eau dans système de lit de culture**

La circulation de l'eau dans les lits de culture varie en fonction de leur conception. Certains lits sont conçus pour être inondés et drainés, ce qui signifie que le niveau de l'eau monte jusqu'à un certain point puis s'écoule complètement. Ce processus ajoute de l'oxygène aux racines des plantes et contribue à la biofiltration de l'ammoniac. D'autres méthodes d'irrigation des lits de culture utilisent un flux d'eau constant, soit en entrant d'un côté du lit et en sortant de l'autre, soit en étant distribué à travers un réseau d'irrigation goutte à goutte.

En ce qui concerne le substrat utilisé, il occupe généralement environ 30 à 60 % du volume total du lit de support. Ce pourcentage est important pour déterminer la taille du réservoir de puisard pour chaque unité, car le réservoir de puisard doit au moins contenir le volume total d'eau contenu dans tous les lits de média. Les réservoirs de puisard doivent être légèrement surdimensionnés pour garantir qu'il y a toujours suffisamment d'eau pour que la pompe fonctionne sans jamais tourner à sec. Il est recommandé que le volume du puisard représente au moins 70 % du volume total du lit de média.

### ***1.4.2.3.2 Les types du substrat dans la technique lit de culture***

Le choix du milieu de culture repose sur plusieurs critères importants, notamment sa perméabilité à l'eau, sa porosité permettant le développement bactérien, le passage de l'eau et la respiration des racines des plantes. Le milieu doit être inerte, exempt de poussière et de substances toxiques, et son pH doit être neutre afin de ne pas altérer la qualité de l'eau. Il est également important de considérer la disponibilité, le poids, le coût et la facilité de manipulation du substrat lors du choix du milieu de culture.

#### ***1.4.2.3.2.1 a. Gravier volcanique :***

Le gravier volcanique est largement préféré comme support de culture dans les unités de lit de médias en raison de ses excellentes propriétés. Il offre un très bon rapport surface/volume, ce qui favorise la colonisation bactérienne, et il est souvent peu coûteux et facile à obtenir. De plus, le gravier volcanique est presque chimiquement inerte, ce qui le rend idéal pour maintenir la stabilité chimique de l'eau. La taille recommandée du gravier volcanique est généralement entre 8 et 20 mm de diamètre. Les particules plus petites risquent de se boucher avec les déchets solides, tandis que les plus grosses ne favorisent pas un bon développement racinaire. Ainsi, le gravier volcanique offre une surface adéquate pour la colonisation bactérienne en fonction de la taille des particules, ce qui contribue à l'équilibre et à la santé du système aquaponique.

#### ***1.4.2.3.2.2 b. Gravier de construction***

Le gravier de construction est également l'un des supports les plus populaires en raison de sa disponibilité et de son coût abordable. Il offre un excellent rapport surface/volume et présente une inertie chimique idéale en raison de sa nature quartz. La taille recommandée du gravier de construction est généralement de 8 à 20 mm de diamètre. Cependant, un inconvénient de son utilisation réside dans son poids, ce qui rend sa manipulation moins aisée lorsqu'il s'agit de grandes quantités.

#### ***1.4.2.3.2.3 c. Billes d'argiles***

Les billes d'argile sont un substrat très pratique et bien adapté à la production sur les toits. Elles offrent une surface d'environ 250 à 300 m<sup>2</sup> par m<sup>3</sup>, ce qui se situe dans la fourchette cible pour favoriser la colonisation bactérienne. Cependant, elles peuvent être relativement coûteuses et moins disponibles dans certaines régions du monde. Les billes d'argile sont disponibles en différentes tailles, mais pour l'aquaponie, il est recommandé d'utiliser les plus grandes tailles avec des diamètres compris entre 8 et 20 mm.

### **1.4.2.3.3 Les zones de lit de culture**

les lits de culture se composent de trois zones distinctes, qui peuvent être considérées comme des micro-écosystèmes en raison de leurs différences en termes de teneur en eau et en oxygène. Chaque zone abrite une diversité de bactéries, de champignons et de micro-organismes. La première zone, située dans les 2-5 cm supérieurs du lit, est la zone sèche qui sert de barrière lumineuse pour protéger l'eau et les organismes nuisibles contre la lumière directe, ce qui pourrait endommager les plantes. La deuxième zone, d'une profondeur de 10-20 cm, est la zone principale où se déroule la majeure partie de l'activité biologique. C'est ici que se produisent de nombreuses réactions microbiennes importantes pour la décomposition des déchets organiques et la libération de nutriments. La dernière zone, située dans les 3-5 cm inférieurs du lit, reste constamment humide. Cette zone est propice à l'accumulation de déchets solides en petites particules, où les micro-organismes les plus actifs dans la minéralisation se trouvent. Parmi eux, on trouve des bactéries hétérotrophes qui dégradent la matière organique (Harlaut, 2016; Somerville *et al.*, 2014).

## **1.5 Mouvement de l'eau dans le système aquaponique**

Le fonctionnement des systèmes aquaponiques repose sur la circulation de l'eau pour maintenir tous les organismes vivants dans le système. L'eau circule des réservoirs de poissons à travers un séparateur mécanique et un biofiltre, puis atteint les plantes dans leurs lits de culture, leurs tuyaux ou leurs canaux, éliminant ainsi les nutriments dissous. En cas d'arrêt du mouvement de l'eau, les conséquences peuvent être immédiates : réduction de l'oxygène dissous et accumulation de déchets dans l'aquarium. Sans filtre mécanique ni biofiltre, les poissons peuvent souffrir et mourir en quelques heures. De plus, sans circulation d'eau, l'eau dans les lits de médias ou les unités DWC devient stagnante et anoxique, tandis que les systèmes NFT se dessèchent.

Pour maintenir une bonne qualité de l'eau et assurer un apport suffisant en oxygène, il est recommandé de faire circuler l'eau au moins deux fois par heure (Somerville *et al.*, 2014).. Les essais menés par Ngo Thuy Diem, Konnerup et Brix en 2017 sur le taux de recirculation dans une unité aquaponique sous abri ombragé à l'Organic Garden de l'Université internationale de Floride à Miami ont montré une excellente croissance et survie des poissons avec un taux de recirculation de 400% à une faible densité de poissons de 122 poissons par mètre cube et une température moyenne de l'eau de 25,5°C. La circulation de l'eau implique

l'utilisation d'un dispositif pour déplacer l'eau, un système de tuyauterie et l'utilisation de la gravité pour réduire les coûts de déplacement de l'eau dans tout le système. Il est recommandé d'utiliser des tuyaux surdimensionnés pour éviter tout risque d'obstruction éventuelle dans le système aquaponique (Mullins *et al.*, 2010).

Le choix de la pompe dans un système aquaponique prend en considération plusieurs critères, notamment son efficacité énergétique et la quantité d'eau à déplacer. Une pompe efficace peut déplacer 40 litres d'eau par heure pour chaque watt consommé. Selon Shafahi & Woolston (2014), la puissance totale requise par la pompe dépend du débit massique, de la hauteur de refoulement et de son efficacité. Le débit doit être maintenu entre 7,57 et 18,92 litres par minute pour permettre aux plantes d'absorber les nutriments correctement.

Lors de la conception de la tuyauterie, il est important de minimiser le nombre de connexions, car chaque raccord peut réduire jusqu'à 5% du débit total à chaque passage. De plus, le diamètre des tuyaux joue un rôle crucial : un tuyau de 30 mm a le double du débit d'un tuyau de 20 mm, même si les deux sont alimentés par des pompes de même capacité. Les tuyaux de plus gros diamètre nécessitent également moins d'entretien pour éliminer les accumulations de solides, ce qui se traduit par des économies d'énergie et des coûts d'exploitation plus importants.

Lors de l'installation d'une pompe submersible dans une unité aquaponique, il est essentiel de la placer dans un endroit accessible pour permettre un nettoyage régulier. Le filtre interne doit être nettoyé toutes les 2 à 3 semaines pour assurer le bon fonctionnement de la pompe. Il est crucial de ne jamais faire fonctionner une pompe à sec, car cela pourrait endommager irrémédiablement le moteur de la pompe.

### **1.6 L'aération dans le système aquaponique**

L'aération des systèmes aquaponiques vise à augmenter la teneur en oxygène dissout pour favoriser la vie de tous les organismes du système. Les pompes à air injectent de l'air dans l'eau à travers des conduites d'air et des pierres à air situées dans les réservoirs d'eau. L'utilisation de pierres à air de qualité est recommandée pour produire de petites bulles d'air. Les petites bulles ont une plus grande surface d'interaction avec l'eau, ce qui facilite la libération d'oxygène. Cette méthode rend le système d'aération plus efficace et contribue à réduire les coûts.

L'efficacité de l'absorption d'oxygène est calculée en comparant la quantité d'oxygène absorbée dans le système avec la quantité d'oxygène ajoutée. Ce rapport est exprimé en

pourcentage et indique l'efficacité globale de l'aération pour améliorer la teneur en oxygène dissout dans l'eau du système aquaponique.

Les pompes d'aération :

James Rakocy, dans son guide sur l'aquaponie, souligne l'importance de maintenir des niveaux d'oxygène dissous supérieurs ou égaux à 5 mg par litre dans l'aquarium et autour des racines des plantes pour assurer la santé du système. Pour les petites unités avec des aquariums d'environ 1 000 litres, il est recommandé d'installer au moins deux conduites d'air, également appelées injecteurs d'air, avec des diffuseurs à bulles, et un injecteur supplémentaire dans le conteneur du biofiltre.

Nwestwood (2010) a proposé une méthode de dimensionnement basée sur la consommation d'oxygène (O<sub>2</sub>) par les poissons et les bactéries. Cette méthode indique que 0,025 kg d'O<sub>2</sub> est nécessaire par kg d'aliments pour les poissons, 0,012 kg d'O<sub>2</sub> par kg d'aliments pour les bactéries nitrifiantes, et environ 0,13 kg d'O<sub>2</sub> par kg d'aliments pour les bactéries hétérotrophes (pouvant aller jusqu'à 0,5 kg). Selon Timmons & Ebeling (2010), l'ammoniac est lié au taux d'alimentation des poissons. En cas de non-alimentation du système, la consommation d'oxygène diminue d'environ 50 % et la production de matières fécales diminue d'environ 10 fois par jour une fois que l'activité d'alimentation a cessé.

L'auteur de *Recirculating Aquaculture* recommande un rapport de 1,0 kg d'oxygène pour 1,0 kg d'aliments dans les systèmes d'aquaculture à recirculation pure (RAS) pour assurer la sécurité. La température, la pression barométrique, la salinité et l'altitude ont toutes un impact direct sur les concentrations en oxygène dans l'air et l'eau (Secondat, 1952 ; M'balaka, Kassam, & Rusuwa, 2012 ; Rebouças, Lima, Cavalcante, & Sá, 2015).

## **1.7 L'aquaculture**

### **1.7.1 Définition**

L'aquaculture est un terme général qui englobe toutes les activités de production animale ou végétale en milieu aquatique. Cela inclut diverses filières, notamment :

- Pisciculture : l'élevage de poissons ; conchyliculture : l'élevage de coquillages ; l'élevage des crustacés et la culture d'algues (algoculture).

Le terme aquaculture est également défini comme « l'art de multiplier et d'élever les animaux et les plantes aquatiques » (Behmene, 2020).

## **1.7.2 Aperçu général sur la production des Tilapias :**

### **1.7.2.1 Présentation générale**

Le tilapia est un poisson à croissance relativement rapide qui se nourrit principalement au bas de la chaîne alimentaire. Son régime alimentaire comprend des plantes, des détritiques organiques, des larves d'insectes, des crustacés, des mollusques et des vers (Courtenay et Hensley, 1980).

Les tilapias peuvent être élevés dans des zones où de l'eau est disponible, et certaines espèces ont même la capacité de s'adapter à des eaux saumâtres ou salées. La principale contrainte pour leur élevage est thermique, avec une plage de température idéale comprise entre 28 et 32°C, et des températures minimales et maximales respectivement de 15°C et 38°C (Albaret, 1982).

Ces poissons se trouvent naturellement dans les lacs, les rivières et les rizières des régions tropicales d'Afrique et d'Asie, où la température de l'eau varie généralement entre 20 et 25°C. Certaines espèces peuvent même survivre dans des eaux où la teneur en oxygène est très faible, voire dans des sources chaudes atteignant jusqu'à 40°C (Lazard, 2009).

### **1.7.2.2 Aperçu historique du tilapia en Algérie**

Les premières introductions du tilapia en Algérie remontent au début des années 1960 avec des *Tilapia mozambicain* et *Zilli* importés de France. Ces introductions ont été réalisées à titre expérimental par J. Araïgnon et ont été effectuées à Ain Skhouna (W. Saida), ainsi que dans les wilayas de Biskra et El Oued (Boutouchent, 2002).

Actuellement, on trouve ces espèces dans ces trois grandes wilayas, principalement dans les canaux d'irrigation où l'exploitation reste traditionnelle et la consommation locale. Cependant, le développement de ces deux espèces dans le domaine piscicole est limité, car elles n'atteignent pas les tailles de marché recherchées par les consommateurs.

Les résultats de l'expérience avec le tilapia en Algérie, notamment dans le cadre du Plan National de Développement de l'Aquaculture (PNDA) et sa composante « pisciculture en zone saharienne », démontrent ces limites de développement de l'aquaculture dans certaines régions du pays.

L'introduction du tilapia s'est effectuée par voie aérienne depuis Le Caire jusqu'à Alger, avec un lot initial de 4000 alevins et 200 géniteurs. Ces poissons ont été entreposés dans un

premier temps à la station du Mazafran (ONDPA) et au CNRDPA de Bou-Ismaïl pour des raisons sanitaires (Boutouchent, 2002).

Ces poissons ont ensuite été distribués aux agriculteurs qui avaient des ressources en eau pour l'irrigation. Le Tilapia a été réparti selon le programme national de repeuplement qui comprend deux parties :

L'un concerne les barrages et les retenues collinaires où des lâchers de carpes chinoises et de mulot ont été réalisés au nord et dans la région des hautes plateaux d'Algérie.

Le second concerne les zones semi-arides et du Sahara, où le Tilapia a été introduit principalement pour l'élevage en tant qu'activité intégrée aux activités agricoles, notamment dans les villes de Djelfa, Biskra, el oued, Ouargla et Ghardaïa.

Ces introductions sont suivies à la fois par les directions de la pêche et des ressources halieutiques de Willaya.

Ce Tilapia, peu exigeant en termes de conditions d'élevage et non nécessitant de qualification en matière de conduite, présentera plusieurs bénéfices :

- \* La diversification des systèmes de production agricole par l'introduction d'activités d'élevage de poissons ;
- \* La production d'humus pour les sols arables par les excréments des poissons ;
- \* Une meilleure utilisation de l'espace rural ;
- \* La fixation des populations rurales par la création d'emplois.

Le Tilapia du Nil est perçu comme une espèce durable qui s'adapte au climat des régions arides et semi-arides en Algérie, offrant ainsi un rendement très intéressant.

Il est certain que le développement de cette espèce et la maîtrise de son élevage apporteront une valeur ajoutée à la pisciculture au Sud Algérien.

L'élevage à grande échelle du Tilapia permettra d'accroître la consommation alimentaire des populations rurales du Sud Algérien. Les futurs éleveurs peuvent bénéficier des effets économiques, sociaux, nutritionnels et environnementaux du Tilapia. On considère ce poisson comme un poisson du siècle (Boutouchent, 2002).

### **1.7.2.3 Production mondiale de tilapia**

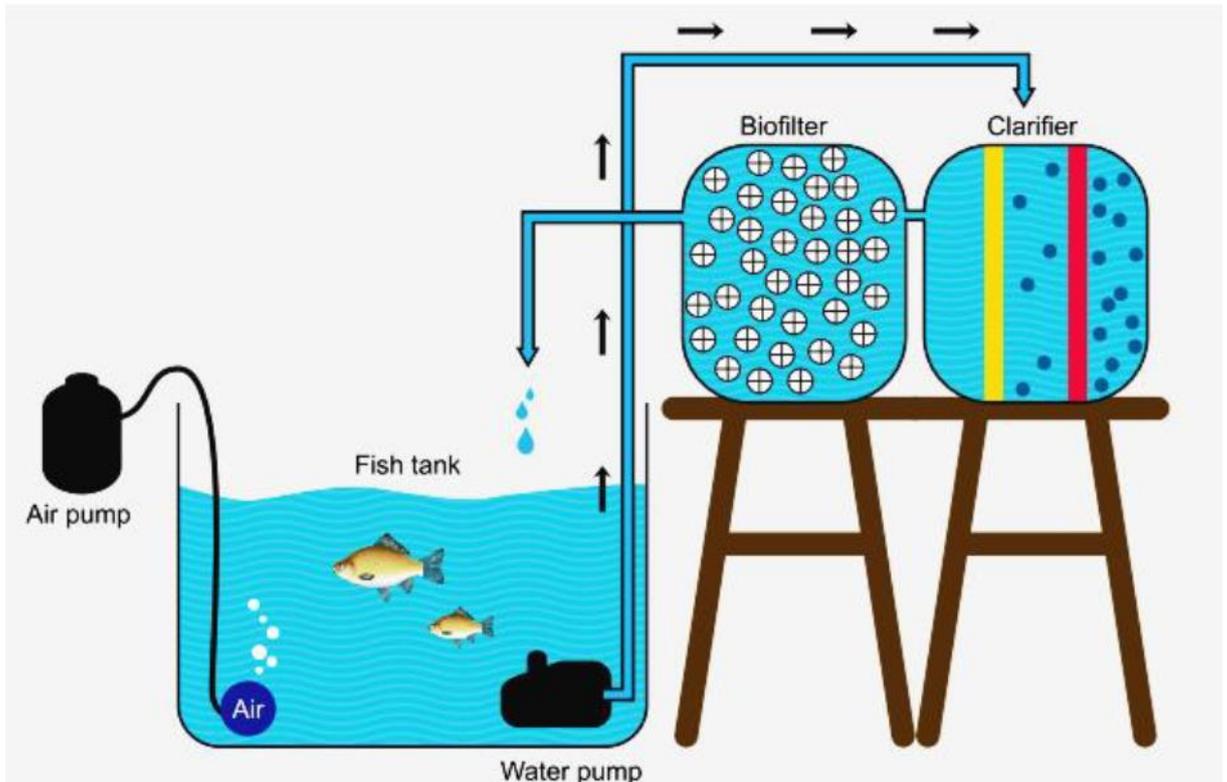
En 2015, les tilapias se sont classés troisièmes au niveau mondial en termes de production aquacole, après les Cyprinidés et les Salmonidés. La production mondiale de tilapia a considérablement augmenté depuis les années 80, atteignant 3 670 259 tonnes en 2014 (FAO, 2017b). Sur le plan géographique, l'Asie représente plus de 80 % de la production

mondiale de tilapia, avec la Chine comme principal producteur, atteignant 1 million de tonnes. En revanche, bien que l'Afrique soit le continent d'origine des tilapias, la production y reste encore très limitée, à l'exception de l'Égypte et du Zimbabwe (FAO, 2017b).

### **1.8 Aquaculture en recirculation (RAS)**

#### **1.8.1 C'est quoi l'aquaculture en recirculation ?**

Le concept de systèmes d'aquaculture en recirculation (RAS) a été développé dans les années 1950 pour apporter une réponse à la pénurie d'eau et au rejet de déchets de l'aquaculture ouverte (par opposition à la recirculation) dans l'environnement (Joyce *et al.*, 2019a). Les systèmes d'aquaculture en recirculation (**Figure 13**) sont des systèmes intensifs dans lesquels l'eau, au lieu de s'écouler régulièrement dans les aquariums et d'être directement rejetée dans l'environnement, circule à travers plusieurs unités de traitement avant d'être renvoyée, nettoyée, aux poissons. Les principaux composants d'un système d'aquaculture à recirculation sont les suivants : un ou plusieurs aquariums, un filtre mécanique pour éliminer les matières en suspension telles que les excréments des poissons, les restes d'aliments et autres particules, un filtre biologique dans lequel les bactéries convertissent d'abord l'ammoniac excrété par les poissons en nitrite puis en nitrate (moins toxique pour les poissons) et enfin en dispositifs d'échange gazeux (Espinal et Matulić, 2019). D'autres dispositifs optionnels peuvent être ajoutés, tels que des lampes ultraviolettes (UV) pour la désinfection du système et des filtres de dénitrification pour transformer le nitrate en forme gazeuse d'azote et ainsi éviter une accumulation excessive de nitrates dans l'eau des poissons (Espinal et Matulić, 2019 ; van Rijn, 2013).



**Figure 13** : Système d'aquaculture en recirculation (Somerville *et al.*, 2014).

## 1.9 Aperçue du Tilapia (*Oreochromis niloticus*) en aquaponie

Face à l'augmentation de la demande de poisson et de fruits de mer dans le monde entier, l'aquaculture est considérée comme une industrie à croissance rapide et se développe à un rythme plus rapide que les autres domaines liés à l'élevage (Qin *et al.*, 2005).

Le tilapia (*Oreochromis niloticus*) est l'une des espèces de poissons les plus cultivées de manière extensive et est cultivée depuis plus de 3 000 ans. Le tilapia est originaire d'Afrique et du Moyen-Orient et constitue un type de poisson utilisé avec succès dans le système aquaponique (Delis *et al.*, 2015 ; Liang et Chien 2013 ; Love *et al.*, 2015 ; Wang *et al.*, 2016).

Le poisson le plus élevé en aquaponie est le tilapia du Nil (*Oreochromis niloticus*) en raison de sa grande tolérance au stress, aux changements de paramètres de l'eau et au surpeuplement et est principalement associé à des légumes à feuilles (Ghamkhar *et al.*, 2019).

Le tilapia du Nil est bien cultivé dans un système aquaponique utilisant des légumes, à un rendement économique élevé et une bonne tolérance à diverses conditions environnementales (Diver, 2006). Le tilapia est vendu sur les marchés internationaux pour la

consommation et assure le bien-être des agriculteurs marginaux en ouvrant la voie à un élevage à tous les niveaux des systèmes de production.

La quantité de nitrate produite dans un système de pisciculture est directement proportionnelle à la quantité ou à la densité de poissons dans le système ainsi qu'à la quantité et à la teneur en protéines de la nourriture (Endut *et al.*, 2010 et Timmons (1996 et 2002), le tilapia du Nil a la capacité tolérer différentes conditions environnementales, comme des températures d'eau variables, une tolérance aux maladies et une tolérance élevée aux niveaux de pH allant de 5 à 11 (Liang et Chien, 2013 ; Effendi *et al.*, 2016). Dans les exploitations agricoles commerciales, les concentrations élevées d'ammoniac, les larges plages de salinité, les plages de températures de l'eau et les faibles niveaux d'oxygène dissous ont moins d'impact sur le tilapia que sur les autres espèces de poissons cultivées (Popma et Masser, 1999).

Selon Lazard (2009), les poissons de type tilapias sont des poissons thermophiles qui peuvent supporter une grande variété de températures de l'eau. Dans son environnement naturel, cette espèce est capable de supporter des températures allant de 14 à 31 °C, mais peut également supporter des températures extrêmes allant jusqu'à 7 °C.

Il est mort à 41 °C pendant plusieurs heures. Cependant, la température optimale d'élevage pour *Oreochromis niloticus* se situe entre 28 et 32 °C.

La présence d'oxygène dissous (OD) est l'un des éléments environnementaux qui entravent l'alimentation, la croissance et le métabolisme des aquatiques. La variation dépend de la photosynthèse, de la respiration et des variations quotidiennes. D'après Tsadik & Kutty, 1987 et El-Sayed, 2006, il est essentiel de prendre en considération ces facteurs en ce qui concerne l'OD. Les poissons obtiennent les meilleures performances avec une plage d'OD ambiante (OD >5mg /l), tandis que de faibles niveaux d'OD restreignent la respiration, la croissance et d'autres activités métaboliques. Les tilapias sont réputés pour leur résistance à des niveaux d'OD extrêmement bas.

Pendant diverses périodes, la majorité des tilapias peuvent supporter des niveaux d'OD aussi bas que 0,1 à 0,5 mg / l (Abdel Magid & Babiker, 1975 ; El-Sayed, 2006).

Les tilapias sont capables de supporter une variété de pH assez étendue, mais se portent mieux entre 6,5 et 8,5. Des fluctuations importantes du pH sur de courtes périodes (des fluctuations de 0,3 sur une période de 12 à 24 heures) peuvent poser des problèmes, voire tuer les tilapias. Il est donc essentiel de maintenir le pH aussi stable que possible (Somerville et al., 2014). Le tamponnement avec du carbonate est conseillé afin d'éviter les grandes fluctuations de pH. Dans leur étude de 1988, Wangead, Geater et Tansakul ont examiné les conséquences

de l'eau acide sur la survie, le comportement et la croissance de deux groupes de poissons de tailles différentes : les juvéniles du tilapia du Nil (0,4 à 1,0 g) et les adultes (45,4 à 46,3 g).

Les alevins et les adultes ont été observés mourir à un pH de 2-3 en un à trois jours. Les deux tailles ont été très bien adaptées aux pH 4 à 5 et ont obtenu des taux de survie et de croissance comparables à ceux du groupe témoin (pH 7) après 60 à 70 jours. Les poissons adultes étaient cependant plus résistants que les juvéniles à un pH faible, avec 86,6 ; 100 et 100% respectivement à pH 4, 5 et 7, tandis que la survie des alevins était de 57,8 ; 82,2 et 84,5% respectivement à la même valeur de pH.

L'ammoniac représente la principale forme des déchets métaboliques émis par les branchies et les reins du poisson. Selon El-Sayed (2006), l'ammoniac émis pourrait prendre deux formes différentes : la forme  $\text{NH}_3$  non ionisée (UJA-N), qui est toxique pour les poissons, et la forme ionisée  $\text{NH}_4^+$ , qui est beaucoup moins toxique. Le pH est étroitement lié à la toxicité de l'ammoniac et, dans une certaine mesure, à la température de l'eau et à la concentration en oxygène dissous (Lim et Webster, 2006). En raison de niveaux d'oxygène dissous (OD) faibles, la toxicité de l'ammoniac augmente (Lim et Webster, 2006). Lorsque le pH dépasse la valeur neutre, une proportion croissante de l'ammoniac total est transformée de la forme ionique ( $\text{NH}_4^+$ ) en une substance toxique non toxique.

Selon Soderberg (1995), la toxicité tend à augmenter lorsque la température est élevée. Selon Lim et Webster (2006), la mortalité massive du tilapia survient quelques jours après leur introduction directe dans une eau contenant des concentrations d'ammoniac supérieures à 2 mg. L<sup>-1</sup>. Par ailleurs, une exposition prolongée (jusqu'à plusieurs semaines) à une concentration d'ammoniac non ionisé supérieure à 1 mg/L entraîne des pertes, notamment chez les alevins et les juvéniles, quand l'oxygène dissous (OD) est faible (Lim et Webster, 2006). En plus des risques de décès, l'ammoniac non ionisé, même à partir de 0,08 mg. L<sup>-1</sup>, peut provoquer une diminution de l'appétit chez le tilapia (Popma et Masser, 1999).

### **1.10 Quantité de poissons dans les systèmes aquaponiques**

Il est essentiel que les aquariums renferment une quantité d'eau suffisante pour la quantité de poissons qui est conservée dans le système. La densité de population adéquate variera selon les espèces de poissons. La densité de stockage du tilapia est généralement d'environ 60 kg de poisson par m<sup>3</sup> (Losordo *et al.*, 1998 ; Rakocy *et al.*, 2006). Les objectifs du système influencent également la densité de stockage. Les densités de tilapia peuvent

atteindre 200 kg/m<sup>3</sup> en aquaculture intensive, où les niveaux de production sont extrêmement élevés. Selon Schuilenburg (2012), il est permis d'atteindre une densité maximale de 20 kg/m<sup>3</sup> dans les cultures biologiques de Tilapia. Il arrive que l'on utilise un seul réservoir ; d'autres systèmes utilisent plusieurs réservoirs. Ceci autorise l'élevage successif de lots de poissons ou la présence de diverses espèces de poissons.

### 1.11 Aperçue de la laitue (*Lactuca sativa*) en aquaponie

La laitue est couramment cultivée et pousse bien dans les systèmes hydroponiques et aquaponiques. Les types typiques de laitue cultivée sont la bibb, la laitue à feuilles mobiles, l'iceberg et la romaine.

Les variétés à feuilles mobiles sont les plus faciles à cultiver et peuvent tolérer une température diurne de 27 °C sans montaison, flétrissement ou croissance lente. L'espacement peut être de 10 à 30 têtes par mètre carré. La laitue a une phase de croissance végétative de quatre à cinq semaines avant la récolte. Un bénéfice peut être réalisé en peu de temps par rapport au tilapia (4 à 6 semaines). La laitue (*Lactuca sativa*) est une plante commune cultivée dans les systèmes hydroponiques. C'est une plante rustique qui a un taux de croissance rapide (Resh, 2001). La laitue est la première salade cultivée et commercialisée à l'échelle internationale. La laitue a la capacité d'accumuler de l'azote et du phosphate. L'azote et le phosphate sont assimilés à partir du milieu de solution (Resh, 2001).

Cela fait de la laitue une bonne culture cible pour les systèmes aquaponiques avec une forte charge biologique et donc une forte accumulation d'azote. Les facteurs biotiques (génétique, croissance et maladie) et abiotiques (température, lumière, potentiel hydrique, disponibilité des nutriments) influencent la croissance et le développement des plantes. Ces facteurs peuvent également influencer les concentrations de pigments dans les plantes.

La laitue pousse mieux à des températures de l'air comprises entre 16 et 25 °C et se maintient à une température de l'air supérieure à 25 – 28 °C (Resh, 2001). La laitue s'envole (fleurit) à des températures de l'air élevées (25-28 °C), ce qui rend sa croissance difficile dans les climats et les saisons chauds (Resh, 2001). La recherche a montré qu'en maintenant la température de la zone racinaire à des niveaux optimaux, même si la température de l'air est élevée, une croissance appropriée peut être obtenue. La laitue iceberg était capable de croître correctement et de former des têtes compactes lorsque la température de la zone racinaire était

maintenue entre 15 et 17 °C, même si la température de l'air était entre 25 et 39 °C (Marsic et Osvald, 2002).

La température affecte la stabilité des pigments de la laitue. Des températures plus élevées entraînent une dégradation accrue des pigments (Licamele, 2009). La coloration et la valeur nutritionnelle sont des paramètres marketing importants pour la laitue. La coloration (intensité et uniformité) et la valeur nutritionnelle sont liées aux niveaux de chlorophylle et d'anthocyanes (Simonne *et al.*, 2002). Les concentrations d'anthocyane et de chlorophylle dans la laitue sont affectées par la génétique de la plante ainsi que par les conditions de croissance (Dela et al, 2003). Le génotype, la température et la lumière peuvent influencer le changement des niveaux de pigment indépendamment les uns des autres ou de manière synergique (Crozier *et al.*, 1997). La température peut affecter les niveaux d'anthocyane et de chlorophylle dans la laitue, ce qui a un impact négatif sur la qualité et la nutrition. Les fluctuations de la température de l'air diurne et nocturne (30/20 °C) entraînent des concentrations d'anthocyanine et de chlorophylle b plus élevées qu'une température de l'air jour/nuit constante (30 ou 20 °C) (Gazula *et al.*, 2005). Cela suggère que les effets sur la qualité et la nutrition des températures élevées de l'air diurne peuvent être atténués par de basses températures nocturnes. La température affecte la stabilité du pigment. Des températures plus élevées entraînent une dégradation accrue des pigments (Shaked-Sachray *et al.*, 2002). Une tête de laitue commercialisable pèse au minimum 150 grammes et peut être obtenue 3 à 4 semaines après la transplantation dans des conditions de croissance optimales (Both *et al.*, 1994; Resh, 2001).

Les besoins nutritionnels des plantes varient selon les différents stades de développement.

L'azote est le nutriment le plus essentiel qui favorise la croissance et l'élongation des plantes. L'azote fait partie d'un grand nombre de composés organiques vitaux tels que les acides aminés, les protéines, les coenzymes, les acides nucléiques et la chlorophylle (Resh 2001). Des niveaux de phosphore supérieurs à 15-30 mg kg<sup>-1</sup> sont suffisants pour la plupart des cultures agronomiques (Ludwick, 2002). La laitue a des besoins en phosphore plus élevés pour une croissance maximale. Le phosphore joue un rôle essentiel dans la synthèse de composés organiques tels que les sucres phosphates, l'ATP, les acides nucléiques, les phospholipides et les coenzymes (Resh, 2001). Les seuils de besoins en phosphore vont de 35 mg kg<sup>-1</sup> (Ludwick, 2002) à 80 mg kg<sup>-1</sup> (McPharlin *et al.*, 1996) pour la laitue. Cela peut varier en fonction du support de culture et de la saison. Une carence en phosphore retardera la croissance, la floraison ou la nouaison. Il a été constaté que le fer est le nutriment limité dans

les systèmes aquaponiques à recirculation (Fitzsimmons et Posadas, 1997). Par conséquent, un système aquaponique à recirculation nécessitera une supplémentation en fer sur une période prolongée. Le fer est nécessaire à la synthèse de la chlorophylle et constitue un élément essentiel des cytochromes qui sont des porteurs d'électrons lors de la photosynthèse et de la respiration (Resh, 2001).

### **1.12 Cycle des nutriments en aquaponie**

Malgré deux atouts intéressants (le recyclage des effluents aquacoles et le recours aux engrais organiques pour la croissance des plantes), l'utilisation des effluents aquacoles augmente le défi du suivi des nutriments au sein de la solution. En effet, il est plus difficile de contrôler la composition d'une solution où les nutriments proviennent d'une dégradation biologique de la matière organique que de suivre l'évolution de la concentration en nutriments dans une solution hydroponique précisément dosée à base de composés minéraux (Bittsanszky et al., 2016 ; Timmons et Ebeling, 2013). De plus, les besoins nutritionnels d'une plante varient au cours de la période de croissance en fonction des stades physiologiques, et il est nécessaire de répondre à ces besoins pour maximiser les rendements (Bugbee, 2004 ; Zekki et al., 1996). Afin de recycler les effluents aquacoles pour produire de la biomasse végétale, il est nécessaire d'optimiser les taux de recyclage du phosphore et de l'azote (Goddek et al., 2019a, 2016 ; Graber et Junge, 2009). Plusieurs facteurs peuvent influencer ce phénomène, comme l'espèce de poisson, la densité de poissons, la température de l'eau, le type de plantes et la communauté microbienne. Il est donc primordial de comprendre le fonctionnement des cycles nutritifs en aquaponie (Seawright *et al.*, 1998).

#### **1.12.1 Source de nutriments**

Les principales sources de nutriments dans un système aquaponique sont l'alimentation des poissons et l'eau ajoutée (contenant du Mg, Ca, S) dans le système (Delaide *et al.*, 2017 ; Schmautz *et al.*, 2016). En ce qui concerne l'alimentation des poissons, il existe deux principaux types : l'alimentation à base de farine de poisson et l'alimentation à base de plantes. La farine de poisson est le type d'alimentation classique utilisé en aquaculture où les lipides et les protéines dépendent de la farine de poisson et de l'huile de poisson (Geay *et al.*, 2011). Cependant, depuis un certain temps déjà, des inquiétudes concernant la durabilité de cette alimentation ont été soulevées et l'attention s'est portée sur les régimes à base de plantes

(Boyd, 2015 ; Davidson *et al.*, 2013 ; Hua et Bureau, 2012 ; Tacon et Metian, 2008). Une méta-analyse menée par (Hua et Bureau, 2012) a révélé que l'utilisation de protéines végétales dans l'alimentation des poissons peut influencer la croissance des poissons si elles sont incorporées en proportions élevées. En effet, les protéines végétales peuvent avoir un impact sur la digestibilité et les niveaux de facteurs antinutritionnels de l'aliment. En particulier, le phosphore provenant des plantes et donc sous forme de phytates ne bénéficie pas, par exemple, au saumon, à la truite et à plusieurs autres espèces de poissons (Timmons et Ebeling, 2013). Il n'est pas surprenant que cette observation dépende fortement de l'espèce de poisson et de la qualité des ingrédients (Hua et Bureau, 2012). Cependant, on sait peu de choses sur l'impact de la variation de la composition de l'aliment pour poissons sur le rendement des cultures (Yildiz *et al.*, 2017b). L'aliment classique pour poissons est composé de 6 à 8 macro-ingrédients et contient 6 à 8 % d'azote organique, 1,2 % de phosphore organique et 40 à 45 % de carbone organique (Timmons et Ebeling, 2013) avec environ 25 % de protéines pour les poissons herbivores ou omnivores et environ 55 % de protéines pour les poissons carnivores (Boyd, 2015). Les lipides peuvent également être d'origine animale ou végétale (Boyd, 2015).

Une fois que l'alimentation des poissons est ajoutée dans le système, une partie substantielle est consommée par le poisson et soit utilisée pour la croissance et le métabolisme, soit excrétée sous forme de matières fécales solubles et solides, tandis que le reste de la nourriture donnée se décompose dans les réservoirs. (Goddek *et al.*, 2015; Schneider *et al.*, 2004). Dans ce cas, les résidus d'aliments et les produits métaboliques sont partiellement dissous dans l'eau aquaponique, ce qui permet aux plantes d'absorber les nutriments directement à partir de la solution aquaponique. (Schmautz *et al.*, 2016). Dans la plupart des systèmes de culture (Goddek *et al.*, 2019b; Palm *et al.*, 2019), des nutriments peuvent être ajoutés pour compléter la solution aquaponique et assurer une meilleure correspondance avec les besoins des plantes. (Goddek *et al.*, 2015). En effet, même lorsque le système est couplé, il est possible d'ajouter du fer ou du potassium (qui sont souvent manquants) sans nuire aux poissons (Schmautz *et al.*, 2016).

### 1.12.2 Processus microbiologiques

#### 1.12.2.1 Solubilisation

La solubilisation consiste à décomposer les molécules organiques complexes composant les déchets des poissons et les restes d'aliments en nutriments sous forme de minéraux ioniques que les plantes peuvent absorber (Goddek *et al.*, 2015 ; Somerville *et al.*, 2014). Tant en aquaculture (Sugita *et al.*, 2005 ; Turcios et Papenbrock, 2014) qu'en aquaponie, la solubilisation est principalement réalisée par des bactéries hétérotrophes (Joyce *et al.*, 2019b ; van Rijn, 2013) qui n'ont pas encore été complètement identifiées (Goddek *et al.*, 2015). Certaines études ont commencé à déchiffrer la complexité de ces communautés bactériennes (Schmautz *et al.*, 2017). Dans l'aquaculture actuelle, les bactéries les plus couramment observées sont *Rhizobium sp.*, *Flavobacterium sp.*, *Sphingobacterium sp.*, *Comamonas sp.*, *Acinetobacter sp.*, *Aeromonas sp.* Français et *Pseudomonas sp.* (Sugita *et al.*, 2005). Un exemple du rôle majeur des bactéries en aquaponie pourrait être la transformation des phytates insolubles en phosphore rendu disponible pour l'absorption par les plantes grâce à la production de phytases qui sont particulièrement présentes dans les  $\gamma$ -protéobactéries (Jorquera *et al.*, 2008). D'autres nutriments que le P peuvent également être piégés sous forme de solides et évacués du système avec les boues. Des efforts sont donc faits pour reminéraliser ces boues avec des réacteurs UASB-EGSB (upflow anaerobic sludge blanket and expanded granular sludge bed) afin de réinjecter des nutriments dans le système aquaponique (Delaide *et al.*, 2019, 2017 ; Goddek *et al.*, 2016). De plus, les différents minéraux ne sont pas libérés au même rythme, selon la composition de l'aliment, ce qui conduit à un suivi plus compliqué de leur concentration dans la solution aquaponique (Seawright *et al.*, 1998).

#### 1.12.2.2 Nitrification

La principale source d'azote dans un système aquaponique est la nourriture des poissons et les protéines qu'elle contient (Goddek *et al.*, 2015 ; Yildiz *et al.*, 2017a). Idéalement, 100 % de cette nourriture devrait être consommée par les poissons. Cependant, il a été observé que les poissons n'utilisent qu'environ 30 % de l'azote contenu dans la nourriture donnée (Rafiee et Saad, 2005). La nourriture ingérée est en partie utilisée pour l'assimilation et le métabolisme (Wongkiew *et al.*, 2017), tandis que le reste est excrété soit par les branchies, soit sous forme d'urine et de matières fécales (Ru *et al.*, 2017). L'azote excrété par les branchies se présente principalement sous forme d'ammoniac,  $\text{NH}_3$  (Wongkiew *et al.*,

2017 ; Yildiz *et al.*, 2017b), tandis que l'urine et les fèces sont composées d'azote organique (Wongkiew *et al.*, 2017) qui est transformé en ammoniac par des protéases et des désaminases (Sugita *et al.*, 2005). En général, les poissons excrètent de l'azote sous forme de TAN, c'est-à-dire  $\text{NH}_3$  et  $\text{NH}_4^+$ . Français L'équilibre entre  $\text{NH}_3$  et  $\text{NH}_4^+$  dépend principalement du pH (l'ammonium est la forme privilégiée lorsque le pH est compris entre 2 et 7 et de la température. L'ammoniac est le principal déchet produit par le catabolisme des protéines alimentaires des poissons (Yildiz *et al.*, 2017b). La nitrification est un processus en deux étapes au cours duquel l'ammoniac  $\text{NH}_3$  ou l'ammonium  $\text{NH}_4^+$  excrété par les poissons est transformé d'abord en nitrite  $\text{NO}_2^-$  puis en nitrate  $\text{NO}_3^-$  par des bactéries autotrophes chimiosynthétiques aérobies spécifiques. Une grande disponibilité d'oxygène dissous est nécessaire car la nitrification consomme de l'oxygène ( Madigan et Martinko, 2007).

La première étape de cette transformation est réalisée par des bactéries oxydantes d'ammoniac (AOB) telles que *Nitrosomonas*, *Nitrosococcus*, *Nitrospira*, *Nitrosolobus* et *Nitrosovibrio*. La deuxième étape est réalisée par des bactéries oxydantes de nitrites (NOB) telles que *Nitrobacter*, *Nitrococcus*, *Nitrospira* et *Nitrospina* (Timmons et Ebeling, 2013 ; Wongkiew *et al.*, 2017). On considère actuellement que *Nitrospira* est un nitrificateur complet, c'est-à-dire qu'il est impliqué dans la production de nitrites et de nitrate (Daims *et al.*, 2015). Les mêmes bactéries peuvent être trouvées à la fois dans l'aquaculture et dans les systèmes aquaponiques (Wongkiew *et al.*, 2017). Ces bactéries se trouvent principalement dans les biofilms fixés aux milieux composant le biofiltre mais peuvent également être observées dans les autres compartiments du système (Timmons et Ebeling, 2013). La nitrification est d'une importance primordiale en aquaponie car l'ammoniac et les nitrites sont assez toxiques pour les poissons : 0,02–0,07 mg/L d'azote ammoniacal est suffisant pour observer des dommages chez les poissons d'eau chaude, et l'azote nitrique doit être maintenu en dessous de 1 mg/L (Losordo *et al.*, 1998 ; Timmons et Ebeling, 2013).

L'ammoniac affecte le système nerveux central des poissons (Randall et Tsui, 2002 ; Timmons et Ebeling, 2013), tandis que les nitrites induisent des problèmes de fixation de l'oxygène (Losordo *et al.*, 1998). Le nitrate-azote est, d'autre part, toléré par les poissons jusqu'à 150-300 mg/L (Goddek *et al.*, 2015 ; Graber et Junge, 2009 ; Yildiz *et al.*, 2017b). La nitrification a principalement lieu dans des biofiltres (Losordo *et al.*, 1998 ; Timmons et Ebeling, 2013). Par conséquent, lors du démarrage d'un système, il est recommandé de faire fonctionner le système sans poisson au début afin de permettre à la population de bactéries nitrifiantes à croissance lente de s'établir (Timmons et Ebeling, 2013 ; Wongkiew *et al.*, 2017). Il est également nécessaire d'éviter autant que possible la présence de matière

organique dans les biofiltres afin d'empêcher la croissance de bactéries hétérotrophes hautement compétitives (Timmons et Ebeling, 2013). Alternativement, des mélanges commerciaux de bactéries nitrifiantes peuvent être ajoutés au système, avant le stockage, pour accélérer le processus de colonisation (Kuhn *et al.*, 2010). Néanmoins, il existe également de petits systèmes aquaponiques sans biofiltre. Dans ces systèmes, les bactéries nitrifiantes forment des biofilms sur les surfaces disponibles (par ex. parois des compartiments hydroponiques, milieux inertes lors de l'utilisation de la technique du lit de milieu) (Somerville *et al.*, 2014).

### **1.13 Equilibre de masse : qu'arrive-t-il aux nutriments une fois qu'ils entrent dans le système aquaponique ?**

Le fonctionnement des systèmes aquaponiques repose sur un équilibre dynamique des cycles nutritionnels (Somerville *et al.*, 2014). Il est donc nécessaire de comprendre ces cycles pour optimiser la gestion des systèmes. Les plantes qui poussent hydroponiquement ont des exigences spécifiques qui doivent être satisfaites au cours de leurs différentes phases de croissance (Resh, 2013). Par conséquent, les concentrations de nutriments dans les différents compartiments du système doivent être surveillées de près, et les nutriments doivent être complétées pour prévenir les carences (Resh, 2013; Seawright *et al.*, 1998) soit dans l'eau du système, soit par application sur les feuilles.

Selon Delaide *et al.* (2016), dans certains cas, la supplémentation d'une solution aquaponique avec des nutriments minéraux afin d'atteindre les mêmes concentrations nutritives que dans l'hydroponie pourrait conduire à des rendements plus élevés que ceux obtenus en hydroponie. La première étape vers un système équilibré est la bonne conception et la dimension relative des compartiments (Buzby and Lin, 2014). Si le compartiment hydroponique est trop petit par rapport aux réservoirs de poissons, les nutriments s'accumulent dans l'eau et peuvent atteindre des niveaux toxiques. Le ratio du taux d'alimentation (c.-à-d. la quantité d'aliments pour poissons dans le système en fonction de la surface de culture et du type de plante) est souvent utilisé pour la première dimensionnement du système. (Rakocy *et al.*, 2006; Somerville *et al.*, 2014). Toutefois, selon Seawright *et al.* (1998), il n'est pas possible d'atteindre un rapport entre les végétaux et les poissons qui permettra de correspondre de manière optimale aux besoins des plantes si seuls les aliments de poisson sont utilisés comme ingrédients. Pour s'assurer que le système est bien équilibré et

fonctionne correctement, les méthodes de surveillance sont généralement basées sur le cycle de l'azote (Cerozi et Fitzsimmons, 2017; Somerville *et al.*, 2014), mais pour assurer le fonctionnement optimal du système, il est nécessaire de surveiller plus étroitement l'équilibre des autres macronutriments (P, K, Ca, Mg, S) et des micronutriments (Fe, Zn, B, Mn, Mo, Cu) (Resh, 2013; somerville, 2014; Sonneveld et Voogt, 2009) également.

### **1.13.1 Facteurs influençant les cycles de nutriments**

L'intensité lumineuse, la température de la zone racinaire, la température de l'air, la disponibilité des nutriments, le stade et la vitesse de croissance influencent tous l'absorption des nutriments par une plante (Buzby et Lin, 2014). Des expériences menées par Schmautz et al. (2016) et Lennard et Leonard (2006) ont montré que la méthode hydroponique pouvait également jouer un rôle dans la capacité d'absorption des nutriments par une plante, et il est donc nécessaire d'adapter le système de culture au type de légumes cultivés. La NFT et la DWC (culture en eau profonde – radeau) conviennent ainsi aux légumes à feuilles, tandis que l'irrigation goutte à goutte sur des plaques de laine de roche est plus adaptée aux légumes fruitiers (Resh, 2013).

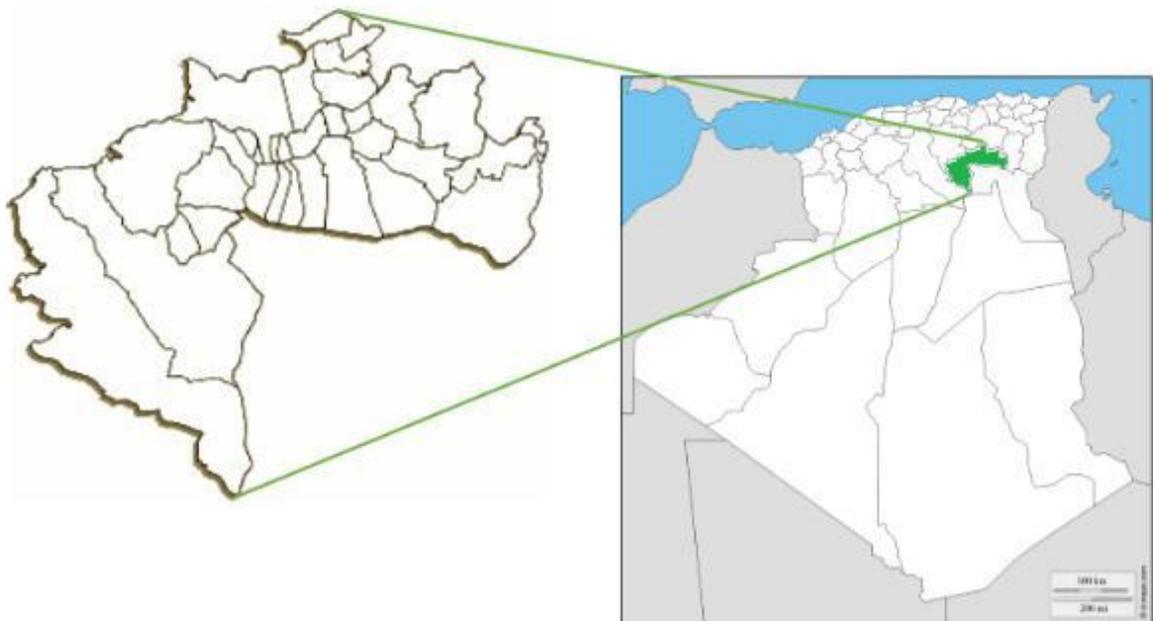
# **MATÉRIELS ET MÉTHODES**

## 1 Présentation du milieu d'étude

Cette expérience a été menée du 22 novembre 2021 au 17 janvier 2022, en serre au département des sciences agronomiques de l'université de Biskra

Biskra est une zone aride du nord-est du Sahara algérien, avec une superficie de 3 000 kilomètres carrés (**figure 14**). Elle se trouve entre la latitude 33°19' – 35°17' N et la longitude 4°07' – 6°48' E, à 120 m au-dessus du niveau de la mer Méditerranée. La zone d'étude présente un climat désertique chaud selon la classification de Koppen. La pluviométrie moyenne annuelle est rarement supérieure à 150 mm, l'évaporation annuelle moyenne est de 2,5 mille mm, et la température moyenne varie de 11 °C (mois le plus froid : janvier) à 35 °C (mois le plus chaud : juillet).(Boudibi et al., 2021).

La serre a été érigée en 2020 avec une bâche en plastique, appuyée par une structure métallique. Elle se distingue par une surface de 70 m<sup>2</sup>, avec des dimensions de 14 m de long, 5 m de large et 3 m de haut. La façade principale abrite une porte qui permet d'accéder à l'avant de la serre. En haut de l'arrière-façade de la serre, un ventilateur à deux fenêtres est installé, avec une construction insecte-proof, afin de garantir une aération sans intrusion des ravageurs. Un thermomètre est installé au centre de la serre afin de surveiller les fluctuations de la température.



**Figure 14** : Localisation géographique de la région de Biskra (BENMEHAIA et ATALLAOUI K, 2018)

## **2 Matériels biologiques**

### **2.1 Le Tilapia (*Oreochromis niloticus*)**

Notre modèle d'étude est un poisson d'eau douce, originaire du continent africain. Il a été introduit, durant la deuxième moitié du 20<sup>ème</sup> siècle dans plusieurs régions du monde : tropicales, subtropicales et tempérées (Lazard, 1990).

*Oreochromis niloticus* a une répartition originelle strictement africaine couvrant les bassins du Nil, du Tchad, du Niger, de la Volta et du Graben Est africain jusqu'au lac Tanganyika (Lévêque et Paugy, 2006).

Son introduction en Algérie remonte au début des années 1960 avec des Tilapiasmozambicain et Zilli en provenance de France. Ces introduction ont été effectuées par J. Araignon à titre expérimentale et ont été déversés à Ain Skhouna (W.Saida) et dans les willayas de Biskra et El oued (Boutouchent, 2002).

Régime alimentaire : Chez les tilapias, l'activité de nourrissage et la prise alimentaire sont fortement influencées par les facteurs environnementaux tels que l'oxygène dissous, la température, la lumière et la disponibilité alimentaire (Kestemont & Baras, 2001; Madrid *et al.*, 2001; Houlihan *et al.*, 2001).

L'alimentation de *Oreochromis niloticus* en milieu naturel est essentiellement constituée de phytoplancton (Huchette & Beveridge, 2003; Ouattara *et al.*, 2009; Avit *et al.*, 2012). L'espèce peut aussi ingérer des sédiments riches en bactéries et diatomées surtout à l'étape d'alevin (0 à 5 g) (Lacroix, 2004). En milieu artificiel, elle est pratiquement omnivore valorisant divers déchets agricoles (tourteaux d'oléagineux, drèches de brasserie, farine de tomate, etc.) (Ouedraogo, 2000; Azaza *et al.*, 2006; Ble *et al.*, 2011; Bamba *et al.*, 2015). Elle peut aussi tirer profit des excréments de porc ou de volailles, de déchets ménagers, etc. (Mikolasek *et al.*, 2009; Ipungu *et al.*, 2015). En élevage, cette espèce accepte facilement des aliments composés (Lazard, 2009). Son acidité gastrique particulièrement forte lui permet d'être parmi les rares espèces à pouvoir digérer les cyanophycées (Iga-Iga, 2008). Cette capacité d'adaptation à divers aliments est à la base de sa haute potentialité pour la pisciculture.

En aquaculture intensive du Tilapia, la poste alimentation représente une part importante du coût de la production (Bamba *et al.*, 2008 ; Elegbe *et al.*, 2015). L'intérêt

économique de ce type d'élevage est donc très dépendant de la disponibilité et du coût des aliments (Azaza *et al.*, 2005). Le Tilapia requière au moins 30% de protéines dans leur ration alimentaire (Médale et Kaushik, 2009). La farine de poissons et le tourteau de soja sont les composants principales des aliments standards pour l'élevage des Tilapias (Azaza *et al.*, 2005).

Les tilapias sont des poissons rustiques qui présentent une grande prolificité. Ce sont des poissons d'eaux chaudes, douces ou saumâtres. *Oreochromis niloticus* peut s'adapter à une large variation des facteurs écologiques du milieu aquatique et peut coloniser des milieux extrêmement variés. Ils cessent de se reproduire en dessous de 22°C et de se nourrir en dessous de 16°C.

Ils sont particulièrement résistants aux conditions anoxiques de l'eau et peuvent survivre avec moins de 1 mg d'oxygène / litre même s'il est souhaitable de rester au-dessus de 3,5 - 4 mg/l. L'aquaculture du tilapia a l'avantage de s'adapter à tous les types de production : étangs, bassins, cages et enclos. Les deux systèmes d'élevage (extensif ou intensif) peuvent facilement être appliqués (Lazard, 1990)

Le Tilapia du Nil est considéré comme étant une espèce, à productivité durable qui s'adapte au climat des zones arides et semi – arides Algérien et son rendement est très intéressant. Le développement de cette espèce et la maîtrise de son élevage va certainement donner une valeur à potentialité piscicole au Sud Algérien.

### **2.1.1 Exigences physico-chimiques**

*Oreochromis niloticus* est une espèce relativement eurytope. Elle peut s'adapter à une large variation des facteurs écologiques du milieu aquatique, et peut coloniser des milieux extrêmement variés. Dans son habitat naturel, cette espèce peut supporter des températures comprises entre 14 et 31 °C, parfois des conditions extrêmes des températures de 7 à 41 °C pendant plusieurs heures. Toutefois, les meilleures performances de croissance sont observées entre 24 et 28 °C. L'optimum d'élevage est compris entre 28 et 32 °C pour *O. niloticus* (Lazard, 2009). Elle peut survivre dans des eaux dont la salinité est proche de 11,5 g/l (Mashaii *et al.*, 2016) et dont le pH varie de 8 à 11 (Lacroix, 2004). Cette espèce peut survivre durant plusieurs heures à des teneurs en oxygène dissous très faibles, de l'ordre de 0,1 mg/l (Lacroix, 2004).

## **2.2 La laitue (*Lactuca sativa*)**

Le choix de la laitue repose sur le fait que ce légume est parmi ceux qui se développent bien dans le système aquaponique (Maleshela et al., 2020). La production hydroponique a toujours été une excellente opportunité pour la laitue. En outre, elle se ajuste à des conditions plus difficiles, telles que celle des eaux plus pauvres en nutriments. Elle est considérée comme une culture majeure de l'aquaponie (Kloas et al., 2015).

La laitue (*Lactuca sativa*) est une plante qui appartient à la famille des Astéracées (ex-composées), division des magnoliophytes, et la classe des magnoliopsides, il s'agit d'un légume-feuille utilisé le plus souvent comme salade fraîche (Mou, 2008) et parfois cultivé pour ses tiges et ses graines (Fischer, 2018).

La laitue est une plante herbacée, annuelle, avec deux phases bien distinctes: la phase végétative, formant une pomme plus ou moins fermée, correspond au stade de développement utilisé pour la commercialisation, et la phase reproductrice au cours de laquelle la tige principale s'allonge (montaison) aboutit à la floraison et à la production de graines.

À l'origine, elle était cultivée par les Égyptiens de l'Antiquité, La laitue était considérée comme une mauvaise herbe dont les graines étaient utilisées pour produire de l'huile. Elle est devenue une culture vivrière importante, cultivée pour ses feuilles succulentes et ses graines riches en huile (Katz et Weaver, 2003).

Durant la phase végétative, la plante de laitue forme d'abord une rosette de feuilles entières. Puis survient la période de pomaison, au cours de laquelle se différencient les types de laitue et la phase reproductrice, au cours de laquelle la tige principale s'allonge pour aboutir à la floraison et la production de graines.

Au XIX<sup>e</sup> siècle, cinq cultigrupes botaniques ont été définies par quelques caractères morphologiques:

Les laitues pommées ; Les laitues grasses; les laitues romaines; les laitues à couper ; Les laitues tigent, ou laitues asperge ou celtuce (d'après Pitrat et Foury, 2004).

La phase florale de la laitue se déroule après la phase végétative. La tige s'allonge pour former une hampe florale avec des capitules contenant 10 à 15 fleurons ligulés jaunes. L'inflorescence s'ouvre une fois le matin, favorisant la fécondation. Les stigmates sont situés à l'intérieur du manchon des étamines. La graine, en réalité un fruit sec appelé akène, se

développe pendant environ deux semaines et est composée d'un corps brun foncé ou blanc-crème et d'un bec portant une aigrette. La vitesse de montaison dépend des conditions climatiques et des génotypes, avec une préférence pour les jours longs et les températures élevées.

### **3 Conception et fonctionnement du système aquaponique**

Le système aquaponique a été construit selon (Lennard, 2017 et Nichols et Lennard 2010). et a été conçu comme un « système à faible technologie : low-technology system » car il se caractérisait par : 1) la section hydroponique la plus simple ; 2) le manque d'énergie pour réguler la température de l'eau ; 3) l'absence de sondes pour l'évaluation continue de la qualité de l'eau ; 4) l'absence de sondes et de systèmes de gestion à distance ; et 5) l'absence de dispositifs d'assainissement de l'eau (UV, ozone).

Le système aquaponique était composé de deux principaux composants : une unité hydroponique basée de la technique du film nutritif (NFT) (décrit dans la section d'Hydroponic) et un système intégré de recirculation de l'aquaculture (RAS) pour la culture des poissons. Les composants de culture aquaponiques occupaient la majeure partie de la surface du sol de la serre.

La mise en place du système aquaponique débute avec l'assemblage une fois que les matériaux requis ont été obtenus. Après avoir installé le système, une étape consiste à effectuer un essai à vide, c'est-à-dire sans l'introduction de poissons ni de plantes, avant de démarrer le processus complet.

#### **3.1 La mise en place et démarrage de système aquaponique**

Le système aquaponique mis en œuvre dans notre expérimentation comprend un bassin d'élevage de poissons de 800 litres, relié à un réservoir de 300 litres agit comme un filtre mécanique pour éliminer les particules solides et minimiser autant que possible les débris en suspension afin que la formation d'agrégats n'ait pas d'impact sur le rendement des poissons et plantes dans le système (**figure 15**).

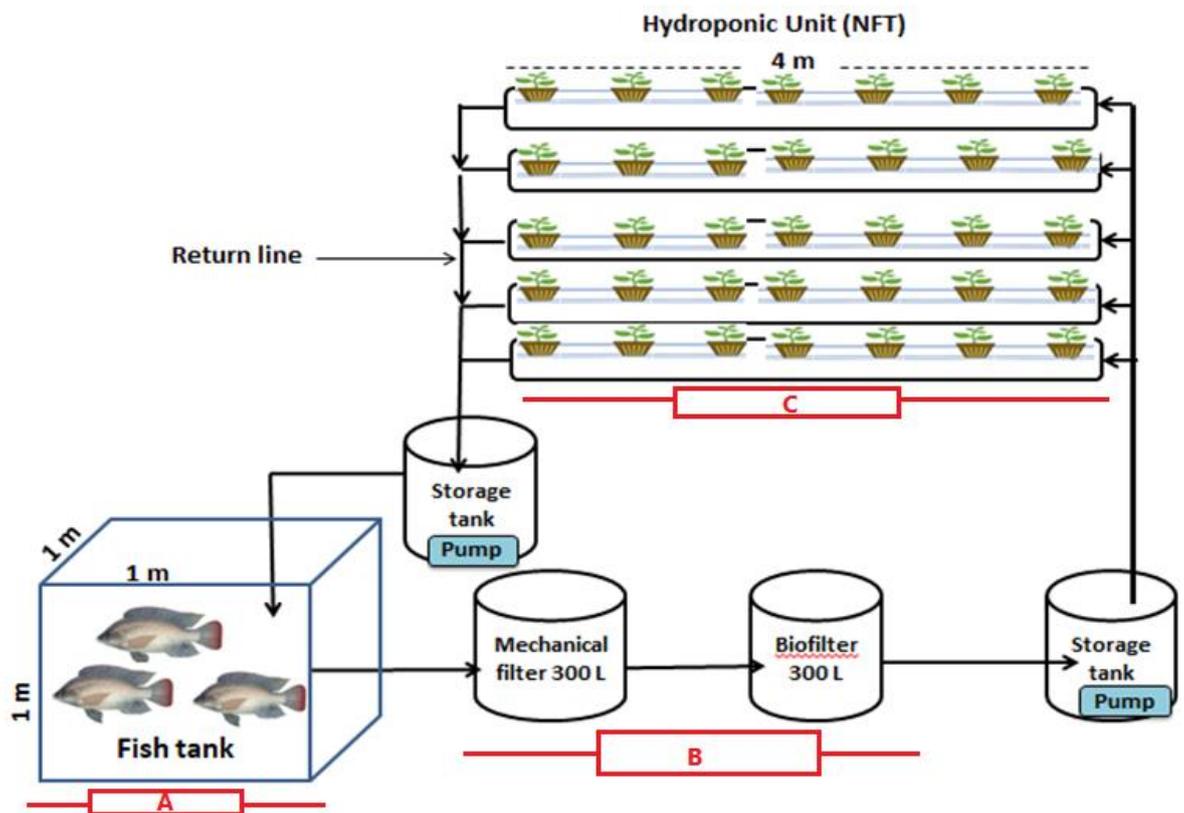
De plus, un récipient bio-filtrant (300 L) avec des bio-anneaux en plastique où les colonies de bactéries nitrifiantes convertissent l'ammoniac issu des déchets des poissons en nitrites, puis en nitrates moins toxiques. Les filtres biologiques à ruissellement peuvent convertir environ 1 à 2 grammes d'azote par mètre carré et par jour (Parker, 2002).

Pour la section horticole du système, une unité hydroponique avec la technique du film nutritif (NFT) a été intégrée.

Le système comprend également deux réservoirs de stockage d'eau, stratégiquement placés afin d'optimiser le débit d'eau. Chaque réservoir est équipé d'une pompe à eau immergée (capacité de 18 watts, débit de 2500 L/H, hauteur de chute maximale de 2,5 m).

Le premier réservoir, situé avant l'unité hydroponique, collecte la sortie du biofiltre et utilise la pompe à eau immergée pour transférer l'eau dans les unités hydroponiques. Le second réservoir, situé après l'unité hydroponique, recueille l'eau sortie du système hydroponique.

Toutes ces composantes du système ont été connectées par des tuyaux pour former un circuit fermé de l'eau.



**Figure 15 :** Diagramme schématique du système aquaponique de l'expérimentation et les directions du débit de l'eau. Section des poissons (A), système de filtration (B) et section des plantes (C).

## **4 Procédure de l'élevage**

### **4.1 Préparations de bassins d'élevage**

Le bassin d'élevage utilisé au cours de cette étude est en plastique d'une forme rectangulaire et de 1000 litres. Après le nettoyage et la désinfection des bassins, ils ont été remplis avec 800 litres de l'eau de robinet. Un aérateur a été installé dans chaque bassin pour assurer une oxygénation adéquate de l'eau.

Dans notre système, la circulation de l'eau se fait en circuit fermé. L'eau est pompée par la pompe du réservoir vers le bassin de poissons, ensuite elle descend par gravité vers le filtre mécanique, où les débris solides et les particules sont éliminés puis l'eau circule à travers le biofiltre. Après la filtration biologique, l'eau est collectée dans le deuxième réservoir avant d'être pompée vers l'unité hydroponique. L'eau est ensuite retournée au réservoir en amont du bassin de poissons.

la tuyauterie qui connecte les différents composants du système aquaponique se compose d'un tuyau de pression en PVC de 32 mm, de coudes en PVC de 32 mm, de vanne et de passe-paroi.

### **4.2 Stockage de poissons dans les bassins**

Les tilapias du Nil (*Oreochromis niloticus*) utilisés dans cette étude ont été aimablement fournis par une ferme piscicole à Biskra, où les tilapias ont été élevés dans un système d'aquaculture conventionnel.

Les tilapias ont été acclimatés aux conditions des bassins deux semaines avant le début de l'expérimentation sans plantes et ont été exploités comme un simple système d'aquaculture en recirculation (RAS), afin d'augmenter la concentration d'ammoniaque et favoriser la croissance des bactéries nitrifiantes dans le système.

Un total de 1350 alevins de tilapia du Nil, avec un poids moyen initial de 20 g, a été utilisé. Ces poissons ont étéensemencés à des densités de 1,5 kg/m<sup>3</sup> (75 poissons/m<sup>3</sup>), 3 kg/m<sup>3</sup> (150 poissons/m<sup>3</sup>), et 4,5 kg/m<sup>3</sup> (225 poissons/m<sup>3</sup>), désignées respectivement comme T1, T2 et T3.

Les bassins ont été maintenus quotidiennement et les filtres ont été régulièrement nettoyés des sédiments et particules afin d'éviter de boucher les tuyaux ou bien le substrat colmaté par les boues, ce qui permettrait aux racines de cet écosystème d'être désaérées

### **4.3 Nourrissage des poissons et contrôles**

Les poissons ont été nourris avec un aliment acheté de chez DZira Ponik SPA, Biskra, Algérie, sous forme de granulés flottants commerciaux d'une taille de 3,5 mm. La composition nutritionnelle de l'aliment était de 47,47 % de protéines, 11,87 % de matières grasses, 5,48 % de cendres, 5 % de fibres et 15,26 % d'humidité. la nourriture a été administrée manuellement aux différents groupes constitués. La quantité de nourriture quotidienne a été divisée en deux repas et distribuée de manière progressive à 10 heures et à 17 heures. Pendant l'expérience, Le taux d'alimentation quotidien correspondait à 3% de la biomasse du tilapia (HADJEB *et al.*, 2022).

## **5 Configuration de l'unité hydroponique NFT (escalier ou superposé)**

La méthode de culture adoptée pour notre système aquaponique, a été la technique du film nutritif (NFT) vertical sur un support en forme triangle.

Le système NFT vertical est constitué de dix canaux en PVC dont chacun a une longueur de 4 mètres et de 11 cm de diamètre dans lequel des trous ont été percés, à l'espacement approprié des plantes de 20 cm, et dans lesquels les pots contenant les plantes ont été placés plus tard. Les tubes sont placés par paires, avec cinq niveaux superposés dans une configuration pyramidale. Une distance de 40 cm a été maintenue entre chaque paire de canal.

La solution nutritive pénètre par l'extrémité du canal supérieur et s'écoule à travers celui-ci avant de passer à l'extrémité du canal suivant. Ce processus se répète le long des canaux successifs. Ensuite, la solution retourne vers le réservoir situé après l'unité NFT avant de rejoindre le bassin de poissons.

Le débit a été fixé à 5 L/min. La perte d'eau des réservoirs due à l'évaporation a été ajustée chaque semaine en ajoutant de l'eau souterraine.

### **5.1 Préparation de la pépinière**

Le lot de graines de Laitue (*Lactuca sativa*) utilisé dans le cadre de cette étude est issu de la pépinière de l'université.

### **5.1.1 Test de germination des semences :**

L'objectif de cette étape est de mesurer la capacité de germination des semences de laitue utilisées dans notre expérience.

On désinfecte les graines choisies avec de l'hypochlorite de sodium à 5 % pendant 3 minutes, puis on les rince à l'eau distillée. Ensuite, elles sont placées dans des boîtes Pétri recouvertes de papier filtre.

La germination est effectuée dans l'obscurité dans une étuve à température continue de 25°C. Chaque essai a été effectué avec 80 graines réparties en quatre lots (répétitions) de 20 graines chacun.

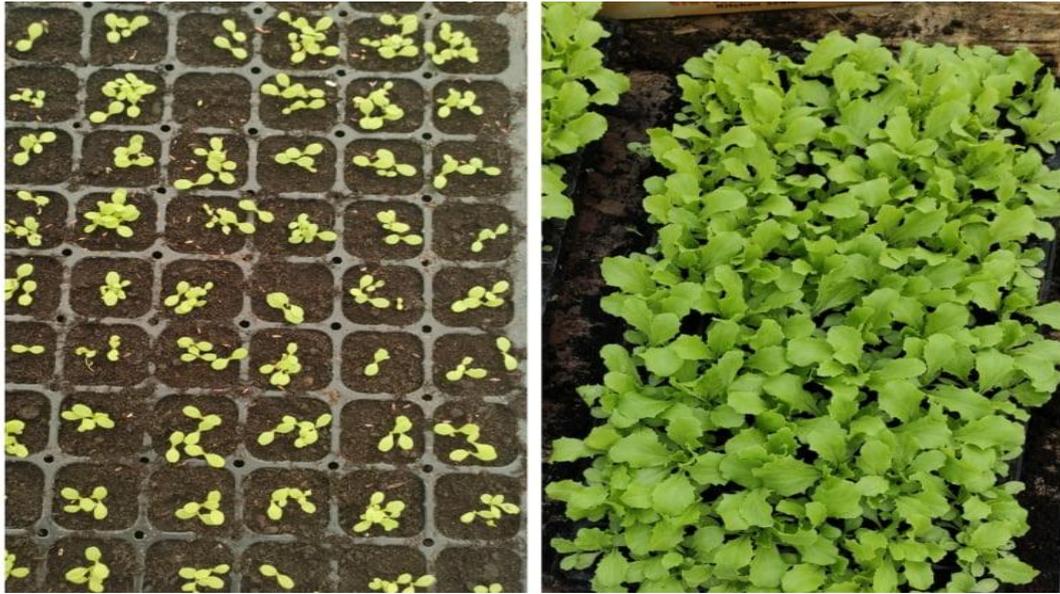
**La capacité de germination :** elle présente le taux de germination maximal ou la capacité de germination des semences de laitue obtenue dans nos conditions expérimentales. (Côme, 1970).

$$\text{Le taux de germination} = \frac{\text{nombre de semences germées}}{\text{nombre de semences testées}} \times 100$$

### **5.1.2 La pépinière :**

Les semences ont été placées à 4°C et à l'obscurité afin d'assurer une parfaite conservation, et pour faciliter la synchronisation de leur germination.

Le semis des graines a été réalisé en pépinière dans des plaques alvéolées en plastique noir à une profondeur d'environ 4 mm avec 84 alvéoles préalablement remplies de tourbe. Les graines ont été arrosées uniquement avec de l'eau du robinet et les plaques ont été placées dans la serre et recouvertes de plastique transparent pour maintenir l'humidité pendant la germination (**figure 16**).



**Figure 16 :** Germination de semences de la laitue.

## **5.2 Transplantation et mise en unités hydroponiques**

Les plantules ont été cultivées dans la serre pendant environ 3 semaines, et lorsqu'elles ont développé 4-5 vraies feuilles, ont été immédiatement transplantées dans des pots en plastique remplis de sciure de bois en tant que substrat de culture en raison de sa disponibilité, de sa légèreté, de sa capacité à retenir l'humidité et de son faible coût. (Depardieu *et al.*, 2016; González-Orozco *et al.*, 2018).

Les plantes ont ensuite été transférées dans les unités hydroponiques à (NFT) avec une distance de plantation de 20 cm.

Durant toute la durée de l'expérience, la solution nutritive était aérée grâce à des pompes d'aquarium dont le débit permettait une bonne aération sans provoquer d'agitation du système racinaire.

La température de l'air n'a pas été contrôlée tout au long l'expérience.

## **6 Dispositif expérimental**

Le dispositif adopté est le dispositif complètement aléatoire. Au total, 09 systèmes aquaponiques indépendants ont été installés, ayant trois densités de stockage des poissons,

dont trois répétitions pour chaque densité de stockage. Les poissons ont été stockés à des densités de 1,5 kg/m<sup>3</sup>, 3 kg/m<sup>3</sup> et 4,5 kg/m<sup>3</sup> pour les traitements T1, T2 et T3, respectivement.

## **7 Méthodes**

### **7.1 Effet de la densité de stockage de Tilapia (*Oreochromis niloticus*) sur la qualité de l'eau dans un système aquaponic NFT**

#### **7.1.1 Paramètres de la qualité physicochimique de l'eau**

Les données sur la concentration en oxygène dissous (OD), le pH et la température ont été déterminées et enregistrées quotidiennement dans les bassins d'élevage de poissons à recirculation et les réservoirs hydroponiques à l'aide du multiparamètre YSI 556 (YSI Inc. USA).

L'azote est un composé essentiel dans les structures vivantes, selon le degré d'oxydation, il existe sous trois formes dans l'eau : nitrites (NO<sub>2</sub><sup>-</sup>) ammonium (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) et nitrates (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>). Ce dernier et en raison de leur nature toxique, il doit être bien contrôlé tout au long la période d'élevage. Ainsi, afin de suivre la qualité de l'eau d'élevage, des échantillons d'eau des bassins de poissons et des unités des plantes ont été prélevés régulièrement durant l'expérimentation, et analysés moyennant un spectrophotomètre.

Les concentrations de l'azote ammoniacal total (TAN), les nitrates, les nitrites, le potassium et le phosphore réactif soluble (SRP), dans l'eau des deux locations (y compris les bassins des poissons et les unités hydroponiques) ont été mesurés une fois par semaine à l'aide d'un un spectrophotomètre.

### **7.2 Effet de la densité de stockage sur les performances de croissance du tilapia (*Oreochromis niloticus*) dans un système aquaponique**

#### **7.2.1 Paramètres zootechniques de Tilapia**

Chaque jour les bassins étaient nettoyés, avant nourrissage, et les poissons morts éventuels étaient retirés des bassins. Pour estimer la croissance des poissons au cours de la période d'élevage, un certain nombre des paramètres zootechniques devraient être calculés.

Les données de la croissance ont été collectés au début de l'expérimentation puis chaque semaine jusqu'à la fin de la période expérimentale. Les données incluent le poids moyen et la taille moyenne des échantillons aléatoires pour chaque densité d'élevage testée.

On outre, les performances de croissance des tilapias et l'utilisation des aliments ont été calculées comme décrit par Sveier *et al.* (2000) et Jimoh *et al.* (2020) en utilisant les formules suivantes ;

### 7.2.1.1 Gain en masse corporelle

Cet indice permet d'évaluer la croissance pondérale des poissons pendant un temps donné. Il est calculé selon la formule suivante :

$$\text{Gain du poids moyen (g)} = \text{Poids final moyen (g)} - \text{Poids initial moyen (g)}$$

### 7.2.1.2 Taux de croissance spécifique (Specific Growth Rate, SGR)

$$(\text{SGR\% par jour}) = (\ln(\text{poids moyen final}) - \ln(\text{poids moyenninitial})) * 100 / \text{nombre de jours d'élevage}$$

### 7.2.1.3 Taux de survie

Le taux de survie (100% - Taux de mortalité) est calculé à partir du nombre de poissons à la fin de l'expérience et l'effectif total en début d'élevage, selon la relation suivante :

$$\text{Taux de Survie} = (\text{Nombre final de individus} / \text{Nombre initial des individus}) * 100$$

### 7.2.1.4 Taux de conversion alimentaire (FCR)

C'est un indice de transformation d'aliment qui permet de mesurer l'efficacité de la conversion d'un aliment en chair de poisson, il représente le rapport entre la quantité totale de l'aliment distribué aux poissons et le gain obtenu en biomasse.

$$\text{FCR} = \text{Poids sec de l'aliment distribué(g)} / \text{Gain en poids des poissons(g)}$$

La croissance des poissons a été suivie depuis le début de l'élevage jusqu'à la fin de l'expérimentation.

### **7.3 Effet de la densité de stockage du tilapia (*Oreochromis niloticus*) sur les performances de croissance de la laitue (*Lactuca sativa*) dans un système aquaponique**

#### **7.3.1 Détermination des paramètres morphologiques et biochimiques de la laitue**

##### **7.3.1.1 Paramètres morphologiques**

Les plants de laitue ont été récoltés après 5 jours de culture. Lors de la récolte, les parties aériennes des plantes ont été séparées des racines puis soigneusement égouttées entre deux couches de papier absorbant pour les peser après.

###### **7.3.1.1.1 Le poids frais des parties aériennes (la tête de la laitue)**

Exprimé en gramme (g), l'opération consiste à peser les parties aériennes à l'état frais juste après l'arrachage de la plante, et cela à l'aide d'une balance électronique de précision.

###### **7.3.1.1.2 Le poids frais des racines**

Exprimé en gramme (g), l'opération consiste à peser les racines à l'état frais juste après l'arrachage de la plante, et cela à l'aide d'une balance électronique de précision.

###### **7.3.1.1.3 La hauteur des plantes**

Elle est mesurée en centimètre (cm) à l'aide d'une règle graduée, au collet jusqu'à l'apex de la plante. L'opération est effectuée au moment de l'arrachage.

###### **7.3.1.1.4 La longueur des racines**

Elle exprimée en centimètre (cm), en mesurant la longueur de la racine.

###### **7.3.1.1.5 La surface foliaire**

La surface foliaire (cm<sup>2</sup>) des plants de laitue est déterminée à l'aide d'un appareil de mesure de la surface foliaire (laser portable CI-202) en mesurant **La largeur et la longueur des feuilles** au moment de la récolte.

###### **7.3.1.1.6 La matière sèche des parties aériennes**

Les échantillons ont été ensuite placés dans des tubes thermorésistants et ont été soumis à dessiccation pendant 48h à 80°C. La matière sèche des différents échantillons (parties aériennes et racines) a ensuite été pesée.

### **7.3.1.2 Paramètres biochimiques:**

#### **7.3.1.2.1 Dosage des sucres solubles**

La méthode utilisée pour le dosage des sucres solubles totaux (saccharose, le glucose, le fructose, leurs dérivés méthyles et les polysaccharides) est celle de Dubois *et al.*, (1956).

Dans un tube à essai, on mélange 100 mg de matériau végétal frais avec 3 ml d'éthanol à 80%.

Une fois que l'éthanol a été évaporé pendant 48 heures dans une étuve à 80°C, on ajoute 20 ml d'eau distillée à l'échantillon lors du dosage.

Pour effectuer le dosage, on prélève 2 ml de solution à analyser, 1 ml de phénol à 5% et 5 ml d'acide sulfurique dans un tube à essai. Après avoir agité, les tubes sont incubés pendant 10 minutes à température ambiante, puis placés au bain-marie pendant 10 à 20 minutes à 30°C.

Les densités optiques sont lues à une longueur d'onde de 485 nm. Une courbe d'étalonnage est préparée à partir d'une solution mère de glucose allant de 10 à 100 µg.ml<sup>-1</sup>.

#### **7.3.1.2.2 Dosage des éléments minéraux foliaires**

Les minéraux foliaires sont dosés selon la méthode définie par le CEAEQ (Centre d'Expertise en Analyse Environnementale du Québec) (2013). Cette méthode permet de mesurer les minéraux tels que le potassium, le sodium, le calcium et le magnésium présents dans la plante, en utilisant la cendre préparée comme base.

On met 1 g de la matière sèche aérienne totale dans une étuve à 105°C pendant 24h.

A la suite de cela, la matière séchée est chauffée dans un creuset en porcelaine à 550°C dans un four à moufle pendant 5 heures, ce qui donne une cendre blanche. Après refroidissement dans un dessiccateur, on déplace la cendre dans un bécher de 100 ml, où on ajoute 5 ml de HCl (2N) et 25 ml d'eau distillée, le tout enveloppé d'un verre de montre.

On refroidit et on ajoute 25ml d'eau distillée, puis on filtre le mélange dans une fiole de 50ml. Ensuite, on effectue le dosage des éléments désirés à partir de l'extrait préparé.

Les teneurs **en potassium et sodium** sont déterminés en passant l'extrait à travers un appareil photomètre à flamme.

#### **Dosage de calcium**

Lors du dosage du calcium ( $\text{Ca}^{2+}$ ), différents réactifs sont préalablement préparés. La solution tampon est préparée en ajoutant 16.9 g de  $\text{NH}_4\text{Cl}$  à 142,5 ml de  $\text{NH}_4\text{OH}$  concentré, puis en laissant refroidir avant de passer à 250 ml d'eau distillée.

La préparation de l'EDTA (0.1N) consiste à dissoudre 2 g d'EDTA et 0.05 g de  $\text{MgCl}_2$  dans 1 litre. On obtient le réactif NET en combinant 0,5 g de NET et 4,5 g d'hydroxylamine hydrochlorure dans 100 ml d'éthanol à 95%. On prépare également la solution NaOH en dissolvant 8 g dans 100 ml d'eau, puis en laissant refroidir légèrement. La fabrication du calcon carboxylique se fait en combinant 0,2 g de calcon carboxylique avec 100 g de NaCl. On dilue 10 fois les échantillons en utilisant 5 ml d'échantillon et 45 ml d'eau.

Le déroulement du protocole opératoire débute par la mise en place d'un témoin. On mélange 50 ml d'eau distillée avec 0.2 g de calcon carboxylique + NaCl dans un bécher, puis on ajoute 2 à 3 ml de NaOH. On procède ensuite à la titration avec l'EDTA et on observe le changement de couleur, du rose au bleu. Il est crucial de passer par cette étape du témoin afin d'établir la référence visuelle requise lors du dosage du calcium dans les échantillons.

### Dosage de magnésium

Le magnésium ( $\text{Mg}^{2+}$ ) est dosé en suivant une série d'étapes méthodiques. On prépare un bécher avec 5 ml d'échantillon dilué dans 45 ml d'eau (dilution  $\times 10$ ), puis on ajoute 4 ml de solution tampon à un pH de 10 et 4 gouttes de NET. Cette solution est placée au-dessus de l'agitateur. Ensuite, on commence la titration avec l'EDAT, et on observe le changement du couleur du rose au bleu. La teneur en  $\text{Ca}^{2+}$  est calculé par la formule suivante :

$$Ca^{2+} = \frac{(V1 - V2) \times 0.01 \times 1000}{D} \times A$$

- V1 : représente le volume de titration avec l'EDAT.
- V2 : est le volume de titration avec l'EDAT pour le témoin.
- D : est le facteur de dilution.
- A : correspond à la prise d'essai.

Enfin, la concentration totale de  $\text{Mg}^{2+}$  et  $\text{Ca}^{2+}$  est obtenue avec la formule :

$$(\text{Mg}^{2+} + \text{Ca}^{2+}) = \frac{(V1 - V2) \times 0.01 \times 1000}{A} \times D$$

La concentration de  $Mg^{2+}$  est alors déterminée par la différence entre la concentration totale de  $Mg^{2+}$  et  $Ca^{2+}$ , soit :

$$Mg^{2+} = (Ca^{2+} + Mg^{2+}) - Ca^{2+}.$$

## **8 Analyses statistiques**

Les données obtenues pour les différents paramètres étudiés ont été calculées sous forme de moyenne  $\pm$  SD à l'aide de MS Office Excel Professional Plus 2010, puis soumises à une analyse de la variance ANOVA par le logiciel XLSTAT (version 25.1. 1408). La comparaison de moyennes a été effectuée par le test Tukey HSD avec un niveau de signification de 0,05.

# **RÉSULTATS ET DISCUSSIONS**

## 1 Effet de la densité de stockage de Tilapia (*Oreochromis niloticus*) sur la qualité de l'eau dans un système aquaponic NFT

### 1.1 Analyse physico-chimique des eaux

Les paramètres de qualité de l'eau, notamment la température, l'oxygène dissous (DO), le pH, l'azote total d'ammonium (TAN), le nitrate, le nitrite, le potassium et le phosphore réactif soluble (SRP) dans les bassins d'élevage et les unités hydroponiques au cours de l'expérience sont résumés dans Tableau 1.

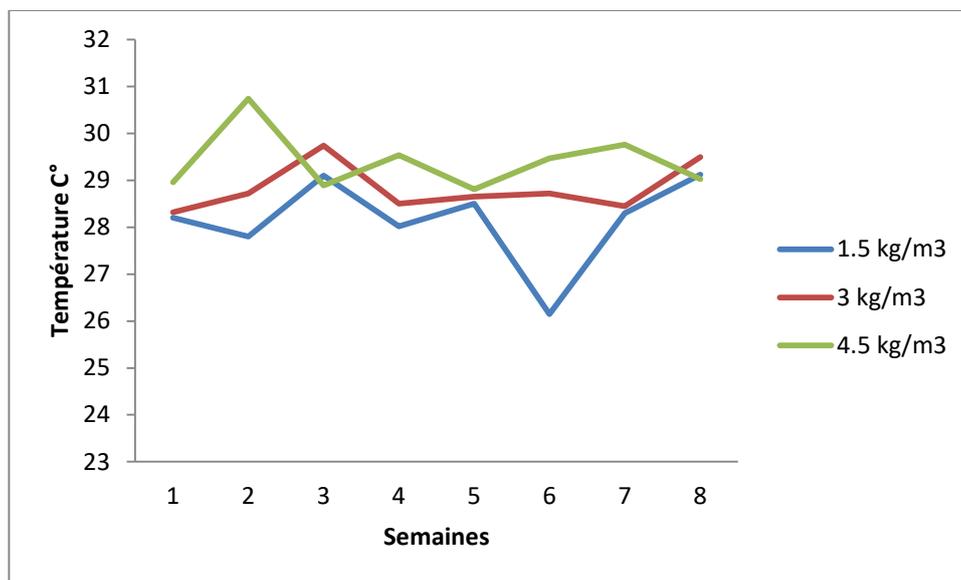
**Tableau 1 :** Caractéristiques de la qualité de l'eau du système aquaponique (moyenne  $\pm$  SD) à différentes densités de peuplement de d' *Oreochromis niloticus* (1,5 kg/m<sup>3</sup> ; 3 kg/m<sup>3</sup> et 4,5 kg/m<sup>3</sup>).

paramètre	location	1.5 kg/m <sup>3</sup>	3 kg/m <sup>3</sup>	4.5 kg/m <sup>3</sup>
<b>Temperature (C°)</b>	Poissons	28.15 $\pm$ 0.45	28.83 $\pm$ 0.52	29.91 $\pm$ 0.56
	plantes	28.73 $\pm$ 0.58	28.28 $\pm$ 0.22	29.32 $\pm$ 0.65
<b>pH</b>	Poissons	7.78 $\pm$ 0.02	7.37 $\pm$ 0.04	6.78 $\pm$ 0.04
	plantes	7.54 $\pm$ 0.02	7.22 $\pm$ 0.02	6.45 $\pm$ 0.04
<b>Dissolved oxygen (mg/L)</b>	Poissons	5.56 $\pm$ 1.27	4.74 $\pm$ 0.66	3.93 $\pm$ 0.49
	plantes	5.88 $\pm$ 1.23	5.37 $\pm$ 0.85	4.15 $\pm$ 0.14
<b>Nitrate (mg/L)</b>	Poissons	1.13 $\pm$ 0.032	1.20 $\pm$ 0.013	1.38 $\pm$ 0.022
	plantes	0.98 $\pm$ 0.011	1.11 $\pm$ 0.015	1.32 $\pm$ 0.025
<b>Nitrite (mg/L)</b>	Poissons	0.01 $\pm$ 0.001	0.04 $\pm$ 0.021	0.07 $\pm$ 0.062
	plantes	0.01 $\pm$ 0.001	0.029 $\pm$ 0.002	0.073 $\pm$ 0.006
<b>SRP (mg/L)</b>	Poissons	2.46 $\pm$ 0.017	2.23 $\pm$ 0.032	2.53 $\pm$ 0.012
	plantes	2.34 $\pm$ 0.086	2.12 $\pm$ 0.025	2.17 $\pm$ 0.02
<b>Potassium (mg/L)</b>	Poissons	6.14 $\pm$ 0.05	5.87 $\pm$ 0.06	5.98 $\pm$ 0.04
	plantes	5.74 $\pm$ 0.04	5.42 $\pm$ 0.04	5.22 $\pm$ 0.06
<b>TAN (mg/L)</b>	Poissons	0.033 $\pm$ 0.004	0.035 $\pm$ 0.004	0.038 $\pm$ 0.003
	plantes	0.026 $\pm$ 0.002	0.025 $\pm$ 0.003	0.028 $\pm$ 0.004

**Note :** SRP= phosphore réactif soluble ; TAN = ammonium-azote total. Les valeurs sont moyennes  $\pm$  écart type.

Les résultats relatifs aux paramètres de la qualité de l'eau durant l'expérimentation montrent qu'il n'y avait pas de différence significative ( $p > 0,05$ ) dans la température et le pH de l'eau entre les différents traitements ( $1,5 \text{ kg/m}^3$  ;  $3 \text{ kg/m}^3$  et  $4,5 \text{ kg/m}^3$ ).

L'étude de l'évolution de la température durant l'expérimentation montre qu'il n'y a pas une variation considérable dans la température de l'eau dans les bassins d'élevage pour les trois densités de peuplement, elle variait entre  $28,15 \pm 0,45$  et  $29,91 \pm 0,56$  °C et se situait dans les valeurs acceptables pour la croissance du tilapia entre 27 °C et 30 °C (**Figure 17**).



**Figure 17** : la température de l'eau dans les bassins d'élevage avec les trois densités de stockage durant l'expérimentation.

De plus, les niveaux de pH de l'eau étaient relativement neutres quelle que soit la densité de peuplement, allant de  $6,78 \pm 0,04$  à  $7,78 \pm 0,02$  dans les bassins des poissons et de  $6,45 \pm 0,04$  à  $7,54 \pm 0,02$  dans les canaux hydroponiques.

Cependant, il y avait une différence significative ( $p < 0,05$ ) dans l'oxygène dissous (OD) entre les traitements, le niveau moyen d'OD dans les aquariums variait de  $3,39 \pm 0,49$  à  $5,56 \pm 1,27$  mg/L à des densités de stockage de  $4,5 \text{ kg/m}^3$  et  $1,5 \text{ kg/m}^3$ , respectivement.

De même, dans les unités hydroponiques, les niveaux d'oxygène dissous variaient entre  $4,15 \pm 0,14$  et  $5,88 \pm 1,23$  mg/L à des densités de stockage de  $4,5 \text{ kg/m}^3$  et  $1,5 \text{ kg/m}^3$ , respectivement.

Les concentrations de nitrates ont tendance à augmenter avec les densités de peuplement plus élevées dans les aquariums et les unités hydroponiques. La concentration la plus élevée

de nitrate a été observée dans la densité de stockage de 4,5 kg/m<sup>3</sup>, avec une moyenne de 1,38 ± 0,022 mg/L, tandis que la concentration la plus faible a été enregistrée dans la densité de stockage de 1,5 kg/m<sup>3</sup>, avec une moyenne de 1,13 ± 0,022 mg/L. 0,032mg/L.

La densité de stockage de 1,5 kg/m<sup>3</sup> présentait les plus faibles concentrations de nitrites et de TAN, tandis que la densité de stockage de 4,5 kg/m<sup>3</sup> présentait les concentrations les plus élevées dans les bassins des poissons et les unités hydroponiques.

En revanche, le potassium et le phosphore réactif soluble (SRP) n'ont pas été affectés par la densité de peuplement de poissons dans cette étude (tableau 1).

## 2 Effet de la densité de stockage sur les performances de croissance du tilapia (*Oreochromis niloticus*) dans un système aquaponique

### 2.1 Paramètres zootechniques de Tilapia

Les résultats des paramètres de croissance des Tilapia attisés sous les trois densités (1,5 kg/m<sup>3</sup>, 3 kg/m<sup>3</sup> et 4,5 kg/m<sup>3</sup>) sont présentés dans le tableau 2.

**Tableau 2.** Paramètres de croissance du tilapia (*O. niloticus*) dans le système aquaponique à différentes densités de peuplement.

Paramètres de la croissance	Densité de stockage de poissons kg/m <sup>3</sup>		
	1.5 kg/m <sup>3</sup>	3 kg/m <sup>3</sup>	4.5 kg/m <sup>3</sup>
<b>Poids initial (g)</b>	20,2± 0,01	20,35±0,02	20,35±0,01
<b>Poids final (g)</b>	55,97±1.66 <sup>a</sup>	34±1.98 <sup>b</sup>	27,35±1.97 <sup>c</sup>
<b>Gain du poids(g)</b>	35,77±0.98 <sup>a</sup>	13,65±1.57 <sup>b</sup>	7±1.99 <sup>c</sup>
<b>SGR (%/jour)</b>	1,82	0,91	0,51
<b>Taux de survie (%)</b>	98.81±1.50 <sup>a</sup>	94%±1.85 <sup>b</sup>	92±3.02 <sup>b</sup>
<b>FCR</b>	1,55	2,51	5,51

**Note:** Les valeurs sont données sous forme de moyenne ± écart type. La valeur sur une même ligne portant des lettres différentes est significativement différente de 5 %.

Les résultats issus de l'analyse statistique utilisant l'ANOVA ont indiqué que la différence entre le poids final, le gain du poids, le SGR (**Taux de croissance spécifique**), le SR (taux de survie) et le FCR (**Taux de conversion alimentaire**) du tilapia parmi les traitements de densité de stockage est significative (p <0,05).

Le poids des alevins à 1,5 kg/m<sup>3</sup> a augmenté de 20,02 g à 55,97 g, celui des poissons à 3 kg/m<sup>3</sup> de 20,35 g à 34 g et celui des poissons à 4,5 kg/m<sup>3</sup> de 20,35 g à 27,35 g.

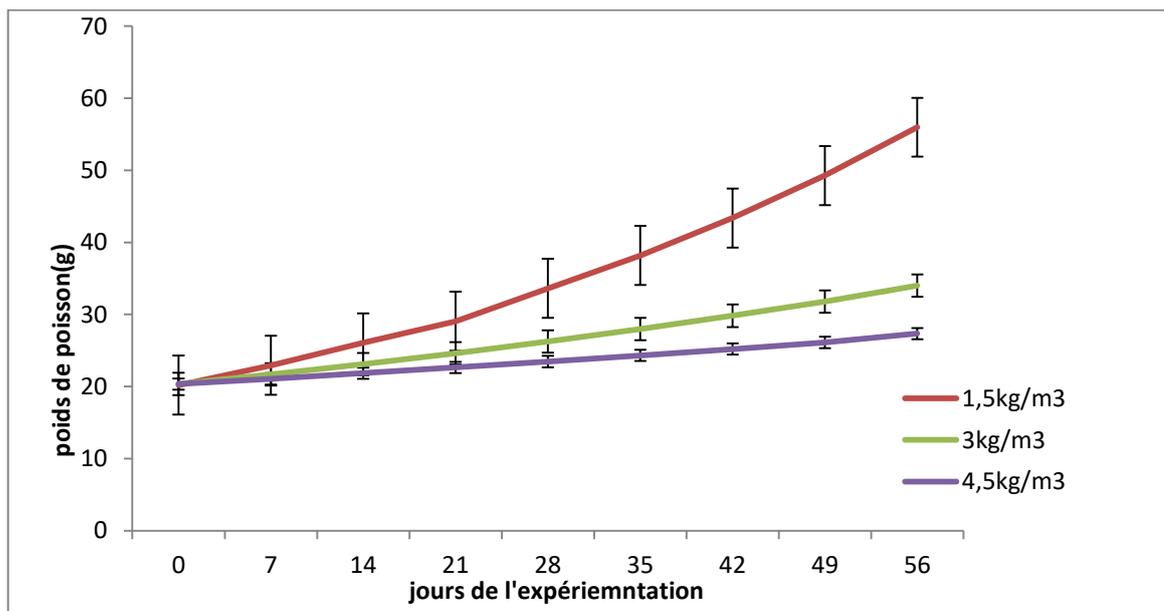
Le poids final moyen était significativement plus élevé chez les individus de densité 1.5 kg/m<sup>3</sup> que ceux de densités de 3 kg/m<sup>3</sup> et 4,5 kg/m<sup>3</sup>, respectivement (**Figure 18**).

Les poissons élevés à 1,5 kg/m<sup>3</sup> présentent le gain de poids moyen le plus élevé (35,77 ± 0,98) par rapport à ceux élevés à 4,5 kg/m<sup>3</sup> (7 ± 1,99). Selon les résultats de l'analyse du test Annona, nous remarquons qu'il existe une différence significative entre les traitements.

Le taux de croissance spécifique (SGR) a également montré des différences significatives entre les traitements. La même tendance a été observée pour le **taux de croissance spécifique (SGR)**, les poissons de 1,5 kg/m<sup>3</sup> ont obtenu le SGR le plus élevé (1,82 ± 0,17), ce qui suggère une augmentation importante de la croissance par rapport aux deux autres densités de stockage. Par contre, la densité de stockage de 4,5 kg/m<sup>3</sup> présentait le SGR le plus faible (0,51 ± 0,04), ce qu'indique un taux de croissance plus lent (Tableau 2).

En ce qui concerne le taux de survie (SR), aucune différence significative n'a été observée entre les différentes densités de stockage (p >0,05). Cependant, la densité de peuplement de 1,5 kg/m<sup>3</sup> a montré le taux de survie le plus élevé (98,81 ± 1,50), ce qui suggère une meilleure survie dans des conditions de densité de stockage inférieure.

En ce qui concerne le taux de conversion des aliments (FCR), on a constaté une corrélation inverse avec la densité de stockage. Le taux de conversion alimentaire (FCR) le plus élevé se retrouve chez les poissons cultivés à densité de 4.5 kg/m<sup>3</sup>, ce qui indique une utilisation moins efficace des aliments par les poissons. En revanche, la densité de 1,5 kg/m<sup>3</sup> présentait le FCR le plus bas, ce qui suggère une conversion alimentaire plus efficace (**Tableau 2**).



**Figure 18 :** Évolution du poids (g) d'alevins de Tilapia élevés avec de la laitue (*Lactuca*

*sativa*) dans un système aquaponique sous trois densités de stockage (1,5 kg/m<sup>3</sup>, 3 kg/m<sup>3</sup> et 4,5 kg/m<sup>3</sup>).

### **3 Effet de la densité de stockage du tilapia (*Oreochromis niloticus*) sur les performances de croissance de la laitue (*Lactuca sativa*) dans un système aquaponique**

Notre recherche a étudié l'effet de trois densités de stockage différentes de tilapia sur les performances de croissance de **la laitue** cultivée dans un système aquaponique.

#### **3.1 Paramètres morphologiques et biochimiques de la laitue**

##### **3.1.1 Test de germination des semences**

L'objectif de cette étape est de mesurer la capacité de germination des semences de laitue utilisées dans notre expérience.

Les résultats obtenus pour la capacité germinative, montrent que les graines la laitue ont un taux de germination très élevé avec moyenne de 97% ce que indique leurs efficacité à semis (**figure 19**).

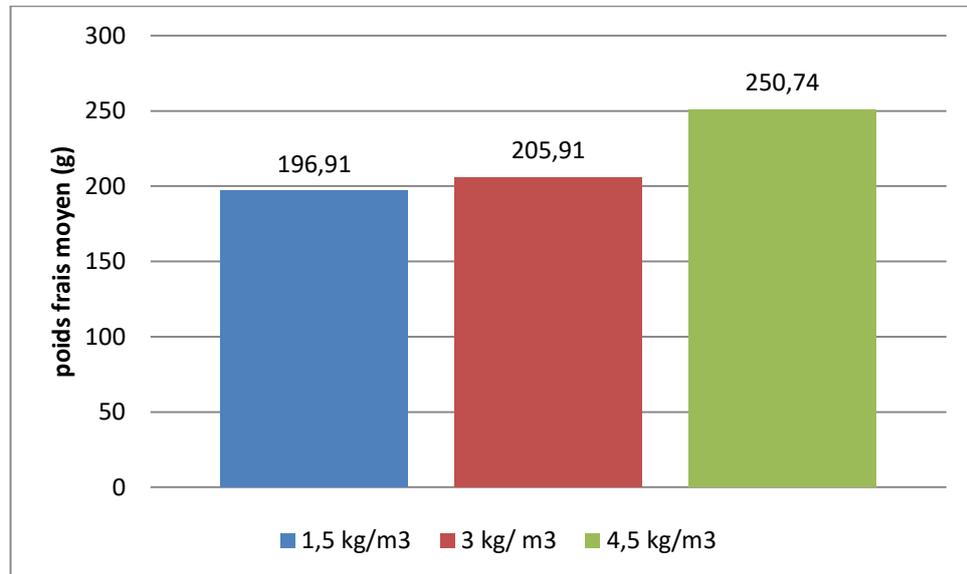


**Figure 19:** Jeunes laitues prêts à transplanter aux unités hydroponiques NFT.

### 3.1.2 Paramètres morphologiques

#### 3.1.2.1 Poids frais des parties aériennes de la laitue

Le poids frais final de la laitue à la récolte de différents traitements étudiés est représenté par la figure 20.

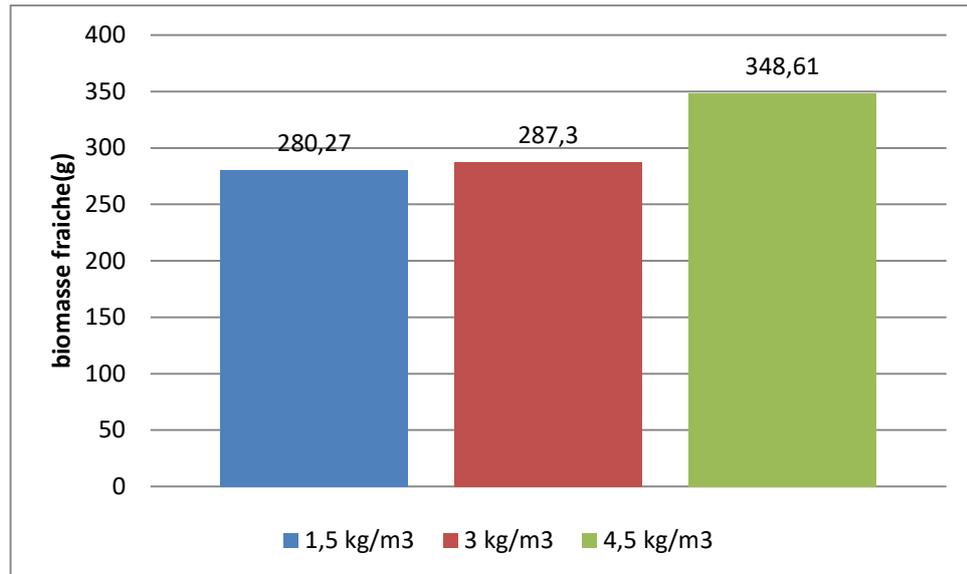


**Figure 20** : le poids frais moyen de la laitue à travers la densité de stockage.

Le poids moyen final de la tête de la laitue à la densité 4,5 kg/m<sup>3</sup> était significativement le plus élevé suivi de celui de 3 kg/m<sup>3</sup> puis de 1,5 kg/m<sup>3</sup> avec respectivement 250,74 ± 17,7 g, 205,14 ± 12,27 g et 196,91 ± 2,66 g.

#### 3.1.2.2 Production en biomasse fraîche

Les résultats obtenus pour le paramètre « biomasse fraîche » pour l'ensemble des traitements étudiés sont illustrés par la figure 21.



**Figure 21** : La biomasse fraîche de la laitue à travers la densité de stockage.

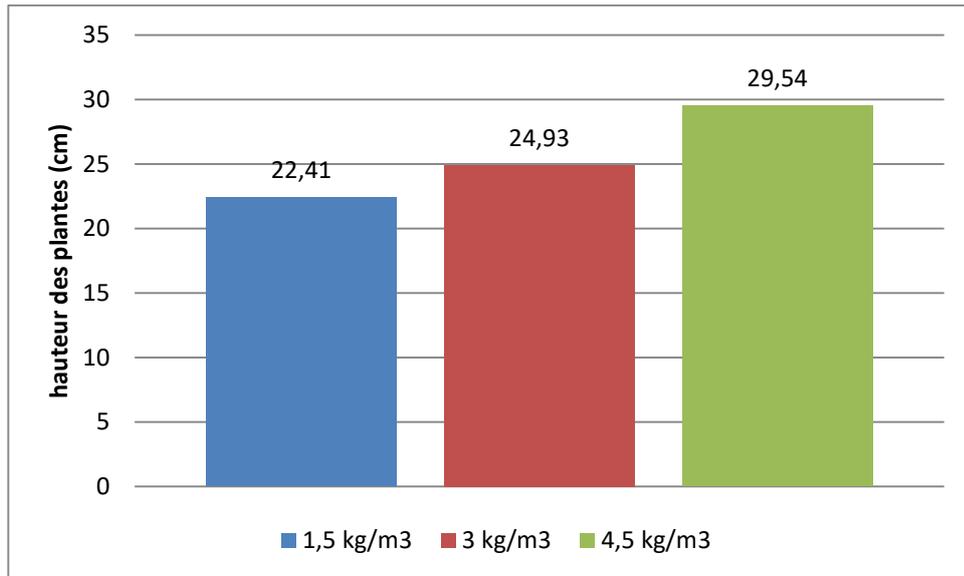
Les résultats ont montré une tendance générale à une augmentation de la biomasse moyenne de la laitue avec l'augmentation de la densité de stockage à travers les différents traitements.

La biomasse fraîche des plantes cultivées avec le traitement T2 (3 kg/m<sup>3</sup>) est de (287.3±20.40g), ce qui se situe entre la biomasse des plantes cultivées dans (1.5 kg/m<sup>3</sup> et 4.5 kg/m<sup>3</sup>). Les plantes traitées avec la densité de 4.5 kg/m<sup>3</sup> ont eu la biomasse la plus élevée, avec une moyenne de (348.61±23.75g), tandis que les plantes de la densité 1.5 kg/m<sup>3</sup> ont eu la biomasse la plus faible, avec une moyenne de (280.27±7.27 g).

L'analyse de la variance au seuil de 5% de la biomasse fraîche des plantes montre qu'il existe un effet très significatif ( $p < 0.05$ ) entre les différents traitements de densité de stockage étudiée. Le test de statistique indique la présence de trois groupes homogènes.

### 3.1.2.3 Hauteur des plantes

Les résultats obtenus de la hauteur finale des plantes à travers l'ensemble des traitements étudiés sont présentés sur **la figure 22**.

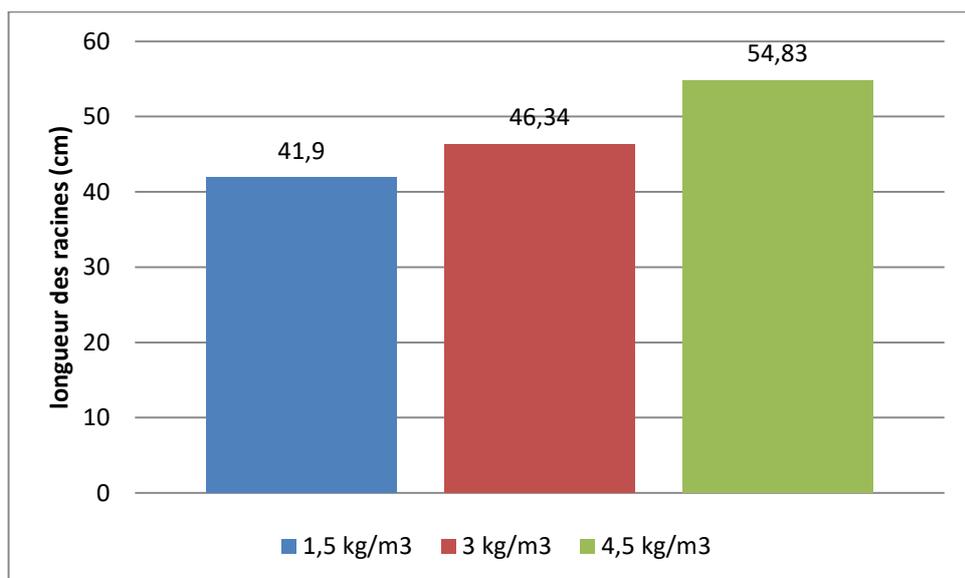


**Figure 22 :** La hauteur des plantes dans un système aquaponique sous trois densités de stockage (1,5 kg/m<sup>3</sup>, 3 kg/m<sup>3</sup> et 4,5 kg/m<sup>3</sup>).

A la fin de l'essai, la hauteur finale moyenne des plantes au traitement de 4,5 kg/m<sup>3</sup> était la plus élevée avec une valeur moyenne de 29.54±30.01 cm, suivie de celle de 3 kg/m<sup>3</sup> puis de 1,5 kg/m<sup>3</sup> avec des valeurs moyennes de 24.93±18.55cm et 22.41±10.67cm, respectivement.

Selon l'analyse statistique, la densité de stockage de tilapia a un effet significatif sur la hauteur des plantes de la laitue au cours du cycle de croissance.

### 3.1.2.4 Longueur des racines

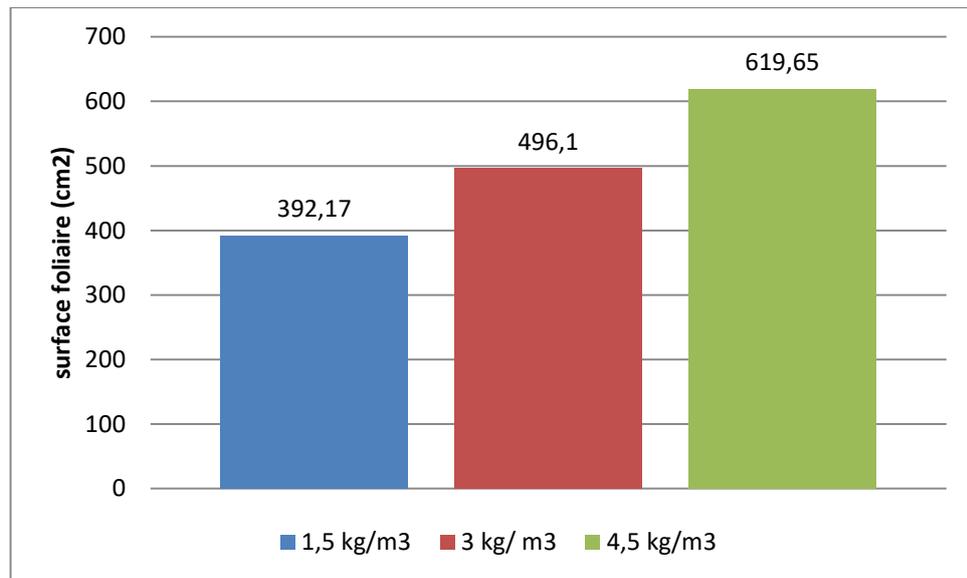


**Figure 23:** La longueur des racines des laitues dans un système aquaponique sous trois densités de stockage (1,5 kg/m<sup>3</sup>, 3 kg/m<sup>3</sup> et 4,5 kg/m<sup>3</sup>).

En ce qui concerne les caractéristiques des racines, la longueur des racines ne présentait pas de différence statistiquement significative entre les traitements de densité de peuplement ; la laitue à la densité de 4,5 kg/m<sup>3</sup> avait la longueur de racine la plus élevée avec 54,83 ± 2,39 cm et la plus basse au traitement de 1,5 kg/m<sup>3</sup> avec 41,9 ± 1 cm **Figure 23**.

### 3.1.2.5 Surface foliaire

Les résultats obtenus pour le paramètre de la surface foliaire via les différents traitements étudiés sont illustrés par la **figure 24**.



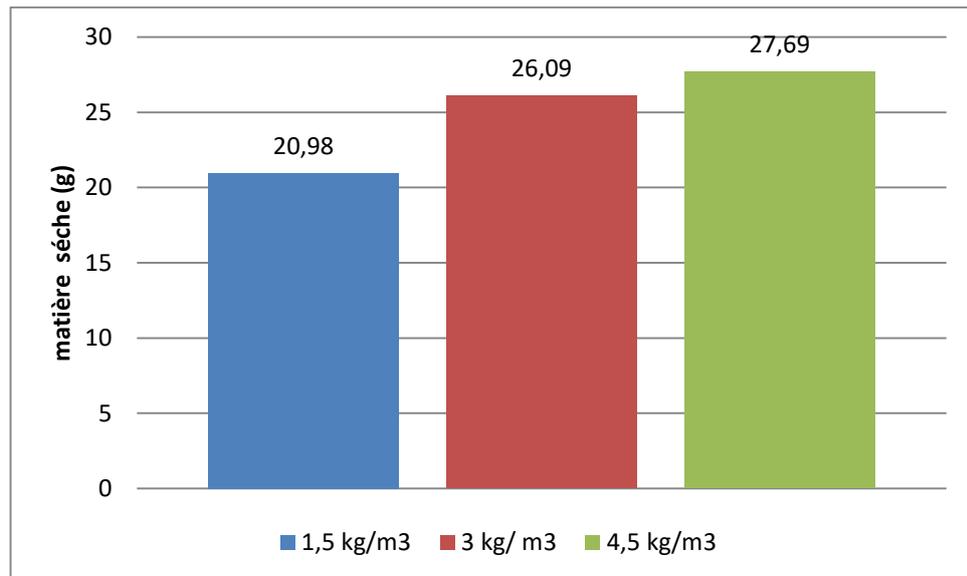
**Figure 24** : la surface foliaire de la laitue dans un système aquaponique sous trois densités de stockage (1,5 kg/m<sup>3</sup>, 3 kg/m<sup>3</sup> et 4,5 kg/m<sup>3</sup>).

Les plantes de la densité 4.5 kg/m<sup>3</sup> présentent la valeur de la surface foliaire la plus élevée (619.65cm<sup>2</sup> ±27.85). Pour les plantes cultivées avec la densité 3 kg/m<sup>3</sup>, la surface foliaire atteint une valeur de (496.1 cm<sup>2</sup> ± 21.01). Et pour les plantes à 1.5 kg/m<sup>3</sup>, la surface foliaire était la plus basse (392.17 cm<sup>2</sup> ±33.58).

L'analyse de la variance de la surface foliaire montre qu'il existe un effet significatif entre les différents traitements de la densité de stockage appliquée.

### 3.1.2.6 La matière sèche des parties aériennes

Les résultats relatifs à la biomasse sèche biomasse sèche produite (parties aériennes) sont présentés dans la **figure 25**.



**Figure 25** : le taux de la matière sèche de la laitue dans un système aquaponique sous trois densités de stockage (1,5 kg/m<sup>3</sup>, 3 kg/m<sup>3</sup> et 4,5 kg/m<sup>3</sup>).

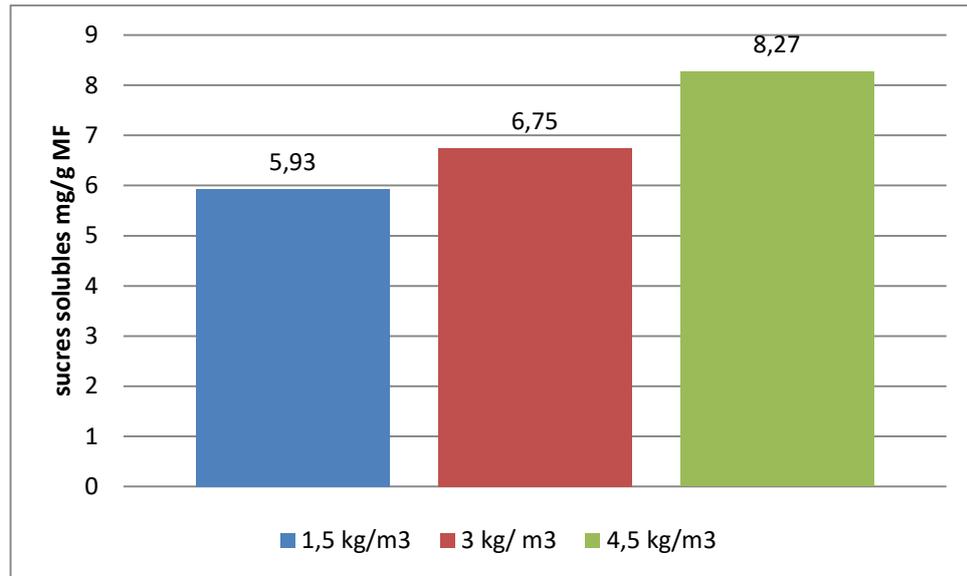
L'effet de la densité de stockage manifeste une action significative sur le taux de la matière sèche produite de la laitue à travers les densités de stockage. Les plantes dans la densité de 4.5 kg/m<sup>3</sup> présentent une biomasse sèche plus importante par rapport aux autres (1.5 kg/m<sup>3</sup> et 3 kg/m<sup>3</sup>) avec des valeurs de 27.69g, 26.09g et 20.98g respectivement.

L'analyse de la variance de la biomasse sèche des plants montre qu'il existe un effet très significatif ( $p < 0.05$ ) entre les différents traitements de la densité. Le test de statistique indique la présence de trois groupes homogènes.

### 3.1.3 Paramètres biochimiques

#### 3.1.3.1 Les sucres solubles

Les résultats d'analyse du sucre dans la laitue sont illustrés dans la **figure 26**.



**Figure 26:** Taux de sucres soluble dans les laitues dans un système aquaponique sous trois densités de stockage (1,5 kg/m<sup>3</sup>, 3 kg/m<sup>3</sup> et 4,5 kg/m<sup>3</sup>).

Les sucres solubles sont des composés organiques des plantes, jouent un rôle réglementaire dans les nombreux mécanismes de croissance et de développement des plantes.

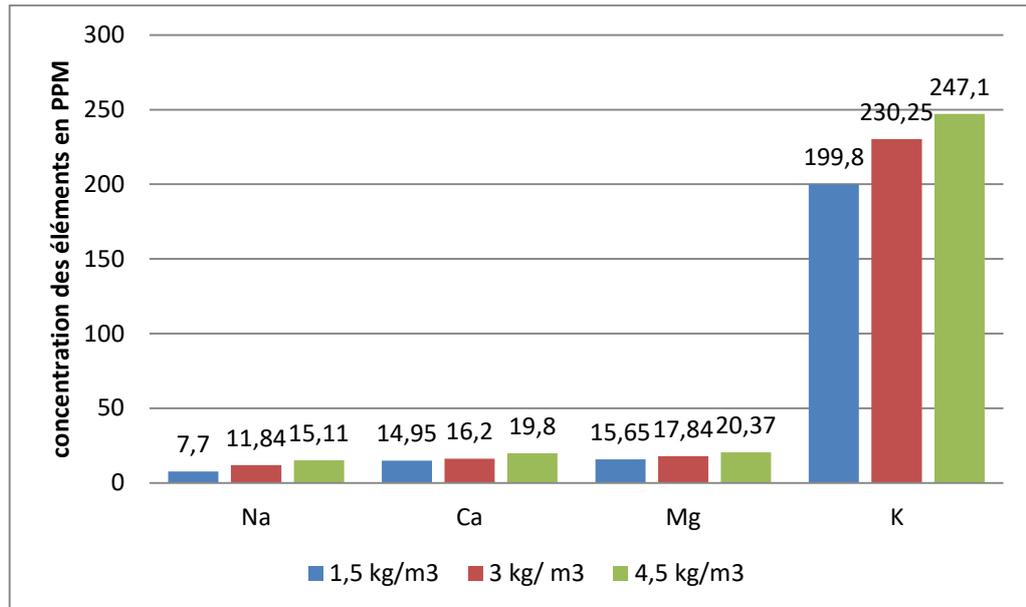
L'analyse de la variance de taux de sucres solubles dans les plantes de la laitue indique l'existence d'une différence hautement significative entre les traitements testés.

Les résultats obtenus de **la Figure 21**, montrent que les laitues récolté de la densité 4.5 kg/m<sup>3</sup>présentaient les concentrations de sucres solubles les plus élevées avec une moyenne de 8.27mg/g MF, suivies des laitues de la densité de 3 kg/m<sup>3</sup> puis celles de la densité1.5 kg/m<sup>3</sup> avec des concentrations moyennes de 6.75mg/g MF et 5.93mg/g MF, respectivement.

### 3.1.3.2 Les éléments minéraux foliaires

#### 3.1.3.2.1 Concentrations de Calcium, Magnésium, Sodium, et potassium

Les résultats de la teneur de sodium et potassium dans des laitues à travers les traitements sont illustré dans **la figure 27**.



**Figure 27 :** Le taux de Sodium, Calcium, Magnésium, et Potassium chez les plantes à travers les différentes densités de stockage (1.5 Kg/m<sup>3</sup>, 3 Kg/m<sup>3</sup> et 4.5 Kg/m<sup>3</sup>) au sein du système aquaponique.

Les résultats de l'analyse biochimique dans la laitue étudiée ont révélé que les concentrations de sodium entre les trois traitements étaient significativement différentes. Les laitues de la densité 4.5kg/m<sup>3</sup> avait la concentration la plus élevée de sodium avec 15.11 ppm par rapport aux deux autres densités qui ont concentrations de 11.84ppm et 7.7ppm de sodium.

La concentration de calcium dans les plantes cultivées en 4.kg/m<sup>3</sup> de densité atteint un taux de 19.8ppm et elle est plus importante que les autres plantes de 3kg/m<sup>3</sup> et 1.5kg/m<sup>3</sup> qui ont des valeurs de 16.2ppm et 14.95ppm, respectivement.

La même tendance a été observée pour les taux de magnésium et potassium qui ont été supérieurs chez les plantes de la densité 4.5kg/m<sup>3</sup>, tandis que les plantes dans les densités 3kg/m<sup>3</sup> et 1.5kg/m<sup>3</sup> avaient des taux faibles pour les mêmes éléments par rapport à la densité de 4.5g/m<sup>3</sup> avec des valeurs moyennes de 17.84ppm et 15.65ppm (Mg) et 230.25ppm et 199.8ppm (K), respectivement.

L'analyse de la variance montre qu'il existe un effet très hautement significatif ( $P < 0,05$ ) entre les différents traitements de la densité de poissons appliquée. Le test de statistique indique la présence de trois groupes homogènes pour les concentrations des éléments Na, Ca, Mg et K.

## **1 Discussion :**

Dans ce système aquaponique, nous avons étudié trois densités de peuplement différentes de tilapia ( $1,5 \text{ kg/m}^3$ ,  $3 \text{ kg/m}^3$  et  $4,5 \text{ kg/m}^3$ ) et évalué leurs effets sur la qualité de l'eau ainsi que les performances de croissance de la laitue et du tilapia.

### **1.1 Effet de la densité de stockage de Tilapia (*Oreochromis niloticus*) sur la qualité de l'eau dans un système aquaponic NFT**

Les résultats de cette étude indiquent que les différents paramètres de la qualité de l'eau (température, pH, oxygène dissous, azote ammoniacal total, nitrite, nitrate, phosphore réactif soluble et potassium) étaient tous dans les plages acceptables recommandées pour l'aquaponie, comme rapporté dans des études antérieures (Somerville *et al.*, 2014; Yanes *et al.*, 2020).

En fait, la température de l'eau dans les bassins d'élevage pour les trois densités de stockage variait entre  $28,15 \pm 0,45$  et  $29,91 \pm 0,56$  °C et se situait dans les valeurs acceptables pour la croissance du tilapia, recommandées entre 27 °C et 30 °C.

Le pH est un facteur crucial en aquaponie, nécessaire pour une nitrification réussie, la conversion de l'ammoniac et la fourniture de nitrate aux plantes (Goddek *et al.*, 2015 ; Kloas *et al.*, 2015). Le tilapia tolère un large éventail de pH, mais s'épanouit généralement dans des niveaux de 6,5 à 8,5 (Stone & Thomforde, 2004 ; Yep & Zheng, 2019). Dans nos systèmes, le pH était maintenu dans les plages recommandées idéales pour l'aquaponie, variant entre 6,78 et 7,78, ce qui correspondait aux résultats d'autres études (Rakocy *et al.*, 2006 ; Tawaha *et al.*, 2020).

Dans un système aquaponique, maintenir le pH de l'eau n'est pas seulement crucial pour la croissance des poissons. En fait, la plupart des plantes nécessitent un pH compris entre 6 et 6,5 pour une meilleure absorption des nutriments. Un pH inférieur à 6 peut perturber le processus de nitrification et entraîner une toxicité à l'ammoniac et aux nitrites (Rakocy *et al.*, 2006). Bien que les valeurs de pH dans cette étude soient quelque peu élevées par rapport à la valeur optimale pour la croissance des plantes, nous n'avons détecté aucun stress au cours de l'expérience, ce qui est probablement dû aux interactions qui caractérisent la rhizosphère végétale.

Outre la température et le pH, l'oxygène dissous (OD) représente également l'un des facteurs environnementaux les plus critiques pour le bon fonctionnement physiologique du

tilapia et agit comme un facteur limitant pour la survie des poissons (Yildiz *et al.*, 2017 ; Maucieri *et al.*, 2019).

Dans cette étude, une relation inverse a été observée entre la densité d'alimentation des poissons et le niveau d'oxygène dissous (OD). Cette observation est cohérente avec les résultats obtenus dans notre étude concernant les valeurs d'OD. La faible concentration d'oxygène dissous observée dans l'eau à une densité d'alimentation élevée peut s'expliquer par : i) l'accumulation de matière organique dans les aquariums due aux restes de nourriture et aux excréments de poisson, ce qui aurait pu accroître la consommation d'oxygène par les microbes pour l'oxydation ; et ii) un rapport poids/espace élevé des poissons dans l'aquarium d'élevage.

Étant donné la présence de nutriments dans l'eau des aquariums et des unités de culture de légumes, la quantité de ces nutriments était attribuable aux ions dissous et aux substances organiques produites par les processus biologiques des bactéries nitrifiantes (Kasozi *et al.*, 2021). Les résultats de cette expérience ont montré que l'eau des aquariums présentait des valeurs de nutriments plus élevées que celles des systèmes hydroponiques, avec la même densité de peuplement, pour presque tous les paramètres, suggérant ainsi l'influence bénéfique de la laitue. En particulier, les niveaux de nutriments ont diminué de manière significative, ce qui indique une absorption pour la croissance des plantes. De plus, la concentration d'azote total d'ammonium (TAN), de nitrate et de nitrite augmente avec l'augmentation de la densité de stockage des poissons, à l'exception du potassium et du phosphore réactif soluble, ceci en raison de l'apport plus élevé d'aliments distribués aux poissons selon les traitements. Des tendances similaires ont également été observées dans plusieurs travaux menés par (Shoko *et al.*, 2014 ; Azizah *et al.*, 2016 ; Makori *et al.*, 2017).

L'ammoniac est produit dans un système aquaponique suite à l'excrétion des poissons par les branchies et à la décomposition des aliments non consommés (Eck *et al.*, 2019). Selon (Anantharaja *et al.*, 2017 ; Yildiz *et al.*, 2017), des niveaux élevés d'ammoniac et de nitrite entraînent une réduction de la croissance et de la survie des poissons, et peuvent également causer des dysfonctionnements physiologiques importants, tels que des problèmes de transport de l'oxygène dans le sang.

Au cours de notre étude, la concentration de nitrite a augmenté avec l'augmentation de la densité de peuplement des poissons, mais est restée dans la plage recommandée par (Timmons et Ebeling, 2010), qui est inférieure à 1,0 mg/L. Les niveaux de nitrate ont également augmenté avec l'augmentation de la densité de peuplement, ce qui était étroitement lié à la quantité de nourriture fournie aux poissons. Nos résultats étaient similaires à ceux de

(Tawaha *et al.*, 2020 ; Sabwa *et al.*, 2022), qui ont signalé une augmentation linéaire du nitrate avec l'augmentation de la densité de peuplement et de l'apport alimentaire. De plus, la concentration en nitrate dans notre étude se situait entre 1,13 et 1,35 mg/L, ce qui était proche de celle observée dans l'étude de (Sabwa *et al.*, 2022) où elle était comprise entre 1,11 et 1,34 mg/L.

La réduction des ammoniacs totaux (TAN), des nitrites et des nitrates dans l'eau, comme indiqué par les concentrations plus faibles dans l'unité hydroponique par rapport à l'unité RAS, était probablement due à l'absorption par les plantes (Birolo *et al.*, 2020).

Dans une étude récente, Kasozi et ses collègues (2021) ont suggéré que les micro-organismes présents dans les systèmes aquaponiques, en particulier *Bacillus*, pourraient favoriser la croissance de la laitue et l'accumulation de nitrates. De plus, le *Bacillus* peut influencer les facteurs qui stimulent la croissance des racines, favorisant ainsi une meilleure absorption des nutriments (Bartelme *et al.*, 2019). Les niveaux inférieurs de TAN, de nitrite et de nitrate dans l'eau des unités hydroponiques par rapport à l'eau des aquariums d'élevage de poissons suggèrent probablement que ces nutriments sont absorbés par les plantes racinaires. L'ammoniac, en tant que source majeure d'azote inorganique absorbé par les plantes, peut être converti en matière organique par les micro-organismes via un processus de nitrification, contribuant ainsi à l'élimination de ces nutriments de l'eau (Endut *et al.*, 2011).

### **1.2 Effet de la densité de stockage sur les paramètres zootechniques du tilapia (*Oreochromis niloticus*) dans un système aquaponique**

À partir des données recueillies dans cette étude, les performances de croissance du tilapia sous différentes densités de stockage ont été évaluées, et les résultats indiquent des différences significatives entre les traitements.

Pendant toute la durée de l'étude, des poissons d'un poids moyen initial de 20 g ont été ensemencés et suivis pendant 56 jours pour évaluer la croissance d'*Oreochromis niloticus*. Le poids final du tilapia variait considérablement en fonction des densités de peuplement. En particulier, le poids final moyen dans le traitement T1 (1,5 kg/m<sup>3</sup>) était significativement plus élevé que celui observé dans les traitements T2 (3 kg/m<sup>3</sup>) et T3 (4,5 kg/m<sup>3</sup>). Ces résultats suggèrent que des densités de peuplement plus faibles sont associées à une meilleure croissance et à des poids finaux plus élevés pour le tilapia.

Diem *et al.* (2017), Ferdous *et al.* (2014), Rayhan *et al.* (2018) et Sace et Fitzsimmons (2013) ont mené des études sur l'effet de la densité de peuplement dans les systèmes

aquaponiques et ont constaté que des densités plus basses, similaires à notre traitement T1 ( $1,5 \text{ kg/m}^3$ ), favorisaient des poids finaux plus élevés et un meilleur gain de poids chez le tilapia. Ces résultats soutiennent nos conclusions et sont cohérents avec la relation inverse entre le poids du poisson et la densité de peuplement. Endut *et al.* (2009) ont rapporté des valeurs de densité de peuplement significativement plus élevées utilisées dans des environnements aquacoles par rapport à ce que nous avons utilisé dans notre expérience.

Selon les recherches menées par Baßmann *et al.* (2020) et Maucieri *et al.* (2019), qui ont soutenu Endut *et al.* (2016), les systèmes aquaponiques peuvent utiliser des densités de peuplement en poissons encore plus élevées que celles utilisées dans les RAS (systèmes aquacoles en circuit fermé) et l'aquaculture conventionnelle. Cela peut être le résultat d'une meilleure recirculation de l'eau utilisée dans ces systèmes aquaponiques.

De plus, Palm *et al.* (2014), travaillant également dans le système aquaponique, ont rapporté un taux de croissance spécifique (SGR) de 0,71 % par jour chez le tilapia du Nil dont le poids initial était de 174 g et qui étaient initialement stockés à  $5,6 \text{ kg/m}^3$ , ainsi qu'un SGR de 0,65 % par jour, des valeurs presque similaires à celles trouvées dans la présente étude. De plus, Greenfeld *et al.* (2018) ont constaté que le SGR de la carpe koï (*Cyprinus carpio*) diminuait lorsque la densité de poisson passait de  $1,4 \text{ kg/m}^3$  à  $2,1 \text{ kg/m}^3$  à  $2,8 \text{ kg/m}^3$ , avec un poids initial de 4,24 g élevé dans un système aquaponique.

Nous avons remarqué, que le taux de conversion alimentaire (FCR) le plus élevé se retrouve chez les poissons de la densité de  $4,5 \text{ kg/m}^3$ , suivi des poissons élevés au densité de  $3 \text{ kg/m}^3$ . Cependant Les poissons élevés à la densité de  $1,5 \text{ kg/m}^3$  enregistrent le plus faible taux de conversion alimentaire (FCR).

Nos résultats concernant le taux de conversion alimentaire (FCR) sont en accord avec les conclusions d'Al-Harbi et Siddiqui (2000), qui ont observé que le FCR augmentait avec la densité de peuplement, ce phénomène étant probablement dû à la quantité d'aliment fournie dans chaque traitement. De plus, plusieurs études ont démontré que l'augmentation de la densité de peuplement avait un effet négatif sur les taux de conversion alimentaire des poissons, que ce soit dans les systèmes aquaponiques ou traditionnels d'aquaculture (Maucieri *et al.*, 2019 ; Tran *et al.*, 2019).

### **1.3 Effet de la densité de stockage du tilapia (*Oreochromis niloticus*) sur les performances de croissance de la laitue (*Lactuca sativa*) dans un système aquaponique**

Les résultats obtenus de cette étude ont montré que lorsque la densité de peuplement augmentait dans les différents traitements, il y avait une tendance générale à une croissance accrue de la biomasse moyenne de laitue. Plus spécifiquement, les densités de peuplement plus élevées, telles que 4,5 kg/m<sup>3</sup>, étaient associées à une plus grande accumulation de biomasse dans les plants de laitue, ainsi qu'à un poids moyen plus élevé des têtes, à des feuilles plus longues et plus larges, et à des racines plus longues. Ces résultats suggèrent une possible corrélation positive entre la densité de peuplement du tilapia et la croissance globale de la laitue, ce qui concorde avec les conclusions précédemment rapportées par (Estrada-Perez *et al.*, 2018).

Plusieurs études ont rapporté que la principale différence entre les densités de stockage réside dans les concentrations de nutriments produites, ce qui a influencé la croissance et le développement de la laitue au cours de cette étude (Maucieri *et al.*, 2018 ; Rakocy *et al.*, 2006). Comme le suggère Pérez-Urrestarazu et ses collègues (2019), la productivité des systèmes aquaponiques dépend largement du type de laitue utilisé et des conditions environnementales.

Comparativement à la culture hydroponique conventionnelle, (Barbosa *et al.*, 2015) ont rapporté qu'en moyenne, 144,6 g de laitue pommée étaient récoltés après un cycle complet de 30 jours. Ce chiffre est inférieur à la croissance de laitue obtenue dans nos conditions expérimentales. Conformément aux études précédentes de (Licamele, 2009), ces résultats confirment les systèmes aquaponiques comme une alternative aux systèmes hydroponiques conventionnels et leurs potentiel de produire des rendements importants.

D'ailleurs, la corrélation positive observée entre la densité de peuplement des poissons et la croissance de la laitue dans cette étude peut être expliquée par l'augmentation de la disponibilité des nutriments provenant des déchets de poisson. Avec une densité de peuplement plus élevée des poissons, la concentration de nutriments dans le système aquaponique augmente, ce qui améliore la disponibilité des nutriments pour les plants de laitue. Cette augmentation des nutriments favorise une croissance vigoureuse et une accumulation plus importante de biomasse dans les plants de laitue (Somerville *et al.*, 2014 ; Delaide *et al.*, 2016).

De plus, l'effet positif de la densité de peuplement des poissons sur la croissance de la laitue pourrait être attribué à la stimulation de l'activité microbienne dans le système aquaponique (Sas-Paszt *et al.*, 2023). Avec une densité de peuplement plus élevée des poissons, les populations de bactéries nitrifiantes et rhizosphériques augmentent également. Ces bactéries convertissent l'ammoniac présent dans l'eau en nitrite, puis en nitrate, qui peut être absorbé par les plants de laitue (Delaide *et al.*, 2017 ; Goddek, 2017 ; Kasozi *et al.*, 2021).

(Goddek *et al.*, 2015) ont défini l'aquaponie comme un système intégré de culture d'animaux aquatiques (poissons) et de culture de plantes hydroponiques, basé sur des réservoirs, dans lequel la majorité des nutriments nécessaires à la croissance des plantes proviennent des déchets provenant de l'alimentation des poissons. Plus récemment, (Delaide *et al.*, 2016) ont décrit l'aquaponie comme un système de production d'organismes aquatiques et de plantes dans lequel la majorité (> 50 %) des nutriments nécessaires à la croissance optimale des plantes proviennent des déchets provenant de l'alimentation des organismes aquatiques. Cependant, des engrais sont souvent nécessaires pour compléter les nutriments végétaux qui font défaut dans les déchets de poisson. Nos résultats suggèrent que l'absorption des nutriments végétaux dans les systèmes aquaponiques n'est pas seulement liée à la quantité de nutriments fournis, mais également à leur qualité, influencée par les processus microbiologiques dans le biofiltre, qui sont à leur tour directement et/ou indirectement influencés par la densité des poissons. la laitue a montré des rendements considérables par rapport à ceux obtenus dans les pratiques agricoles conventionnelles (Maucieri *et al.*, 2020).

En général, l'azote est le principal nutriment limitant la croissance des plantes, étant absorbé sous forme de nitrate ou d'ammoniac, et il est également influencé par des paramètres de l'eau tels que le niveau de CO<sub>2</sub>, la température et le pH (Somerville *et al.*, 2014 ; Hu *et al.*, 2015). Cependant, les performances de croissance moins bonnes de la laitue observées avec une densité d'alimentation de 1,5 kg/m<sup>3</sup> peuvent probablement s'expliquer par le fait que les plantes soumises à ce traitement n'ont pas reçu une quantité suffisante de nitrate pour leur croissance par rapport à celles soumises aux traitements de 4,5 kg/m<sup>3</sup> et 3 kg/m<sup>3</sup>. On s'attend à ce que de meilleures performances de croissance des plantes soient obtenues lorsque l'azote est fourni sous forme d'une combinaison d'ammonium et de nitrate (Maucieri *et al.*, 2019).

La laitue contient de nombreux constituants nutritionnels tels que le magnésium (Mg), le manganèse (Mn), le potassium (K), le fer (Fe), le zinc (Zn), le calcium (Ca), le phosphore (P) et d'autres composés bioactifs bénéfiques pour la santé. essentiel pour la santé humaine

(Kim *et al.*, 2016). Récemment, des scientifiques étudient le rôle de la consommation de laitue dans la prévention des maladies en menant quelques études cliniques sur l'homme. Fernandez *et al.*, 1997 ont mené une étude cas-témoins et ont signalé l'existence d'une contre-relation entre la consommation de laitue et le cancer colorectal. De plus, Le magnésium est l'un des éléments minéraux les plus importants car il est nécessaire à de nombreux processus biochimiques. Il faut également mentionner que le magnésium est l'atome central de la chlorophylle, qui joue un rôle clé dans la photosynthèse.

Les résultats obtenus de notre expérimentation sur les taux de minéraux foliaire dans la laitue, montrent que les laitues cultivées dans un système aquaponique avec la densité de stockage (4,5 kg/m<sup>3</sup>) présentent des taux supérieurs en calcium (Ca), magnésium (Mg), sodium (Na) et potassium (K) par rapport aux laitues cultivées avec les densités (3 et 1,5 kg/m<sup>3</sup>) pour les mêmes éléments minéraux.

Cette observation est cohérente avec des études antérieures qui ont également mis en évidence l'effet de la densité de peuplement sur les éléments minéraux dans les cultures aquaponiques.

(Maucieri *et al.*, 2019), ont rapporté dans une étude effectuée sur l'effet de la densité de stockage des poissons sur la qualité de l'eau et les performances de croissance de la carpe européenne et des légumes-feuilles dans un système aquaponique, des niveaux plus élevés de Ca, Mg et K dans les plantes cultivées avec des densités plus élevées.

De plus,(Birolo *et al.*, 2020) ont observé des tendances similaires avec une accumulation accrue de nutriments dans les laitues cultivées à des densités de stockage plus élevées de la truite (*Oncorhynchus mykiss*) dans un système aquaponique.

Ces résultats suggèrent que la densité de stockage dans les systèmes aquaponiques peut influencer la disponibilité et l'accumulation des éléments minéraux dans les plantes cultivées. Ces résultats peuvent être attribués à une disponibilité accrue de nutriments dans le système aquaponique à plus haute densité, ça peut être due à la grande quantité de déchets de poisson et d'une activité microbienne plus élevée favorisant la libération de ces éléments minéraux essentiels pour la croissance des plantes.

En revanche, les laitues cultivées à des densités plus faibles pourraient recevoir moins de nutriments disponibles, ce qui pourrait expliquer les taux inférieurs de Ca, Mg, Na et K observés dans leurs feuilles.

Ces résultats soulignent l'importance de la densité de stockage dans les systèmes aquaponiques pour la nutrition et la santé des plantes cultivées, en mettant en évidence

l'impact significatif de cette variable sur l'absorption et l'accumulation des éléments minéraux dans les tissus végétaux.

Parmi les principaux métabolites présents dans les légumes, les sucres solubles et les acides organiques qui jouent un rôle très important dans leurs caractéristiques gustatives et leur valeur nutritionnelle (Luning *et al.*, 1994). De plus, les sucres solubles issus des composés organiques des plantes qui régulent de nombreux processus de croissance et de développement. Ils contribuent à contrôler le métabolisme des plantes et des diverses réactions au stress pendant toutes les étapes de leur croissance (Gent, 2012). En effet, les glucides favorisent la stabilité de l'acide ascorbique et améliorent ainsi la teneur en vitamines (Birch et Pepper, 1983).

Les sucres solubles les plus couramment présents chez les légumes-feuilles, notamment la laitue, sont le glucose et le fructose (López *et al.*, 2014).

Les résultats relatifs aux teneurs de sucres solubles dans nos laitues ont montré que la densité de stockage du tilapia testée a eu un effet très significatif sur les concentrations en sucre de la laitue entre les différents traitements.

Les laitues de tous les traitements testés présentent un taux de sucres solubles très considérable. Cependant, les laitues de la densité  $4.5\text{kg/m}^3$  présentaient les taux de sucres solubles les plus élevés par rapport aux autres cultivées avec des densités de 3 et  $1.5\text{kg/m}^3$ , qui présentent des taux faibles.

L'accumulation des sucres solubles dans les légumes-feuilles cultivées en systèmes aquaponiques en réponse aux différentes conditions a été documentée par plusieurs auteurs (Gent, 2012; Kim *et al.*, 2016; López *et al.*, 2014; Maucieri *et al.*, 2020).

Duarte *et al.*, 2023, considèrent que dans un système aquaponique, les plantes sont principalement nourries de déchets de poisson issus de l'élevage aquacole. En effet, la densité de stockage plus élevée de poissons dans le système aquaponique peut entraîner une production accrue de déchets, fournissant ainsi plus de nutriments aux plantes cultivées.

Ces nutriments, tels que l'azote, le phosphore et le potassium, sont vitaux pour le métabolisme des plantes et influencent directement leur capacité à produire des sucres solubles par le biais de processus comme la photosynthèse et le métabolisme des glucides. Une disponibilité adéquate de ces nutriments favorise une activité métabolique optimale dans les plantes, stimulant ainsi leur croissance et conduisant à une accumulation accrue de sucres

solubles. En fait, ces résultats sont entièrement cohérents avec les nôtres, ce qu'explique l'accumulation importante de sucres solubles chez les laitues de la densité supérieure de  $4.5\text{kg/m}^3$  dans notre expérimentation.

En revanche, (Matysiak *et al.*, 2023) ont rapporté que une carence en nutriments pourrait entraîner un stress chez les plantes, réduisant leur capacité à synthétiser des sucres solubles et compromettant leur développement.

Ainsi, la gestion efficace de la densité de stockage des poissons dans un système aquaponique est essentielle pour assurer une disponibilité optimale de nutriments aux plantes et favoriser leur santé et leur productivité, y compris la production de sucres solubles essentiels pour leur croissance et leur développement.

# CONCLUSION

L'aquaponie est un système de culture qui fait intervenir des poissons élevés dans un bac et dont les déjections vont servir de matière fertilisante pour faire pousser des plantes cultivées en hydroponie. L'eau, débarrassée par les plantes des substances azotées, toxiques pour les poissons, retourne ainsi dans le bac des poissons selon un cycle continu.

La présente étude avait pour but de concevoir un système aquaponique simple, performant, facile à construire localement et rentable. Au terme de cette étude nous pouvons conclure que la construction de systèmes aquaponiques low-tech est relativement réalisable en Algérie avec du matériel disponible localement. Sa construction et sa maintenance n'exige pas de grandes compétences techniques. Le système peut s'adapter tant à une petite installation familiale qu'à une exploitation commerciale. Ce travail constitue un solide point de départ pour l'exploration des possibilités qu'offre l'aquaponie dans les régions arides et en Algérie en particulier.

En ce qui concerne la performance du système, le maintien de la bonne qualité de l'eau au niveau de ces derniers à nécessiter plus d'eau que la moyenne. Mais cela se comprend car les systèmes n'ont pas encore atteint leur potentiel de conversion des nutriments. Il est important de noter que cette performance relativement faible obtenue au niveau de tous les systèmes en général peut aussi être due à la durée brève de l'expérimentation.

L'installation d'un nouveau système nécessite souvent une période préliminaire d'ajustements soutenue avant qu'on constate par la suite l'expression de la performance du système.

La durée de l'essai constituant une des limites de cette étude, les résultats obtenus ne nous permettent pas encore de déterminer la rentabilité du système. Cependant nous pouvons prévoir qu'il sera plus rentable à grande échelle et avec une densité élevée de poissons.

La densité de peuplement du tilapia a influencé le rendement du système aquaponique NFT en en termes de qualité de l'eau et de production de tilapia et de laitue. De plus, le poids et le SGR des poissons ont été influencés négativement par la densité de peuplement, mais la conversion alimentaire (FCR) a augmenté avec une densité croissante de poissons. En général, les performances de croissance des poissons étaient meilleures au niveau le plus bas densité de peuplement ( $1,5 \text{ kg/m}^3$ ) par rapport aux densités plus élevées. Cela ne veut pas dire que plus les densités de peuplement ne peuvent pas être adoptées, surtout si des normes de qualité de l'eau appropriées sont respectées. Le rendement de la laitue a augmenté avec l'augmentation de la densité de peuplement de poissons en termes de biomasse et longueur des racines. La capacité du système à produire des nutriments est directement influencée par la quantité de l'aliment qui est fourni. Contrairement aux poissons, la densité de peuplement a un

effet positif sur la croissance, l'efficacité et la production globale de la laitue cultivée dans un système aquaponique. Les valeurs de la qualité de l'eau se situaient dans les concentrations recommandées en fonction de l'empoisonnement densité utilisée. Dans l'ensemble, la production réussie de légumes, la performance, la santé des poissons et L'efficacité du système indique que cette approche rentable et low-tech peut être efficacement mise à l'échelle dans des régions arides avec des dépenses de construction minimales.

A travers la présente étude, nous avons entamé une exploration des possibilités de l'aquaponie en Algérie. Plusieurs pistes restent à investiguer sérieusement pour que l'aquaponie s'intègre effectivement dans le contexte socio - économique des pays du sud. Les pistes à exploiter à priori sont selon nous les suivantes :

En premier lieu réalisé plusieurs cycles de production afin de déterminer les performances réelles de notre système aquaponique.

Répéter l'expérimentation avec des densités plus élevées de stockage en testant différents ratios alimentaires pour les poissons.

Réaliser les essais avec les mêmes espèces de cette étude mais à avec un système à grande échelle dans les conditions locales.

Evaluer les performances de notre système en incluant des sondes dans le but de réduire les coûts d'électricité.

Evaluer la faisabilité du système avec une source d'énergie alternative (photovoltaïque, éolienne ou tout autre pouvant délivrer avec assurance et régularité de l'énergie).

Identifier les sous-produits alimentaires locaux adaptés pour la préparation d'aliments pour poissons en aquaponie.

Etudier la faisabilité de la conversion d'une exploitation piscicole en exploitation aquaponique.

# **REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES**

- Abdel Magid, A. M., & Babiker, M. M. (1975).** Oxygen consumption and respiratory behaviour of three Nile fishes. *Hydrobiologia*, 46(4), 359–367. <https://doi.org/10.1007/BF00028279>.
- Ajitama, P., Effendi, H., & Hariyadi, S.(2018).** Usage of fisheries rearing waste for butterhead lettuce (*Lactuca sativa* L. var. capitata) cultivation in recirculation. *Nature Environment and Pollution Technology*, 17(1), 145–151.
- Albaret, J.-J.1982.** Reproduction et fécondité des poissons d'eau douce de Côte d'Ivoire. *Rev. Hydrobiol. Trop.* 15(4) :347-371.
- Alifujiang, Y., Abuduwaili, J., Maihemuti, B., Emin, B., & Groll, M. (2020).** Innovative trend analysis of precipitation in the Lake Issyk-Kul Basin, Kyrgyzstan. *Atmosphere*, 11(4), 1–16. <https://doi.org/10.3390/atmos11040332>.
- Anantharaja, K., Kumar, R., Mohapatra, B. C., Pillai, B. R., Devaraj, C., & Majhi, D. (2017).** International Journal of Fisheries and Aquatic Studies 2017; 5(4): 24-29 Growth and survival of climbing perch, *Anabas testudineus* in Nutrient Film Technique (NFT) Aquaponics System. *Ijfas*, 5(4), 24–29. [www.fisheriesjournal.com](http://www.fisheriesjournal.com).
- Azizah, E., Fathurraahman, L., Jusoh, A., & Wan Norsani, W. C. (2016).** Aquaponics Recirculation System: A Sustainable Food Source for the Future Water Conserves and Resources. *Malaysian Journal of Applied Sciences*, 1(1), 1–12. [https://www.researchgate.net/publication/303546975\\_Aquaponics\\_Recirculation\\_System\\_A\\_Sustainable\\_Food\\_Source\\_for\\_the\\_Future\\_Water\\_Conserves\\_and\\_Resources](https://www.researchgate.net/publication/303546975_Aquaponics_Recirculation_System_A_Sustainable_Food_Source_for_the_Future_Water_Conserves_and_Resources).
- AZAZA, M.S., MENSI, F., ABDELMOULEH, A. and KRAÏEM, M.M. 2005.** Elaboration d'aliments Secs Pour Le Tilapia de Nil *Oreochromis niloticus* (L., 1758) en élevage dans les eaux géothermales du Sud Tunisien. *Bulletin de l'Institut National des Sciences et Technologies de la Mer de Salammbô*, 32: 23–30.
- AZAZA, M.S., MENSI, F., IMOROU TOKO, I., DHRAIEF, M.N., ABDELMOULEH, A., BRINI, B. and KRAÏEM, M.M. 2006.** Effets de l'incorporation de la farine de tomate dans l'alimentation du tilapia du Nil (*Oreochromis niloticus* L. 1758) en élevage dans les eaux géothermales du Sud Tunisien. *Bulletin de l'Institut National des Sciences et Technologies de la Mer de Salammbô*, 33: 47–58.
- BAMBA, Y., OUATTARA, A., DA COSTA, K.S. and GOURENE, G. 2008.** Production de *Oreochromis niloticus* avec des aliments à base de sous-produits agricoles. *Sciences & Nature*, 5(1), 89–99.

## *Références bibliographiques*

- BAMBA, Y., DOUMBIA, L., OUATTARA, S., OUATTARA, A., DA COSTA, K.S. and GOURENE, G. 2015. Effet de l'incorporation de sous-produits de cacao et d'arachide dans l'alimentation du tilapia (*Oreochromis niloticus* L.) élevé en bassin. *Afrique Science*, 11(5).
- Bartelme, R. P., Smith, M. C., Sepulveda-Villet, O. J., & Newton, R. J. (2019). Component Microenvironments and System Biogeography Structure Microorganism Distributions in Recirculating Aquaculture and Aquaponic Systems. *MSphere*, 4(4), 1–15. <https://doi.org/10.1128/msphere.00143-19>
- Behnassi, M., & El Haiba, M. (2022). Implications of the Russia–Ukraine war for global food security. *Nature Human Behaviour*, 6(6), 754–755. <https://doi.org/10.1038/s41562-022-01391-x>.
- Behmene, I, E (2020). Reproduction artificielle, régime alimentaire et croissance chez le Poisson Chat africain *Clarias gariepinus* (Burchell, 1822) et le Tilapia du Nil *Oreochromis niloticus* (Linnaeus, 1757) en captivité. Thèse de doctorat, Université de Mostaganem, Algérie. 262p.
- Benmehaia, R., & Atallaoui, K. (2018). Analyse de la Densité de Plantation des Palmeraies Dans la Wilaya de Biskra à Travers Des Données Exhaustives. *Revue des BioRessources*, 8 (2), 96- 104.
- Birch, G.G., Pepper, T., 1983. Protection of vitamin C by sugars and their hydroge- nated derivatives. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 31, 980–985.
- Birolo, M., Bordignon, F., Trocino, A., Fasolato, L., Pascual, A., Godoy, S., Nicoletto, C., Maucieri, C., & Xiccato, G. (2020). Effects of stocking density on the growth and flesh quality of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) reared in a low-tech aquaponic system. *Aquaculture*, 529, 735653. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2020.735653>.
- Bittsanszky, A., Uzinger, N., Gyulai, G., Mathis, A., Junge, R., Villarroel, M., Kotzen, B., Komives, T., 2016. Nutrient supply of plants in aquaponic systems. *Ecocycles* 2, 17–20. <https://doi.org/10.19040/ecocycles.v2i2.57>.
- BLE, M.C., OTCHOUMOU, K.A., ALLA, Y.L., KAUSHIK, S. 2011. Utilisation des farines végétales dans l'alimentation des poissons d'élevage en milieu tropical. *Fiches Techniques et Documents de Vulgarisation*, 11: 7–11.
- Both, A.J., L.D. Albright, R.W. Langhans, R.A. Reiser, and B.G. Vinzant. 1994. Hydroponic lettuce production influenced by integrated supplemental light levels in a controlled environment agriculture facility: experimental results. *International Society of*

## *Références bibliographiques*

- Horticulture Science Acta Horticulturae 418: III International Symposium on Artificial Lighting in Horticulture.
- Boudibi, S. (2021). Modeling the Impact of Irrigation Water Quality on Soil. January.
- Boutouchent, T.(2002). Introduction du Tilapia Oreochromis niloticus en Algérie. Agroligne, N°24 août – septembre.
- Bouznit, M., Pablo-Romero, M. P., & Sánchez-Braza, A. (2023). Economic growth, human capital, and energy consumption in Algeria: evidence from cointegrating polynomial regression and a simultaneous equations model. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(9), 23450–23466. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-23657-7>
- Boxman, S. E., Zhang, Q., Bailey, D., & Trotz, M. A. (2017). Life Cycle Assessment of a Commercial-Scale Freshwater Aquaponic System. *Environmental Engineering Science*, 34(5), 299–311. <https://doi.org/10.1089/ees.2015.0510>.
- Boyd, C.E., 2015. Overview of aquaculture feeds: global impacts of ingredient use. *Feed Feed. Pract. Aquac.* 3–25. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100506-4.00001-5>.
- Bugbee, B., 2004. Nutrient management in recirculating hydroponic culture. *Acta Hortic.* 648, 99–112. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2004.648.12>.
- Buzby, K.M., Lin, L.S., 2014. Scaling aquaponic systems: Balancing plant uptake with fish output. *Aquac. Eng.* 63, 39–44. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2014.09.002>
- CEAEQ (2013). Mineraldetermination. Argon plasma spectrometrymethod, MA 200, Met 1.2, Rev 4. Quebec, Canada. 24p. 108.
- Chamberlain, W. G., (1993). Aquaculture trends and feed projections .*Journal of World Aquaculture Society.*, 24: 19–29. Dinh, Q.M., Qin, J.G., Dittmann, S. & Tran, D.D. (2017). Seasonal variation of food and feeding in burrowing goby *Parapocryptes serperaster* (Gobiidae) at different body sizes. *Ichthyological Research* 64 (2), 179–189.
- Chan, C. Y., Tran, N., Dao, D. C., Sulser, T. B., Phillips, M. J., Batka, M., & Preston, N. (2017). Fish to 2050 in the ASEAN region. WorldFish Center and International Food Policy Resource Institute.
- Connolly, K. (2010). Optimization of a Backyard Aquaponic Food Production System. 74 p
- Courard, L. (2005). Matériaux de construction. Université de Liège. 327 p.
- Courtenay Jr, W. R., & Hensley, D. A. (1980). Special problems associated with monitoring exotic species. *Biological monitoring of fish*, 281-307.
- Crozier, A., M.E.J. Lean, M.S. McDonald, and C. Black. 1997. Quantitative analysis of the flavenoid content of commercial tomatoes, onions, lettuce, and celery. *J. Agr.Food. Chem.* 45:590I595.

## *Références bibliographiques*

- Da Silva, L.B., Jose, L., Barcellos, G., Quevedo, R.M., de Souza, S.M.G., Kessler, A.M. Kreutz, L.C., Ritter, F., Finco, J.A., Bedin, A.C., 2008. Introduction of jundia *Rhamdia quelen* (Quoy and Gaimard) and Nile Tilapia *Oreochromis niloticus* (Linnaeus) increases the productivity of carp polyculture in southern Brazil. *Aquaculture Research*, 39, 542-551.
- Davidson, J., Good, C., Barrows, F.T., Welsh, C., Kenney, P.B., Summerfelt, S.T., 2013. Comparing the effects of feeding a grain- or a fish meal-based diet on water quality, waste production, and rainbow trout *Oncorhynchus mykiss* performance within low exchange water recirculating aquaculture systems. *Aquac. Eng.* 52, 45–57. <https://doi.org/10.1016/J.AQUAENG.2012.08.001>.
- Delaide, B. (2017). A study on the mineral elements available in aquaponics, their impact on lettuce productivity and the potential improvement of their availability.
- Delaide, B., Delhaye, G., Dermience, M., Gott, J., Soyeurt, H., & Jijakli, M. H. (2017). Plant and fish production performance, nutrient mass balances, energy and water use of the PAFF Box, a small-scale aquaponic system. *Aquacultural Engineering*, 78, 130–139. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2017.06.002>.
- Delaide, B., Goddek, S., Gott, J., Soyeurt, H., & Jijakli, M. H. (2016). Lettuce (*Lactuca sativa* L. var. *Sucrino*) growth performance in complemented aquaponic solution outperforms hydroponics. *Water (Switzerland)*, 8(10), 1–11. <https://doi.org/10.3390/w8100467>.
- Delis, P.C., Effendi, H., Krisanti, M. and Hariyadi, S. (2015). Treatment of aquaculture waste water using *Vetiveria zizanioides* (Liliopsida, Poaceae). *AACLBioflux*, 8, 616-625.
- DeLong, P.D., Losordo, M.T. and Rakocy, J.E.2009. Tank Culture of Tilapia. SRAC Publication, No. 282, Texas, USA, 7 pp.
- Depardieu, C., Prémont, V., Boily, C., & Caron, J. (2016). Sawdust and bark-based substrates for soilless strawberry production: Irrigation and electrical conductivity management. *PLoS ONE*, 11(4), 1–20. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0154104>.
- Diem, T.N.T., Konnerup, D. & Brix, H. (2017) Effects of recirculation rates on water quality and *Oreochromis niloticus* growth in aquaponic systems. *Aquacultural Engineering*, 78, 95–104.
- Diver S. 2006. Aquaponics-Integration of Hydroponics with Aquaculture. National Sustainable Agriculture Information Service, Australia.
- Drouiche, N., Ghaffour, N., Naceur, M. W., Lounici, H., & Drouiche, M. (2012). Towards sustainable water management in Algeria. *Desalination and Water Treatment*, 50(1–3), 272–284. <https://doi.org/10.1080/19443994.2012.719477>.

## *Références bibliographiques*

- Dubois, M., & Gillet, K. A. (1956). Dosage des sucres totaux à l'ortho-toluidine. *J. Agr. Food Chem*, vol. 13, p. 137.
- Duarte, E., Silva, E. D. B., Moreira, F. D. C., Braga, D., & Santos, S. G. D. (2023). Nutrients in lettuce production in aquaponics with tilapia fish compared to that with hydroponics. *Revista Caatinga*, 36, 21-32.
- Eck, M., Körner, O., & Jijakli, M. H. (2019). Nutrient Cycling in Aquaponics Systems. *Aquaponics Food Production Systems*, 231–246. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-15943-6\\_9](https://doi.org/10.1007/978-3-030-15943-6_9).
- Eekhout, J. P. C., Hunink, J. E., Terink, W., & De Vente, J. (2018). Why increased extreme precipitation under climate change negatively affects water security. *Hydrology and Earth System Sciences*, 22(11), 5935–5946. <https://doi.org/10.5194/hess-22-5935-2018>.
- ELEGBE, H.A., IMOROU TOKO, I., AGBOHESSI, P., BLE, C., BANAG, A., CHIKOU, A., EYANGO, M. and LALEYE, P. 2015. Co-culture Clarias gariepinus-Oreochromis niloticus : Quels avantages pour l'amélioration des performances zootechniques et économiques des poissons élevés dans les « Whedos » du delta de l'Ouémé au Bénin? *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 9(4): 1937–1949.
- El-Sayed, A.-F. M. (2006). *Tilapia Culture*. Oceanography Department, Faculty of Science, Alexandria University, Alexandria, Egypt. Cabi Publishing 293 p Elegbe,
- Endut, A., Jusoh, A., Ali, N., Wan Nik, W.N.S. & Hassan, A. (2009) Effect of flow rate on water quality parameters and plant growth of water spinach (*Ipomoea aquatica*) in an aquaponic recirculating system. *Desalination and Water Treatment*, 5(1–3), 19–28.
- Endut, A., A. Jusoh, N. Aóí, W.B. Wan Nik and A. Hassan, (2010). A study on the optimal hydraulic loading rate and plant ratios in recirculation aquaponic system. *Bioresour Technology*, 101, 1511-1517.
- Endut, A., Jusoh, A., Ali, N., & Nik, W. B. W. (2011). Nutrient removal from aquaculture wastewater by vegetable production in aquaponics recirculation system. *Desalination and Water Treatment*, 32(1–3), 422–430. <https://doi.org/10.5004/dwt.2011.2761>.
- Endut, A., Lananan, F., Jusoh, A. & Cik, W.N.W. (2016) Aquaponics recirculation system: a sustainable food source for future water conservation and resources. *Malaysian Journal of Applied Sciences*, 1(1), 1–12.
- Estrada-Perez, N., Hernandez-Llamas, A., M. J. Ruiz-Velazco, J., Zavala-Leal, I., Romero-Bañuelos, C. A., Cruz-Crespo, E., Juárez-Rossete, C., Domínguez-Ojeda, D., & Campos-Mendoza, A. (2018). Stochastic modelling of aquaponic production of tilapia

## *Références bibliographiques*

- (*Oreochromis niloticus*) with lettuce (*Lactuca sativa*) and cucumber (*Cucumis sativus*). *Aquaculture Research*, 49(12), 3723–3734. <https://doi.org/10.1111/are.13840>.
- Espinal CA, Matulić D (2019) Recirculating aquaculture technologies. In: Goddek S, Joyce A, Kotzen B, Burnell GM (eds) *Aquaponics food production systems*. Springer, Cham, p 35–77.
- FAO (2007) *The State of Food and Agriculture: Paying Farmers for Environmental Services*. Agricultural Development Economics Division (ESA), FAO, Rome.
- FAO. (2014). *Vegetable production guidelines for 12 common aquaponic plants*. *Aquaponics*, 169–181.
- FAO. (2016). *Global per capita fish consumption rises above 20 kilograms a year*. <http://www.fao.org/news/story/en/item/421871/icode/> Accessed 8 June 2017.
- FAO. (2017b). *FAO: Tilapia du Nil - Accueil*. Consulté 28 juillet 2017, à l'adresse <http://www.fao.org/fishery/affris/profil-des-especes/nile-tilapia/tilapia-du-nil-accueil/fr/>.
- FAO Fisheries Department, Fishery Information, Data and Statistics Unit. (2019). *FishStatJ, a tool for fishery statistics analysis, release: 3.5.0, universal software for fishery statistical time series*. *Global aquaculture production: Quantity 1950–2017; Value 1950–2017; Global capture production (pp. 1950–2017)*. FAO.
- FAO, 2020. *The state of world fisheries and aquaculture 2020. Sustainability in action*. Rome. <https://doi.org/10.4060/ca9229en>.
- FAO, IFAD, UNICEF, W. and W. (2023). *Food security and nutrition in the world*. In *The Lancet Diabetes and Endocrinology* (Vol. 10, Issue 9). [https://doi.org/10.1016/S2213-8587\(22\)00220-0](https://doi.org/10.1016/S2213-8587(22)00220-0).
- FAO. 2024. *The State of World Fisheries and Aquaculture 2024. Blue Transformation in action*. Rome. <https://doi.org/10.4060/cd0683en>.
- Ferdous,Z., Masum,M.A.& Ali, M.M. (2014) Influence of stocking density on growth performance and survival of monosex tilapia (*Oreochromis niloticus*) fry. *International Journal of Research in Fisheries and Aquaculture*, 4(2), 99–103.
- Fischer, N. (2018). *The History of Lettuce – PLANT PROFILES* <https://www.motherearthgardener.com/plant-profiles/edible/the-history-of-lettuce-zm0z18szphe>.
- Fitzsimmons, K. and Posadas, B. (1997). Consumer demand for tilapia products in the US and the effects on local markets in exporting countries. Pp. 613I632. In: *Tilapia Aquaculture: Proceedings of the Fourth International Symposium on Tilapia in*

## *Références bibliographiques*

- Aquaculture. Editor. Fitzsimmons, K. Northeast Regional Agricultural Engineering Service Publication, No. NRAES I 106. Ithaca, N. Y.
- Fitzsimmons, K., (2000). Tilapia, the most important aquaculture species in the 21st century. In: Fitzsimmons K., Filho J.C., (Eds). Tilapia aquaculture, proceedings, 5th International Symposium on Tilapia in Aquaculture. Rio-de-Janeiro (Brasil): Panorama da Aquicultura
- Forzieri, G., Feyen, L., Rojas, R., Flörke, M., Wimmer, F., & Bianchi, A. (2014). Ensemble projections of future streamflow droughts in Europe. *Hydrology and Earth System Sciences*, 18(1), 85–108. <https://doi.org/10.5194/hess-18-85-2014>
- Foucard, P., Tocqueville, A., Gaumé, M., Labbé, L., Baroiller, J. F., Lejolivet, C., Lepage, S. et Arfeuille, 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*, 15 p.
- Gazula, A., M.D. Kleinhenz, J.G. Streeter, and A.R. Miller. 2005. Temperature and cultivar effects on Anthocyanin and chlorophyll b concentrations in three related lollo rosso lettuce cultivars. *HortScience* 40(6): 1731I1733.
- Geay, F., Ferrarresso, S., Zambonino-Infante, J.L., Bargelloni, L., Quentel, C., Vandeputte, M., Kaushik, S., Cahu, C.L., Mazurais, D., 2011. Effects of the total replacement of fish-based diet with plant-based diet on the hepatic transcriptome of two European sea bass (*Dicentrarchus labrax*) half-sibfamilies showing different growth rates with the plant-based diet. *BMC Genomics* 12, 522. <https://doi.org/10.1186/1471-2164-12-522>.
- Gélinas, L., & Olivier, M. (2013). *Plastiques Biosourcés : Étude De Leur Performance Environnementale Comparativement Aux Plastiques Pétrochimiques*. Université de sherbrooke.
- Gent, M. P. (2012). Composition of hydroponic lettuce: effect of time of day, plant size, and season. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 92(3), 542-550.
- Goddek, S. (2017). Opportunities and Challenges of Multi-Loop Aquaponic Systems (Issue November). <http://library.wur.nl/WebQuery/wurpubs/528526>.
- Goddek, S., Joyce, A., Kotzen, B., Dos-Santos, M., 2019a. Aquaponics and Global Food Challenges, in: Goddek, S., Joyce, A., Kotzen, B., Burnell, G.M. (Eds.), *Aquaponics Food Production Systems*. Springer International Publishing, Cham, pp. 3–17. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-15943-6\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-030-15943-6_1).
- González-Orozco, M. M., Prieto-Ruíz, J. Á., Aldrete, A., Hernández-Díaz, J. C., Chávez-Simental, J. A., & Rodríguez-Laguna, R. (2018). Nursery production of *Pinus*

## *Références bibliographiques*

- engelmannii Carr. with substrates based on fresh sawdust. *Forests*, 9(11), 1–15. <https://doi.org/10.3390/f9110678>.
- Graber, A.; Junge, R. Aquaponic Systems: Nutrient recycling from fish wastewater by vegetable production. *Desalination* 2009, 246, 147–156.
- Greenfeld, A., Becker, N., Mcilwain, J., Fotedar, R., & Bornman, J. F. (2018). Economically viable aquaponics? Identifying the gap between potential and current uncertainties. *Reviews in Aquaculture*, 1–15. <https://doi.org/10.1111/raq.12269>.
- HADJEB, A., LEBBOUZ, I., & ADJAMI, Y. (2022). Effect of replacement of dietary fish meal with carob moth (*Ectomeylois ceratoniae*) larvae on growth performance and feed utilization of *Oreochromis niloticus*. *Egyptian Journal of Agricultural Research*, 0(0), 0–0. <https://doi.org/10.21608/ejar.2022.135639.1230>.
- Hamed, Y., Hadji, R., Redhaounia, B., Zighmi, K., Bâali, F., & El Gayar, A. (2018). Climate impact on surface and groundwater in North Africa: a global synthesis of findings and recommendations. *Euro-Mediterranean Journal for Environmental Integration*, 3(1), 1–15. <https://doi.org/10.1007/s41207-018-0067-8>.
- Hamiche, A. M., Stambouli, A. B., & Flazi, S. (2015). A review on the water and energy sectors in Algeria: Current forecasts, scenario and sustainability issues. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 41, 261–276. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.08.024>.
- Harlaut, P. (2016). Tout savoir sur l'aquaponie.
- HOULIHAN, D., BOUJARD, T. and JOBLING, M. 2001. Food intake in fish. Blackwell Science Ltd: Oxford.
- Hu, Z., Lee, J. W., Chandran, K., Kim, S., Brotto, A. C., & Khanal, S. K. (2015). Effect of plant species on nitrogen recovery in aquaponics. In *Bioresource Technology* (Vol. 188). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.01.013>.
- Hua, K., Bureau, D.P., 2012. Exploring the possibility of quantifying the effects of plant protein ingredients in fish feeds using meta-analysis and nutritional model simulation-based approaches. *Aquaculture* 356–357, 284–301. <https://doi.org/10.1016/J.AQUACULTURE.2012.05.003>
- 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, Institut de Recherches Agronomiques et Forestières, Libreville, 47 p.
- IPUNGU, L., NGOY, K., BANZE, K., LUMFWA, K., KAFUND, M. 2015. L'étude de la croissance de *Oreochromis niloticus* par la fertilisation des étangs : Le cas de la ferme Naviundu Lubumbashi. *Journal of Applied Biosciences*, 91: 8503–8510.

## *Références bibliographiques*

- Jimoh, W. A. (2020). Growth, nutrient utilization, body composition, hematology and histopathology of the liver of *Clarias gariepinus* fed cooked sunflower based diets. *Ege Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 37(4), 343–351. <https://doi.org/10.12714/egejfas.37.4.04>
- Jones, S. (2002). Evolution of aquaponics. *Aquaponics Journal*, 24, 14–17.
- Jorquera, M., Martínez, O., Maruyama, F., Marschner, P., de la Luz Mora, M., 2008. Current and Future Biotechnological Applications of Bacterial Phytases and Phytase-Producing Bacteria. *Microbes Environ.* 23, 182–191. <https://doi.org/10.1264/jsme2.23.182>.
- Joyce, A., Goddek, S., Kotzen, B., Wuertz, S., 2019a. Aquaponics: Closing the Cycle on Limited Water, Land and Nutrient Resources, in: *Aquaponics Food Production Systems*. Springer International Publishing, Cham, pp. 19–34. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-15943-6\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-030-15943-6_2).
- Joyce, A., Timmons, M., Goddek, S., Pentz, T., 2019b. Bacterial Relationships in Aquaponics: New Research Directions. *Aquaponics Food Prod. Syst.* 145–161. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-15943-6\\_6](https://doi.org/10.1007/978-3-030-15943-6_6).
- Junge, R., König, B., Villarroel, M., Komives, T., & Jijakli, M. H. (2017). Strategic points in aquaponics. *Water*, 9(3), 182.
- Kanangire, K., 2001. Effets de l'alimentation des poissons avec *Azolla* sur la production d'un écosystème agro-piscicole en zones marécageuses au Rwanda. Diss. Doct. Sciences. Université Notre-Dame de la Paix, Namur, Belgique 220 p.
- Kasozi, N., Kaiser, H., Wilhelmi, B., Massa, D., & Vandecasteele, B. (2021). Effect of *Bacillus* spp. on Lettuce Growth and Root Associated Bacterial Community in a Small-Scale Aquaponics System. <https://doi.org/10.3390/agronomy11050947>.
- Katz, S.H. and Weaver, W.W., 2003. *Encyclopedia of food and culture*. Scribner.
- KESTEMONT, P. and BARAS, E. 2001. Environmental factors and feed intake: Mechanisms and interactions. In *Food intake in fish*, Houlihan D Boujard T Jobling M (ed). Blackwell Science Ltd: Oxford; 131–156.
- Kloas, W., Groß, R., Baganz, D., Graupner, J., Monsees, H., Schmidt, U., Staaks, G., Suhl, J., Tschirner, M., & Wittstock, B. (2015). A new concept for aquaponic systems to improve sustainability, increase productivity, and reduce environmental impacts. *Aquaculture Environment Interactions*, 7(2), 179–192. <https://doi.org/10.3354/aei00146>.
- La Crosse, Wi, & Chicago. (2017). Fishing for a Better Farming Solution: Family- Owned Aquaponics Operation Advances with Energy Efficient Heating System. <http://ecowb>

## *Références bibliographiques*

- oy.com/2017/05/18/fishi ng- for- a- bette r- farmi ng- solut ion- famil y- owned - aquap onics - opera tion- advan ces- with- energ y- effic ient- heati ng- syste m/ Accessed 8 June 2017.
- LACROIX, E. 2004. Pisciculture en zone tropicale. GTZ & GFA Terra Systems, Ed.. Hamburg Allemagne.
- Lazard, J. (2009). La pisciculture des tilapias. Cahiers Agricultures, 18(2): 393–401.
- Lennard, W. Aquaponic integration of Murray Cod (*Maccullochella peelii peilii*) aquaculture and lettuce (*Lactuca sativa*) hydroponics. (2005). Ph.D. Thesis, School of Applied Sciences, Department of Biotechnology and Environmental Biology, RMIT University, Melbourne, Australia.
- Lennard, W., 2012. Aquaponic system design parameters.: Fish to plant ratios (feeding rate ratios). *Aquaponics Solutions*, 3:10.
- Lennard W (2017) Commercial aquaponic systems: integrating recirculating fish culture with hydroponic plant production. In press.
- Liang, J.Y. and Chien, Y.H. (2013). Effects of feeding frequency and photoperiod on water quality and crop production in a tilapia water spinach raft aquaponics system. *Int Biodet Biodeg*, 85, 693-700. doi:10.1016/j.ibiod.2013.03.029.
- Licamele, J. (2009). Biomass production and nutrient dynamics in an aquaponics system (Doctoral dissertation, The University of Arizona).
- Lim CE, Webster CD, Li MH. 2006. Feeding practices. In: Lim CE, Webster CD, editors. *Tilapia biology, culture, and nutrition*. Binghamton: The Haworth Press; p. 547–559.
- Losordo TM, Masser MP, Rakocy J (1998) Recirculating aquaculture tank production systems: an overview of critical considerations. *SRAC No. 451*, pp 18–31.
- López, A., Javier, G. A., Fenoll, J., Hellin, P., and Flores, P. (2014). Chemical composition and antioxidant capacity of lettuce: Comparative study of regular- sized (Romaine) and baby-sized (Little Gem and Mini Romaine) types. *Journal of Food Composition and Analysis*, 33(1), 39-48. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jfca.2013.10.001>.
- Love DC, Fry JP, Genello L, Hill ES, Frederick JA, Li X et al. (2014) An international survey of aquaponics practitioners. *PLoS One* 9:1–10.
- Love DC, Fry JP, Li X, Hill ES, Genello L, Semmens K et al. (2015) Commercial aquaponics production and profitability: Findings from an international survey. *Aquaculture* 435: 67–74.
- Ludwick, A.E. 2002. *Western fertilizer handbook*. 9th edition. Interstate Publ., Danville, Ill.

- M'balaka, M., Kassam, D., & Rusuwa, B. (2012). The effect of stocking density on the growth and survival of improved and unimproved strains of *Oreochromis shiranus*. *Egyptian Journal of Aquatic Research*, 38(3), 205–211. <https://doi.org/10.1016/j.ejar.2012.12.013>.
- Madigan, M.T., Martinko, J.M., 2007. *Biologie des micro-organismes*, 11th ed. Pearson Education France, Paris.
- MADRID, J.A., BOUJARD, T. and SANCHEZ-VÁZQUEZ, F.J. 2001. Feeding rhythms. In *Food intake in fish*. Blackwell Science Ltd: Oxford; 189–215.
- Makori, A. J., Abuom, P. O., Kapiyo, R., Anyona, D. N., & Dida, G. O. (2017). Effects of water physico-chemical parameters on tilapia (*Oreochromis niloticus*) growth in earthen ponds in Teso North Sub-County, Busia County. *Fisheries and Aquatic Sciences*, 20(1), 1–10. <https://doi.org/10.1186/s41240-017-0075-7>.
- MASHAI, N., RAJABIPOUR, F., MOHAMMADI, M., SARSANGI, H., BITARAF, A., HOSSEIN-ZADEH, H. and SHARIF-ROHANI, M. 2016. Reproduction of Nile Tilapia, *Oreochromis niloticus* in Brackish Water. *Journal of Applied Aquaculture*, 28(1): 1–8.
- Marsic N. K., and J. Osvald. 2002. The influence of different concentration of nitrogen in nutrient solution on plant growth and nitrate accumulation in aeroponically grown lettuce. *Agrochimica* 46:55I65.
- Matysiak, B., Kaniszewski, S., & Mieszczakowska-Fraç, M. (2023). Growth and quality of leaf and romaine lettuce grown on a vertical farm in an aquaponics system: Results of farm research. *Agriculture*, 13(4), 897.
- Maucieri, C., Nicoletto, C., Junge, R., Schmautz, Z., Sambo, P., & Borin, M. (2018). Hydroponic systems and water management in aquaponics: A review. *Italian Journal of Agronomy*, 13(1), 1–11. <https://doi.org/10.4081/ija.2017.1012>
- Maucieri, C., Nicoletto, C., Zanin, G., Birolo, M., Trocino, A., Sambo, P., Borin, M., & Xiccato, G. (2019). Effect of stocking density of fish on water quality and growth performance of European Carp and leafy vegetables in a low-tech aquaponic system. *PLoS ONE*, 14(5). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0217561>.
- Mancuso, M. (2014). Aquaculture advancement. *Journal of Aquaculture Research & Development*, 5(1), 1.
- McPharlin, I.R., R.C. Jeffery, and D.H. Pitman. 1996. Phosphorous requirements of winter planted lettuce (*latuca sativa*) on a karrakatta sand and residual value of phosphate as determined by soil test. *Austral. J. Exp. Agr.* 36:897I903.

## *Références bibliographiques*

- MÉDALE, F. and KAUSHIK, S. 2009. Les sources protéiques dans les aliments pour les poissons d'élevage. *Cahiers Agricultures*, 18(2): 103–111.
- Melrose, J.; Perroy, R.; Careas, S. World population prospects. United Nations 2015, 1, 587–92.
- Memon, A. M., AlHems, L. M., Yamaç, S. S., Barry, M. S., Alam, A., & AlMuhanna, A. (2022). Aquaponics in Saudi Arabia: Initial Steps towards Addressing Food Security in the Arid Region. *Agriculture (Switzerland)*, 12(12), 1–15. <https://doi.org/10.3390/agriculture12122094>.
- Miličić, V., Thorarinsdottir, R., Dos Santos, M., & Turnšek Hančič, M. (2017). Commercial aquaponics approaching the European market: to consumers' perceptions of aquaponics products in Europe. *Water* 9, 1e22. <https://doi.org/10.3390/w9020080>.
- MIKOLASEK, O., KHUYEN, T.D., MEDOC, J.M. and PORPHYRE, V. 2009. L'intensification écologique d'un modèle de pisciculture intégrée: Recycler les effluents d'élevages porcins de la province de Thai Binh (Nord Vietnam). *Cahiers Agricultures*, 18(2-3): 235–241.
- Mullins, C., Nerrie, B., & Sink, T. D. (2010). Principles of Small-Scale Aquaponics, 1–8.
- Nelson, R. L. 2008. Aquaponic Food Production. Montello, WI: Nelson and Pade Inc Press.
- Nichols MA, Lennard W (2010) Aquaponics in New Zealand. *Practical Hydroponics and Green-houses*, 115: 46–51.
- Nwestwood. (2010). Oxygen - Sizing your Aquaponic Air System. Retrieved June 17, 2019, from <http://www.urbanaquaponics.com/content.php?129-Oxygen-Sizing-your-Aquaponic-Air-System>.
- Oké, V., & Goosen, N. J. (2019). The effect of stocking density on profitability of African catfish (*Clarias gariepinus*) culture in extensive pond systems. *Aquaculture*, 507(April), 385–392. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2019.04.043>.
- OUEDRAOGO, S. 2000. Biologie de reproduction du tilapia : *Oreochromis niloticus* du lac de barrage de la Comoé. Mémoire d'Ingénieur du Développement Rural, Université Polytechnique de Bobo-Dioulasso, Bobo-Dioulasso. 77 p.
- Palm, H. W., Bissa, K., & Knaus, U. (2014). Significant factors affecting the economic sustainability of closed aquaponic systems. Part II: Fish and plant growth. *Aquaculture, Aquarium, Conservation & Legislation*, 7(3), 162–175.
- Palm, H. W., Knaus, U., Appelbaum, S., Goddek, S., Strauch, S. M., Vermeulen, T., ... & Kotzen, B. (2018). Towards commercial aquaponics: A review of systems, designs, scales and nomenclature. *Aquaculture international*, 26(3), 813-842.

## *Références bibliographiques*

- Parker, Rick 2002. *Aquaculture Science*, Second Edition. Delmar Albany, New York 2002.
- Pattillo, D. A. (2017a). An Overview of Aquaponic Systems : Hydroponic Components An Overview of Aquaponic Systems : Hydroponic Components, 11.
- Pattillo, D. A. (2017b). *Aquaponic system design and management*.
- Pérez-Urrestarazu, L., Lobillo-Eguíbar, J., Fernández-Cañero, R., & Fernández-Cabanás, V. M. (2019). Suitability and optimization of FAO's small-scale aquaponics systems for joint production of lettuce (*Lactuca sativa*) and fish (*Carassius auratus*). *Aquacultural Engineering*, 85(April), 129–137. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2019.04.001>.
- Pitrat M, Foury C (2004) *Histoires de légumes - Des origines à l'orée du XXIe siècle - Chapitre 12: Laitues (Maisonneuve B)*. INRA, Paris.
- Popma, T. and Masser, M. (1999). *Tilapia Life History and Biology*. Southern Regional Aquaculture Center. Publication No. 283.
- Qin G, Liu CCK, Richman NH, Moncur JET (2005) Aquaculture wastewater treatment and reuse by wind-driven reverse osmosis membrane technology: a pilot study on Coconut Island, Hawaii. *Aquacult Eng* 32:365–378. doi:10.1016/j.aquaeng.2004.09.002.
- Rafiee, G., Saad, C.R., 2005. Nutrient cycle and sludge production during different stages of red tilapia (*Oreochromis sp.*) growth in a recirculating aquaculture system. *Aquaculture* 244, 109–118. <https://doi.org/10.1016/J.AQUACULTURE.2004.10.029>
- Rakocy, J. E. *Island Perspectives*. 1989, pp. 5–10.
- Rakocy JE, Bailey DS, Shultz RC, Thoman ES. (2004) Update on tilapia and vegetable production in the uvi aquaponic system. 15. <https://cals.arizona.edu/azaqua/ista/ista6/ista6web/pdf/676.pdf>
- Rakocy, J. E.; Shultz, R. C.; Bailey, D. S.; Thoman, E. S. ( 2004). Aquaponic production of tilapia and basil: Comparing a batch and staggered cropping system. In; Nichols, M. A., Ed.; Vol. 648, pp. 63–69.
- Rakocy, J. E., Masser, M. P., & Losordo, T. M. (2006). Recirculating aquaculture tank production systems: Aquaponics- integrating fish and plant culture. SRAC Publication - Southern Regional Aquaculture Center, 454, 16.
- Rasband, J., J. Salzman, and M. Squillace. (2004). *Natural Resources Law And Policy (university Casebook Series)*. Foundation Press. New York, New York.
- Rayhan, Z.M, Rahman, M.A, Hossain, A.M, Akter, T. & Akter, T. (2018) Effect of stocking density on growth performance of monosex tilapia (*Oreochromis niloticus*) with Indian spinach (*Basella alba*) in a recirculating aquaponic system. *International Journal of*

## *Références bibliographiques*

- Environment, Agriculture and Biotechnology (IJEAB), 3(2), 343. <https://doi.org/10.22161/ijeab/3.2>. 5ISSN:2456-1878.
- Rebouças, V. T., Lima, F. R. dos S. C., Holanda, D. De, & Sá, M. V. do C. e. (2015). Tolerance of Nile tilapia juveniles to highly acidic rearing water. *Acta Scientiarum. Animal Sciences*, 37(3), 227. <https://doi.org/10.4025/actascianimsci.v37i3.27031>.
- Resh, H. M. (2001). *Hydroponic Food Production*. Woodbridge Press Publishing Company. Santa Barbra, CA 93012.
- Resh, H. M. (2012). *Hydroponic food production : a definitive guidebook for the advanced home gardener and the commercial hydroponic grower*; Boca Raton, FL : CRC Press: Boca Raton, FL.
- Ru, D., Liu, J., Hu, Z., Zou, Y., Jiang, L., Cheng, X., Lv, Z., 2017. Improvement of aquaponic performance through micro- and macro-nutrient addition. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 24, 16328–16335. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-9273-1>
- Sabwa, J. A., Manyala, J. O., Masese, F. O., Fitzsimmons, K., Achieng, A. O., & Munguti, J. M. (2022). Effects of stocking density on the performance of lettuce ( *Lactuca sativa* ) in small-scale lettuce-Nile tilapia ( *Oreochromis niloticus* L.) aquaponic system. *Aquaculture, Fish and Fisheries*, September, 1–12. <https://doi.org/10.1002/aff2.71>.
- Sace, C.F. & Fitzsimmons, K.M. (2013) Vegetable production in a recirculating aquaponic system using Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) with and without freshwater prawn (*Macrobrachium rosenbergii*). *Academia Journal of Agricultural Research*, 1, 236–250.
- Sas-Paszt, L., Trzeciński, P., Lisek, A., Głuszek, S., Matysiak, B., & Kaniszewski, S. (2023). The Influence of Consortia of Beneficial Microorganisms on the Growth and Yield of Aquaponically Grown Romaine Lettuce. *Agronomy*, 13(2). <https://doi.org/10.3390/agronomy13020546>.
- Savidov, N., Hutchings, E., & Rakocy, J. (2005). Fish and plant production in a recirculating aquaponic system: A new approach to sustainable agriculture in Canada. *International Conference and Exhibition on Soilless Culture: ICESC 2005*, 742, 209–221.
- Schmautz, Z., Loeu, F., Liebisch, F., Graber, A., Mathis, A., Bulc, T.G., Junge, R., 2016. Tomato productivity and quality in aquaponics: Comparison of three hydroponic methods. *Water* 8, 1–21. <https://doi.org/10.3390/w8110533>.
- Schneider, O., Sereti, V., Eding, E.H., Verreth, J.A.J., 2004. Analysis of nutrient flows in integrated intensive aquaculture systems. *Aquac. Eng.* 32, 379–401. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2004.09.001>

## *Références bibliographiques*

- Seawright, D. E.; Walker, R. B.; Stickney, R. R. (1998). Nutrient dynamics in integrated aquaculture- hydroponics systems. *Aquaculture*, 160, 215–237.
- Simeonidou M, Paschos I, Gouva E, Kolygas M, Perdikaris C (2012) Performance of a small-scale modular aquaponic system. *AAEL Bioflux*. 5(4):182–188.
- Simonne, A., E. Simonne, R. Eitenmiller, and C.H. Coker. 2002. Bitterness and composition of lettuce varieties grown in southeastern United States. *HortTechnology* 12:721I726.
- Shabeer, M. S. (2016). Isolation and characterization bacteria related to aquaponics for testing its bio potential. B.Tech Biotechnology thesis, National Institute of Technology, Calicut, 60 p.
- Shafahi, M., & Woolston, D. (2014). *Aquaponics: a sustainable food production system*, 1–4.
- ShavartISachray, L.D., D. Weiss, M. Reuveni, A. NissimILevi, and M. OrenIShamir. 2002. Increased anthocyanin accumulation in aster flowers at elevated temperatures due to magnesium treatment. *Physiol. Plant* 114:559I565.
- Sharif Uddin, M., Milsten, A., Azim, M.E. Abdul Wahab, M., Verdegem, M. and Verreth, J., 2008. Effects of stocking density, periphyton substrate and supplemental feed on biological processes affecting water quality in earthen Tilapia–prawn polyculture ponds. *Aquaculture Research*, 39, 1243-1257.
- Shoko, A. P., Limbu, S. M., Mrosso, H. D. J., & Mgaya, Y. D. (2014). A comparison of diurnal dynamics of water quality parameters in Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*, Linnaeus, 1758) monoculture and polyculture with African sharp tooth catfish (*Clarias gariepinus*, Burchell, 1822) in earthen ponds. *International Aquatic Research*, 6(1). <https://doi.org/10.1007/s40071-014-0056-8>.
- Secondat, M. (1952). Les variations de la température et de la concentration en oxygène dissous des eaux lacustres et des eaux courantes. Leur retentissement sur la distribution des poissons. *Bulletin Français de Pisciculture*, (167), 52–59. <https://doi.org/10.1051/kmae:1952001>.
- Siddiqui, A. Q., & Al-Harbi, A. H. (1999). Nutrient budgets in tanks with different stocking densities of hybrid tilapia. *Aquaculture*, 170(3–4), 245–252. [https://doi.org/10.1016/S0044-8486\(98\)00421-9](https://doi.org/10.1016/S0044-8486(98)00421-9).
- Smith, R. (2010). Cilantro production in California. *Plant Pathology*, 2010(12), 1– 4.
- Soderberg, R.W. (1995) *Flowing Water Fish Culture*. CRC Press, Inc., Boca Raton, FL.
- Somerville, C., Cohan, M., Pantanella, E., Stankus, A., & Lovatelli.A. (2014). Producción de alimentos en acuaponía a pequeña escala. In *FAO Fisheries and Aquaculture Technical Paper* (Vol. 589).

## *Références bibliographiques*

- Sonneveld C, Voogt W (2009) Plant nutrition in future greenhouse production, in: plant nutrition of greenhouse crops. Springer Netherlands, pp 393–403. [https://doi.org/10.1007/978-90-481-2532-6\\_17](https://doi.org/10.1007/978-90-481-2532-6_17).
- Sreejariya, P., Raynaud, T., Dabbadie, L., & Yakupitiyage, A. (2016). Solak, Kaleli & Baytut\_2016\_Trfas\_The Distribution of Cymbelloid Diatoms in Yalova Runningwaters. *Turkish Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 16(4), 953–959. <https://doi.org/10.4194/1303-2712-v16>.
- Stone, N. M., & Thomforde, H. K. (2004). Understanding your fish pond water analysis report. University of Arkansas Cooperative Extension Program Printing Service, January, 34. <http://www.ianrpubs.unl.edu/liveg.pdf>
- Sveier, H., Raae, A. J., & Lied, E. (2000). Growth and protein turnover in Atlantic salmon (*Salmo salar* L.); the effect of dietary protein level and protein particle size. *Aquaculture*, 185(1–2), 101–120. [https://doi.org/10.1016/S0044-8486\(99\)00344-0](https://doi.org/10.1016/S0044-8486(99)00344-0).
- Sugita, H., Nakamura, H., Shimada, T., 2005. Microbial communities associated with filter materials in recirculating aquaculture systems of freshwater fish. *Aquaculture*. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2004.09.028>.
- Tacon, A.G.J., Metian, M., 2008. Global overview on the use of fish meal and fish oil in industrially compounded aquafeeds: Trends and future prospects. *Aquaculture* 285, 146–158. <https://doi.org/10.1016/J.AQUACULTURE.2008.08.015>.
- Tawaha, A. R. Al, Wahab, P. E. M., Jaafar, H. B., Zuan, A. T. K., & Hassan, M. Z. (2020). Effects of Fish Stocking Density on Water Quality, Growth Performance of Tilapia and Yield of Butterhead Lettuce Grown in Decoupled Recirculation Aquaponic Systems. *Journal of Ecological Engineering*, 22(1), 8–19. <https://doi.org/10.12911/22998993/128692>.
- Timmons, M.B. (1996). Successes and failures in commercial recirculating aquaculture. *Aquaculture Engineering Society Proceedings II*. NRAES 98(1), 141-150.
- Timmons, M.B., J.M. Ebling, F.W. Wheaton, S.T. Summerfelt and B.J. Vinci (2002). *Recirculating Aquaculture Systems 2nd Edition*. Northern Regional Aquaculture Center Publication No. 01I002. Cayuga Aqua Ventures Ithaca, New York.
- Timmons, M., & Ebeling, J. (2010). *Recirculating Aquaculture Systems*. In *Aquaculture Production Systems*.
- Timmons, M.B., Ebeling, J.M., 2013. *Recirculating Aquaculture*, 3rd ed. Ithaca Publishing, New York.

## *Références bibliographiques*

- Thorarinsdottir, R. I., Kledal, P. R., Skar, L. G., Sustaeta, F., Ragnarsdottir, K. V., Mankasingh, U., R. Charlie Shultz. (2015). Aquaponics Guidelines.
- Tran, N., Chu, L., Chan, C. Y., Genschick, S., Phillips, M. J., & Kefi, A. S. (2019). Fish supply and demand for food security in Sub-Saharan Africa: An analysis of the Zambian fish sector. *Marine Policy*, 99, 343–350. <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2018.11.009>
- Tokuyama T, Mine A, Kamiyama K, Yabe R, Satoh K, Matsumoto H, Takahashi R, Itonaga K (2004) *Nitrosomonas communis* strain YNSRA, an ammonia-oxidizing bacterium, isolated from the reed rhizosphere in an aquaponics plant. *J Biosci Bioeng* 98(4):309–312.
- Wang, C.Y., Chang, C.Y., Chien, Y.H. and Lai, H.T. (2016). The performance of coupling membrane filtration in recirculating aquaponic system for tilapia culture. *Int Biodet Biodeg*, 107, 21-30. doi:10.1016/j.ibiod.2015.10.016.
- Wang, C., Geater, A., & Tansakul, R. (1988). Effects of acid water on survival and growth rate of Nile Tilapia (*Oreochromis niloticus*). *The Second International Symposium on Tilapia in Aquaculture*, 0(15), 433.
- Wongkiew S, Hu Z, Chandran K, Lee JW, Khanal SK (2017) Aquaponic systems for sustainable resource recovery: linking nitrogen transformations to microbial communities. *Aquacult Eng* 76:9–19
- Wright, S. D. (2018). *Aquaponic System Design and Modeling Ammonia Production : An Overview of Aquaponics.* : [https://scholar.rose-hulman.edu/mechanical\\_engineering\\_grad\\_theses](https://scholar.rose-hulman.edu/mechanical_engineering_grad_theses) 58p.
- van Rijn J (2013) Waste treatment in recirculating aquaculture systems. *Aquac Eng* 53:49–56. <https://doi.org/10.1016/J.AQUAENG.2012.11.010>.
- Yanes, A. R., Martinez, P., & Ahmad, R. (2020). Towards automated aquaponics: A review on monitoring, IoT, and smart systems. *Journal of Cleaner Production*, 263, 121571. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121571>
- Yep, B., & Zheng, Y. (2019). Aquaponic trends and challenges e A review. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.290>
- Yildiz, H. Y., Robaina, L., Pirhonen, J., Mente, E., Domínguez, D., & Parisi, G. (2017). Fish welfare in aquaponic systems: Its relation to water quality with an emphasis on feed and faeces-A review. *Water (Switzerland)*, 9(1). <https://doi.org/10.3390/w9010013>.

## *Références bibliographiques*

Zekki, H., Gauthier, L., Gosselin, A., 1996. Growth, Productivity, and Mineral Composition of Hydroponically Cultivated Greenhouse Tomatoes, with or without Nutrient Solution Recycling. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 121, 1082–1088.