

Évaluation de la performance d'un système aquaponique simple pour la production de tilapia et de légumes (Laitue et Amarante) au Bénin

Auteur : Hounsa, Prosper Marie-Guillaume

Promoteur(s) : Jijakli, Haissam; Raulier, Pierre

Faculté : Gembloux Agro-Bio Tech (GxABT)

Diplôme : Master de spécialisation en production intégrée et préservation des ressources naturelles en milieu urbain et péri-urbain

Année académique : 2018-2019

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/7659>

Avertissement à l'attention des usagers :

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

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

Évaluation de la performance d'un système aquaponique simple pour la production de tilapia et de légumes (Laitue et Amarante) au Bénin

PROSPER MARIE-GUILLAUME HOUNSA

**TRAVAIL DE FIN D'ETUDES PRÉSENTE EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE MASTER DE
SPECIALISATION EN PRODUCTION INTEGREE ET PRESERVATION DES RESSOURCES NATURELLES
EN MILIEU URBAIN ET PERI-URBAIN**

ANNEE ACADEMIQUE 2018-2019

(CO)-PROMOTEURS:

PROF HAÏSSAM JIJAKLI

DR PIERRE RAULIER

Copyright 2019. Toute reproduction du présent document par quelque procédé que ce soit ne peut être réalisée qu'avec l'autorisation de l'auteur et de l'autorité académique de Gembloux Agro-Bio Tech.

« Le présent document n'engage que son auteur »

Dans ce cas, l'autorité académique est représentée par le(s) promoteur(s) membre du personnel(s) enseignant de GxABT

REMERCIEMENTS

- Je remercie très sincèrement le Professeur Haissam JIJAKLI, responsable du Master en Production Intégrée et Préservation des Ressources Naturelles en milieu urbain et péri-urbain (PPRN) et Co-promoteur de ce travail. Vous avez accepté dès le début, encadrer mon travail et m'intégrant dans votre unité de recherche. Veuillez recevoir Professeur, l'expression de ma profonde gratitude.
- Je remercie du fond du cœur Dr Pierre RAULIER, Co-promoteur de ce travail. Votre disponibilité, votre esprit d'écoute et vos conseils pertinents ont permis l'amélioration de la qualité de ce travail. Veuillez recevoir toute ma sympathie et ma reconnaissance.
- Merci à tous les professeurs du Master PPRN pour leur dévouement à nous donner une bonne formation. Recevez toute ma reconnaissance.
- Un spécial Merci à Monsieur Marius AKPOFFO pour son soutien et ses conseils lors des travaux de recherche. Qu'il reçoit toute ma gratitude pour son sens profond de l'amitié.
- Je remercie sincèrement Monsieur Innocent TOKPON pour sa généreuse contribution et sa disponibilité malgré ses multiples occupations. Qu'il reçoit toute ma fraternelle reconnaissance.
- Je remercie également Mme Mireille VANOVERSTRAETEN, Messieurs Johannes R. FAGBOHOUN, Joseph HOUNDEHIN, Moukarame LAWANIN pour leurs conseils avisés. Qu'ils reçoivent toute ma considération.
- J'exprime ma profonde gratitude envers l'ARES (l'Académie de Recherche et d'Enseignement Supérieur de la Belgique) pour avoir accepté financer notre formation en Belgique.
- J'adresse mes sincères remerciements la Fondation Roi BAUDOUIN, qui a rendu possible mon stage par son soutien fort louable pour l'acquisition du matériel.
- Je remercie les membres du jury qui auront à évaluer ce travail et à l'améliorer à travers leurs critiques et suggestions constructives.
- Enfin, j'adresse mes plus sincères et chaleureux remerciements à ma très chère famille : ma petite famille pour le sacrifice consenti ; ma mère et ma petite sœur, qui m'ont accompagné, aidé, soutenu et encouragé tout au long de la réalisation de ce travail.

TABLE DES MATIERES

REMERCIEMENTS	ii
TABLE DES MATIERES	iii
LISTES DES SIGLES ET ABREVIATIONS	vi
LISTE DES TABLEAUX	vii
LISTES DES FIGURES	viii
LISTE DES PHOTOS	viii
ABSTRACT	x
RESUME	xi
INTRODUCTION	1
1. REVUE DE LITTERATURE	3
1.1 L'aquaponie : généralités	3
1.1.1 Définition	3
1.1.2 Historique de l'aquaponie	4
1.1.3 Les systèmes aquaponiques	4
1.1.4 Etat des lieux de l'aquaponie en Afrique et au Bénin	5
1.2 Présentation des systèmes aquaponiques low-tech	9
1.2.1 Les bacs à poissons	9
1.2.2 Les Filtres mécaniques	10
1.2.3 Les Filtres biologiques	12
1.2.4 Le réservoir de vidange	14
1.2.5 Les composantes hydroponiques	15
1.2.6 Le Mouvement de l'eau	22
1.2.7 L'aération des unités aquaponiques	23
1.3 Les poissons en aquaponie	24
1.3.1 Choix des espèces en pisciculture	24
1.3.2 Les espèces de poissons adaptées en aquaponie au Bénin	25
1.3.3 Quantité de poissons	28
1.4 Les plantes en aquaponie	28
1.4.1 Le choix des légumes en aquaponie	28
1.4.2 Ratio plantes - poissons	30
QUESTION DE RECHERCHE	33
OBJECTIFS	33

2. METHODOLOGIE	34
2.1. Mise en place et fonctionnement de l'expérimentation.....	34
2.1.1. Localisation du site de l'expérimentation.....	34
2.1.2. Systèmes aquaponiques	34
2.1.3. Fonctionnement et maintenance du système	37
2.2. Matériel vivant	38
2.3. Protocole expérimental	38
2.4. Collecte et analyse des données	39
2.4.1. Qualité de l'eau	39
2.4.2. Croissance des poissons et des plantes.....	40
2.4.3. Consommation d'énergie électrique.....	42
2.4.4. Consommation en eau	42
2.5. Analyses Statistiques	42
3. RESULTATS	43
3.1. Conception du système.....	43
3.1.1. Coût d'installation du système.....	43
3.1.2. Fonctionnement du système.....	43
3.2. Qualité de l'eau	45
3.2.1. Evolution du pH et de l'électroconductivité de l'eau.....	45
3.2.2. Température de l'eau	46
3.2.3. L'azote dans le système	47
3.3. Croissance des poissons.....	48
3.3.1. Evolution du poids des tilapias	48
3.3.2. Evolution de la croissance spécifique des tilapias	50
3.3.3. Taux de conversion des tilapias	50
3.4. Croissance des plants d'amarante	51
3.4.1. Effet de la densité des tilapias sur le rendement de l'amarante	51
3.4.2. Effet de la densité de tilapia sur la croissance des plants d'amarante.....	52
3.5. Croissance des plants de laitue.....	54
3.5.1. Effet de la densité des tilapias sur le rendement de laitue	54
3.5.2. Effet de la densité de tilapia sur la croissance des plants de laitue	55
4. DISCUSSION.....	57
4.1. Analyse économique	57
4.2. Performance du système	57

4.2.1. Qualité de l'eau	57
4.2.2. Consommation en eau et en énergies	58
4.3. Effet de la densité des poissons sur la production.....	59
4.3.1. Production des poissons.....	59
4.3.2. Production des plantes.....	60
CONCLUSION	62
PERSPECTIVES.....	62
BIBLIOGRAPHIE	64
ANNEXES	a

LISTES DES SIGLES ET ABREVIATIONS

% : Pourcentage

°C : Degrés Celcius

µs : Micro simens

AFNOR : Association Française de Normalisation

CaCO : Carbonate de calcium

CO₂ : 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

m² Mètre carré

m³ : Mètre cube

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

mg : milligramme

MS : Matière sèche

NFT : Nutrient Film Technique

NH₃ : Ammoniaque

NH4: Ion Ammonium

NO2: Nitrite

NO3: nitrate

O2 : 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 DES TABLEAUX

Tableau 1: Fish Feeding Rate and Frequency by Size of Tilapia (at 28°C)	31
Tableau 2: Tilapia Feeding Rates and Frequencies by Water Temperature Water.....	32
Tableau 3 : Les différents composants du système	35
Tableau 4 : Liste des matériaux de construction du système	36
Tableau 5 : Coût de réalisation d'un système aquaponique.....	43
Tableau 6 : Temps de travail par système.....	43
Tableau 7 : Synthèse des paramètres de croissance des tilapias	51
Tableau 8 : Synthèse de la croissance de l'amarante	53
Tableau 9 : Synthèse de la croissance des plants de laitue	55
Tableau 10 : Récapitulatif de la qualité de l'eau	b
Tableau 11 : Charges fixes d'une unité aquaponique.....	d
Tableau 12 : Charges variables par traitement	d
Tableau 13 : Charges variable totales par an et par traitement	e
Tableau 14 : Scénario de revenue de production par traitement	e
Tableau 15 : Scénario de revenu pour une année de production par unité aquaponique	f
Tableau 16 : Scénario de marges brute pour une année de production par traitement.....	f

LISTES DES FIGURES

Figure 1 : Cycle de l'azote	3
Figure 2 : Schéma du siphon en U	14
Figure 3 : Schéma du siphon cloche	14
Figure 4 : Différentes zones des lits de culture	22
Figure 5 : Consommation en eau du système durant les 6 semaines d'expérimentation	44
Figure 6 : Evolution de l'électroconductivité de l'eau	46
Figure 7 : Evolution du pH de l'eau	46
Figure 8 : Evolution de la concentration en ammoniac	47
Figure 9 : Evolution de la concentration de nitrite	48
Figure 10 : Evolution de la concentration de nitrate (NO ₃)	48
Figure 11 : Evolution du poids des tilapias durant la période de l'essai	49
Figure 12 : Biomasse totale moyenne par densité de tilapias	49
Figure 13 : Evolution du taux moyen de croissance spécifique du tilapias	50
Figure 14 : taux de conversion des tilapias	51
Figure 15 : Rendement moyen des plants d'amarantes	52
Figure 16 : Evolution de la hauteur des plantes d'amarante par traitement	53
Figure 17 : Rendement de la laitue par traitement	54
Figure 18 : Evolution des hauteurs moyennes des plants de laitue	55
Figure 19 : Evolution de la température Moyenne et de l'humidité relative Moyenne de l'abri a	a
Figure 20 : Evolution de la température de l'eau	a
Figure 21 : Evolution de la dureté carbonatée	b
Figure 22 : Evolution de la dureté totale de l'eau	b

LISTE DES PHOTOS

Photo 1: Production hors sol de la tomate au Bénin.....	8
Photo 2 : Différentes formes de bacs à poissons.....	10
Photo 3 Filtre à tambour	11
Photo 4 Filtre à sable	11
Photo 5 Filtre à tourbillon	12
Photo 6 : Différentes formes de biofiltre	13
Photo 7 : Composants du système NFT	16
Photo 8: Culture en eau profond	17

Photo 9: Système de lit de culture	19
Photo 10: Substrat de gravier volcanique	20
Photo 11: Gravier de construction.....	20
Photo 12 : Billes d'argiles.....	21
Photo 13 : Construction de l'abri et installation des systèmes sur le toit	34
Photo 14 : Installation des unités aquaponiques	37
Photo 15 : Matériel végétal	38
Photo 16 : Matériels d'analyse des paramètres de l'eau.....	39
Photo 17 : Prélèvement des données de croissance des poissons	40
Photo 18 : Prélèvement des données de croissance des plantes.....	41
Photo 19 : Matériels utilisés pour la détermination de la matière sèche	42

Evaluation of the performance of simple aquaponic system for tilapia and vegetable production (Lettuce and Amaranth) in Benin

ABSTRACT

There is a growing interest in aquaponics as an emerging integrated production system that combines recirculating aquaculture practices with hydroponics to produce fish and vegetables. Despite this interest, there is a critical lack of scientific information on aquaponics in developing countries. The present study aims to fill this lack by providing technical and scientific informations through the design and evaluation of the performance of a simple aquaponic system with locally available materials in Benin. After designing the aquaponics modules, we spent 3 weeks cycling the systems before starting the actual experiments with three (03) densities (10, 20 and 40) of nil tilapia (*Oreochromis niloticus*) of about 50 g in one bin containing 200 L of water. The beds of culture of an area of 1m² welcomed every 15 plants of lettuce (*Lactuca sativa* var: maruli) and 15 plants of amaranth (*Amaranthus cruentus*). The trial, therefore, included three (03) treatments (DP10, DP20, and DP40) repeated four (4) times. Tilapia are fed daily with 15 g, 30 g and 60 g depending on their density. The water quality parameters were measured 3 times daily for temperature, electroconductivity, and pH then once a week for GH, KH and NH4, NO2 and NO3 concentrations. Plant growth parameters were measured on the 7th, 14th, 21st and 28th days after transplanting. As for tilapia growth, the data were collected on the 14th, 28th and 42nd days of breeding. The results show that the water quality was maintained for the three treatments with water consumption of 204.62 L ± 34.93; 297.875 L ± 55.02 and 367.625 L ± 67.06 respectively for DP10, DP20, and DP40. The concentrations of the various water parameters measured are still below the standards obtained in aquaponics since the systems do not have still mature before the end of the trial period (63 days in total). DP 10 fish have the highest weight gain (27.7 g ± 4) but the DP40 that produce more fish biomass (761.7g ± 95.39) after 42 days breeding. As for seedlings we recorded the highest yield of amaranth with DP10 (955g / m²) followed by DP40. The highest yield of lettuce is obtained with DP40 (624.97 g / m²). Scenarios of profitability show that only DP40 promises a positive gross margin in the case of its best productions

Keywords: Aquaponics; water quality, tilapia, lettuce, amaranth.

RESUME

L'aquaponie suscite un intérêt croissant en tant que système de production intégré émergent permettant de combiner les pratiques d'aquaculture en recirculation et de la culture hydroponique pour produire du poisson et des légumes. Malgré cet intérêt, on note un manque crucial d'informations scientifiques concernant l'aquaponie dans les pays en développement. La présente étude vise à combler un tant soit peu ce vide en apportant d'informations techniques et scientifiques à travers la conception et l'évaluation de la performance d'un système aquaponique simple avec des matériaux disponibles localement au Bénin. Après conception des unités aquaponiques, nous avons passé 3 semaines à cybler les systèmes avant de commencer les expérimentations proprement dites. Nous avons testé (03) densités (10, 20 et 40) de tilapias du nil (*Oreochromis niloticus*) d'environ 50 g dans un bac contenant 200 L d'eau. Les lits de culture d'une superficie de 1m² ont accueillis chacun 15 plants de laitue (*Lactuca sativa* var : maruli) et 15 plants d'amarante (*Amaranthus cruentus*). L'essai comprenait donc trois (03) traitements (DP10, DP20 et DP40) répétés quatre (4) fois. Les tilapias sont nourris avec 15 g, 30g et 60 g d'aliments pour poissons par jour respectivement suivant leur densité. Les paramètres de qualité de l'eau ont été mesurés 3 fois par jour pour la température, l'électroconductivité (EC) et le pH puis une fois par semaine pour le GH, le KH et les concentrations en NH4, NO2 et NO3. Les paramètres de croissance des plantes ont été mesurés le 7^{ème}, le 14^{ème}, le 21^{ème} et le 28^{ème} jour après repiquage. Quant à la croissance des tilapias, les données ont été collectées le 14^{ème}, le 28^{ème} et le 42^{ème} jour d'élevage.

Les résultats montrent que la qualité de l'eau est maintenue pour les trois traitements moyennant une consommation en eau de 204,62 L ± 34,93 ; 297,875 L ± 55,02 et 367,625 L ± 67,06 respectivement pour DP10, DP20 et DP40. Les concentrations des différents paramètres de l'eau mesurés sont encore en dessous des standards obtenus en aquaponie étant donné que les systèmes n'ont pas encore atteint leur maturité avant la fin de durée impartie à l'expérimentation (63 jours au total). Les poissons de la DP 10 ont le gain de poids le plus élevé individuelles (27,7 g ± 4) mais c'est la DP40 qui permet de produire plus de biomasse de poisson (761.7g ± 95,39) au bout de 42 jours d'élevage. Quant aux plantes nous avons enregistré le plus grand rendement d'amarante avec la DP10 (955g/m²) suivie de la DP40. Le rendement le plus élevé de laitue est obtenu avec la DP40 (624,97 g/m²). Les scénarii de rentabilité montrent que seul DP40 promet une marge brute positive dans le cas de ses meilleures productions.

Mots clés : Aquaponie ; qualité de l'eau, tilapias, laitue, amarante.

INTRODUCTION

Actuellement, 55% de la population mondiale vit en zone urbaine et cette proportion devrait passer à 68% d'ici 2050. Les projections montrent que l'urbanisation, combinée à la croissance de la population mondiale pourrait ajouter 2,5 milliards d'habitants supplémentaires aux zones urbaines d'ici 2050, dont près de 90% en Asie et en Afrique (United Nations, 2018). Il est donc vital de trouver de l'espace pour produire de la nourriture de qualité au plus près des consommateurs.

Dans les pays en développement, l'agriculture urbaine joue un rôle majeur et concerne surtout les produits frais et périssables, comme la plupart des produits maraîchers, le lait, les œufs (Aubry, 2013). L'agriculture urbaine et périurbaine est reconnue comme enjeu un majeur en termes d'approvisionnement des villes, d'emplois, d'activités génératrices de revenus et de gestion de l'environnement mais aussi et surtout en termes de lutte contre l'insécurité alimentaire. (Maty Diao Ba, 2003)

Récemment, le développement de la technologie a rendu possible des avancées majeures dans le domaine de l'agriculture (Alderman, 2015). L'agriculture de précision s'est énormément développée au cours des 20 dernières années afin d'augmenter les rendements et les profits tout en diminuant les impacts environnementaux de l'agriculture traditionnelle (McBratney, Whelan, & Ancev, 2014). Parallèlement, les avancées technologiques ont aussi entraîné l'apparition de nombreuses techniques agricoles innovantes (Kozai, Niu, & Takagaki, 2016). La culture d'intérieur se développe avec la promesse d'une agriculture respectueuse de l'environnement (Castonguay & Berge, 2013). Ce qui permet d'avoir une production annuelle jusqu'à 100 fois plus importante grâce à une production non-interrompue et un environnement entièrement contrôlé, offrant des conditions de croissance optimales, tout en diminuant drastiquement le risque de pertes (Kozai et al., 2016). L'hydroponie nécessite toutefois un apport continu de tous les nutriments dans les quantités et proportions correctes. Les formulations sont complexes et l'évolution des éléments nutritifs en milieu aqueux ne l'est pas moins. Quel que soit le système de fertigation choisi (ouvert ou fermé), les techniques de production doivent être conformes à la législation sur la protection de l'environnement (Pivot, Gilli, & Carlen, 2005).

Parallèlement, l'industrie de l'aquaculture cherche elle aussi à réduire ses rejets afin de respecter des normes environnementales strictes, mais aussi afin de répondre aux demandes des consommateurs qui accordent de plus en plus d'importance à l'origine des produits aquatiques (Meybeck, Laval, Lévesque, & Parent, 2017). L'aquaculture constitue également une source

vitale d'emplois, de nourritures et d'opportunités économiques, en particulier pour les petites communautés des pays du sud, mais elle est aussi devenue une activité économique majeure: un poisson sur deux destinés à l'alimentation humaine est désormais issu de l'élevage et près de 40% de la production mondiale fait l'objet d'échanges internationaux (Dabbaïde, 2017).

Le concept d'aquaponie apparaît de plus en plus comme une ouverture pour le monde agricole dans les pays en développement, soucieux de la préservation et de la gestion de la ressource en eau. L'aquaponie est l'une de ces techniques révolutionnaires ayant le souci de disposer d'une agriculture de qualité produite au plus près des lieux de consommation (Kyaw & Ng, 2017 & dos Santos, 2016). Elle permet de combiner l'aquaculture et l'hydroponie. L'aquaponie constitue un exemple de système dit d'aquaculture intégrée multi trophique et résulte d'une logique de recyclage des rejets. Elle fait partie intégrante de la nécessaire diversité des agricultures de demain, orientées autant que faire se peut vers la durabilité et la complémentarité entre systèmes agricoles (Foucard et al., 2015). Les rejets des poissons sont ainsi valorisés par des cultures végétales à valeur ajoutée (légumes, fruits, fleurs) rendant ainsi une eau épurée adaptée pour l'élevage de poissons.

L'aquaponie est très utile dans les zones de pénurie d'eau, de sols déficients en éléments nutritifs et où l'espace de croissance est limité (Yousef S. Al-Hafedh, Alam, & Beltagi, 2008 ; Eid & Hoballah, 2014). Les applications actuelles des systèmes aquaponiques vont des systèmes de petites tailles aux systèmes commerciaux à grande échelle. Il y a également eu une augmentation de l'utilisation éducative des systèmes aquaponiques petits et grands. Malgré ce potentiel apparent de l'aquaponie et l'intérêt qu'elle suscite dans l'industrie agricole, la mise en application de ce système de production dans les pays du sud se heurte à un défi majeur. Il s'agit de la fiabilité du réseau électrique indispensable pour le fonctionnement des différents composants du système (Hughey, 2005 ; Okemwa, 2015). De plus, le coût d'installation trop élevé des systèmes aquaponiques classiques n'est pas compatible avec le train de vie de la majorité de la population des pays en voie de développement (Michael, S, & Goic, 2015 ; Bosma et al., 2017). Face à ces défis, il est important de valoriser les ressources disponibles localement pour la construction de modules aquaponiques et d'explorer d'autres alternatives pour le fonctionnement des systèmes. Le présent travail vise à concevoir et évaluer les performances d'un module low-tech aquaponique de production domestique.

1. REVUE DE LITTERATURE

1.1 L'aquaponie : généralités

1.1.1 Définition

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毒ique (l'ammoniac) produite par les poissons est convertie par des bactéries de nitrifiante en nitrate moins毒ique et assimilable par les plantes (Tokuyama et al., 2004).

Dans l'aquaponie, les bactéries (*Nitrosomonas* et *Nitrobacter*) transforment l'ammoniaque (NH_3 et NH_4) en nitrite (NO_2) et ensuite en nitrate (NO_3), c'est-à-dire en azote assimilable par les plantes et moins毒ique 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).

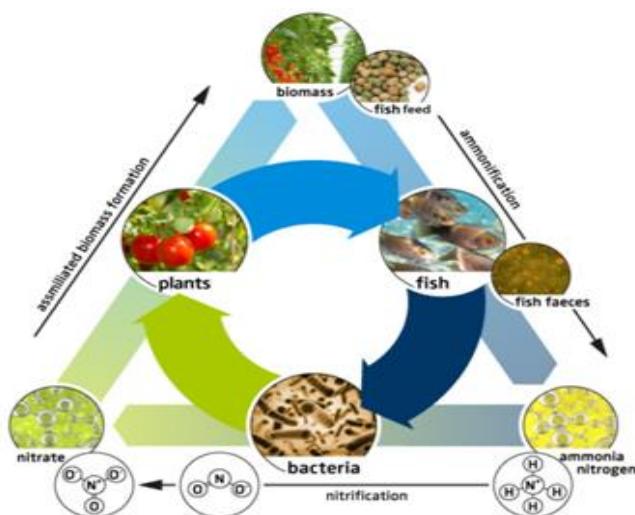


Figure 1 : Cycle de l'azote
(Delaide & Jijaki, 2017)

1.1.2 Historique de l'aquaponie

L'aquaponie est un mot inventé dans les années 1970, dont la paternité demeure floue. En effet, le Dr James Rakocy de l'université des Iles Vierges est le premier à construire un système aquaponique à grande échelle et à compiler des informations scientifiques détaillées dans le cadre de sa thèse universitaire. A la même époque, en 1969, est fondé le New Alchemy Institute dans le Massachusetts (spécialisé dans l'agriculture et l'aquaculture) par John et Nancy Todd et William McLarney (Somerville et al., 2014). Ces derniers sont à l'origine d'un « bioshelter », un abri fonctionnant à l'énergie solaire et destiné à produire de la nourriture pour une famille de quatre personnes pendant un an, entre autres à l'aide de l'aquaponie. Dans les décennies qui suivent, les techniques aquaponiques se développent et se perfectionnent en passant entre les mains de nombreux chercheurs et ingénieurs de toutes nationalités. Pour certains, l'aquaponie se pratique comme un simple loisir installé dans leur jardin, mais d'autres préfèrent y voir une pratique agricole rentable apte à être commercialisée.

Si le terme « aquaponie » est inventé au XXe siècle, les techniques dont elle s'inspire sont bien plus anciennes. L'ancêtre de l'aquaponie est souvent reconnu dans les « chinampas » des Aztèques, développés à grande échelle au XIVe siècle après Jésus-Christ sur le lac Texcoco. A l'aide de boues raclées au fond du lac et de branches de saules, les Aztèques ont construit des îlots artificiels cultivables, pour nourrir l'énorme population de Tenochtitlan, l'ancienne ville de Mexico (Foucard et al., 2015; Kissoon et al., 2017). A la même époque, de l'autre côté de l'océan pacifique dans les pays asiatiques, des canards sont élevés dans des cages au-dessus de leurs élevages de poissons, afin que les déchets des uns nourrissent les autres. L'eau enrichie des bassins servait ensuite à irriguer les cultures de riz (Scott, 2002 ; FAO, 2003).

1.1.3 Les systèmes aquaponiques

Les systèmes aquaponiques existent sous des formes très différentes.

➤ *L'aquaponie domestique :*

Selon Somerville et al., (2014), les unités Aquaponiques avec une taille d'aquarium d'environ 1000 litres et une surface de culture d'environ 3 m² sont considérées comme de petite taille et conviennent à la production domestique d'un ménage familial. Elle se fait à l'échelle du particulier, comme une activité de loisir : par exemple un simple bassin d'élevage associé à un lit de culture végétale sur graviers (Kissoon et al., 2017). Cette version de l'aquaponie se

développe chez les particuliers, dans les villes, sur les toits d'immeubles, dans les jardins publics et les écoles, notamment par le biais de fédérations la promouvant.

➤ *L'aquaponie commerciale à petite échelle :*

Dans ce type de système, le producteur associe sa production à d'autres activités annexes telles que la proposition de formations, de visites de sites, l'écotourisme etc. on peut trouver ces structures en milieu urbain, sur des toits d'immeubles et terrains de collectivités territoriales en agglomération, jardins, parcs, écoles.

➤ *L'aquaponie industrielle :*

Systèmes très sophistiqués incorporant plusieurs bassins de cultures, des systèmes de filtration (mécanique et biologique), d'aération et d'alarmes, installés en milieu urbain ou péri urbain sur des friches industrielles, ou sur des sites déjà identifiés pour l'aquaculture et sur lesquels il est possible de coupler des cultures végétales, ou encore sur des sites de production maraîchère sur lesquels il est possible d'installer des circuits aquacoles en recirculation. Il y a plusieurs fermes prospères dans le monde. Un groupe d'experts à Hawaii (États-Unis d'Amérique) a créé un système commercial à part entière. Ils ont également pu obtenir la certification biologique de leur unité, ce qui leur permet d'obtenir un rendement financier plus élevé pour leur production. Une autre opération aquaponique à grande échelle et commercialement réussie est située à Newburgh, New York (États-Unis d'Amérique) et les marchés de producteurs (Somerville et al., 2014). En Europe, il existe également de grandes fermes aquaponique comme par exemple Aqua 4C, BIGH Farm.

1.1.4 Etat des lieux de l'aquaponie en Afrique et au Bénin

Un bref regard sur les pays Africains montre que l'aquaponie gagne autant d'intérêt en Afrique que dans le reste du monde. Les différentes unités d'amateurs ou de professionnels, présentées via quelques articles et supports multimédia semblent très prometteuses, compte-tenu de l'ampleur et de la santé présentées des cultures végétales (“Kikaboni Commercial Aquaponics Farm - Kenya - Developonics,” 2018). Peu de données scientifiques sont publiées sur le sujet de l'aquaponie en Afrique, cependant nous notons ces dernières années des efforts dans ce sens. Par exemple en Afrique du Sud, des études conduites par Love et al., 2014 et Mchunu, Lagerwall, & Senzanje, 2018 ont révélé que des répondants à une enquête (un total de 44 opérateurs aquaponiques interviewés), maintenaient des systèmes aquaponiques dans divers endroits et certains avaient plus d'un système aquaponique par site ou un système aquaponique réparti sur plusieurs endroits du site. 47% des systèmes aquaponiques étaient installés à

l'extérieur, 46% dans des serres ou des tunnels hauts, 28% à l'intérieur de bâtiments et 3% sur des toits. 60% des répondants ont gardé leurs systèmes aquaponique sur leurs propres propriétés. La plupart des répondants (39%) pratiquaient l'aquaponie comme un loisir, suivis de ceux qui pratiquent l'aquaponie comme activités de subsistance (36%) et commerciales (25%). La somme des volumes de systèmes aquaponiques de tous les répondants était d'environ 13250 m³ d'eau, répartis dans des installations d'une superficie totale de 11 hectares. Les volumes pour les systèmes aquaponiques individuels allaient de 11.35 Litres à plus de 2000 m³ d'eau.

Au Bénin, Le sous-secteur de la pêche et de l'aquaculture contribue pour 11% au PIB agricole et 3% au PIB national. Il occupe 15% de la population active totale et 25% de la population active du secteur agricole. Il représente environ 600 000 emplois (Direction de la Pêche, 2013). Au Bénin, les produits de la pêche représentent 53 % de l'apport en protéines animales pour la population. La production halieutique nationale est très peu diversifiée et satisfait seulement à 35% la demande nationale en poisson. La quantité totale de poisson disponible sur le plan national par an est de 214 000 tonnes de poissons. La production locale ne dépasse pas les 50 000 tonnes et le reste des besoins, environ 164 000 tonnes, est assuré par l'importation (MAEP, 2017).

Les données sur le recensement des pisciculteurs réalisé par Kpenavoun, 2018 révèlent que le Bénin compte environ 1166 exploitations piscicoles au seins desquelles 2204 pisciculteurs (dont 12% sont des femmes) étaient en activité en 2015. Cette étude a révélé que 48% des exploitations recensées sont situées dans les départements de l'Ouémé/Plateau suivie en 2^{ème} position par les départements de l'Atlantique/Littoral avec 23% des exploitations piscicoles. On rencontre différents types d'exploitation piscicole :

➤ *Les étangs :*

82% des pisciculteurs recensés possèdent des étangs variant entre 1 et 6 en moyenne par département avec superficie totale moyenne des étangs par exploitation agricole est de 1040 m². Le nombre plus élevé d'étangs par pisciculteur s'observe dans les départements du Mono, du Plateau, de l'Ouémé et de l'Atlantique.

➤ *Les bassins :*

22% des pisciculteurs recensés possèdent des bassins piscicoles mais seulement 12% exploitent exclusivement leur bassin pour la pisciculture. La superficie totale moyenne des bassins piscicoles par exploitation agricole est de 245 m². Le nombre moyen de bassins piscicoles est de 3,6 par pisciculteur.

➤ *Les bacs à poissons :*

5,7% des pisciculteurs recensés utilisent de bacs d'élevage avec un nombre de 4,7 bacs par pisciculteur. 1,7% des pisciculteurs recensés l'utilisent exclusivement pour la pisciculture Le volume moyen des bacs est de 115 m3.

➤ *Les Enclos piscicoles et les cages flottantes :*

0,7% des pisciculteurs recensés, utilisent des enclos piscicoles. 3,3% des pisciculteurs recensés, utilisent des cages flottantes

De plus, la recherche scientifique en aquaculture au bénin a décuplé par le biais du laboratoire d'hydrobiologie et d'aquaculture de l'université d'Abomey-Calavi, notamment avec le lancement du projet d'« Optimisation de la filière de production de tilapia au Bénin par amélioration génétique et stratégie alimentaire innovante, Projet OpTil-Bénin». Plusieurs autres expérimentations pour l'optimisation de la production de tilapia et de clarias sont encours à travers l'amélioration de leur performance de reproduction, de sexage (Bah & Laleye, 2019) ces deux espèces sont les principales espèces de poissons rencontrés en élevage (Pierre & El Ayoubi, 2015)., D'autres espèces comme *Labeo senegalensis* (Montchowui, Lalèyè, Poncin, & Philippart, 2010), *Heterobranchus longifilis* (Imorou Toko, Fiogbé, & Kestemont, 2008), les crevettes d'eau douce *Macrobrachium vollenhovenii* (Gangbe et al., 2016), font l'objet d'expérimentation.

Parallèlement, la production hors sol gagne de l'intérêt à travers la multiplication des formations qui se font sur le terrain. La tomate est la culture la plus promue par ces formations. La culture de la tomate hors sol se fait souvent sur substrat de fibre de coco dans des sachets plastiques en pleins champs ou sous abri. Des recherches sont également menées pour augmenter la productivité de la tomate sous abris. Les recherches de Mensah et al 2016 sur l'intensification de la culture de tomate sous abri couvert de filet anti-insectes en région chaude et humide du Sud-Bénin indiquent que l'intensification de la production agricole sous abri AgroNet augmente certes la température (de 4 à 6°C) et l'humidité relative (entre 70 % et 80 %) mais n'impacte pas négativement la croissance et le développement des plants de tomate a permis de produire des tomates saines, sans risque de résidus de pesticide. Dans le cas de la tomate, les rendements en plein champ sont de 30 tonnes à l'hectare. Par contre en culture hors sol, ses rendements sont de l'ordre de 90 à 120 tonnes à l'hectare pour un cycle de trois mois (Coco sol, 2014)



Photo 1: Production hors sol de la tomate au Bénin

(Ahossin, 2016.)

Les systèmes modernes de production aquaponique comme nous le connaissons aujourd’hui sont quasi inexistantes au Bénin. Cependant, quelques systèmes intégrés de production sortent du lot et retiennent l’intérêt des populations locales et régionales. C’est le cas du Centre Songhaï qui a mis sur place un système intégré multi trophique de production basé sur les principes de synergie, (interaction entre trois pôles : agriculture - élevage – pisciculture). Ce centre a adopté un certain nombre de pratiques parmi lesquelles on peut noter entre autres :

- la production des asticots à grande échelle et leur utilisation dans l’alimentation animale (poissons, cailleteaux, dindonneaux...)(Lisan, 2018)
- la multiplication des poissons-chats par la reproduction artificielle en pratiquant une insémination artificielle, la production des semences performantes,
- l’utilisation des techniques d’irrigation goutte à goutte et par aspersion, l’utilisation des eaux de poissons pour l’arrosage des cultures.
- la valorisation de l’énergie solaire pour l’éclairage, l’irrigation, la réfrigération.

Ce système intégré de production permet de recycler et revaloriser les sous-produits/déchets des unités de production et de la ferme en général. Ce modèle apporte de nombreux avantages techniques (amélioration des pratiques culturales), écologiques (bonne gestion des ressources disponibles), économiques (réduction des coûts de production) et sociaux (Lisan, 2018).

1.2 Présentation des systèmes aquaponiques low-tech

L'efficacité d'un système aquaponiques repose sur sa capacité à éliminer les formes toxiques d'azote et une partie des éléments nutritifs provenant du bac à poisson. Pour cela, un bon dimensionnement est la clé pour équilibrer la production d'éléments nutritifs provenant de la pisciculture et leur absorption par les plantes (Foucard et al, 2015). Les systèmes aquaponiques se présentent sous diverses configurations. Tous les systèmes disposent d'un lit de culture, d'un bac à poisson et d'un biofiltre. A ces composantes sont reliés les filtres (mécaniques et biologiques), l'oxygénateur d'eau, la pompe pour la recirculation de l'eau, les siphons pour les marées (Harlaut, 2016). Tous les systèmes utilisent l'énergie pour faire circuler l'eau à travers les tuyaux et la plomberie, et pour son aération (Somerville et al, 2014).

1.2.1 *Les bacs à poissons*

L'élevage des poissons occupe une place indispensable dans les systèmes de production aquaponique. Il est donc nécessaire de créer de bonnes conditions pour un développement harmonieux des poissons. Par conséquent, le bac à poissons doit être choisi judicieusement. Plusieurs aspects importants doivent être pris en compte, notamment la forme, le type de matériau et la couleur.

La forme du réservoir affecte considérablement la circulation de l'eau. Ainsi les réservoirs qui favorisent une bonne circulation sont de forme ronde à fond plat. Elles permettent à l'eau de circuler de manière uniforme et transportent les 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 tient compte de sa durabilité, de sa facilité à être manipulé et de sa résistance au UV. D'après Somerville et al., 2014 les réservoirs en polyéthylène basse densité (PEBD) sont souvent préférables en raison de leur grande résistance et caractéristiques de qualité alimentaire (Courard, 2005 ; Gélinas & Olivier, 2013). Les réservoirs tels que les baignoires, les barils ou les cuve IBC sont également adaptés. Il est très important de s'assurer que le conteneur n'a pas été utilisé auparavant pour stocker des matières toxiques. Les réservoirs de couleur claire notamment le blanc sont hautement indiqués car ils réfléchissent la lumière et permettent de garder l'eau froide. Ils offrent aussi une meilleure observation des poissons et de leur comportement, et permet également d'évaluer facilement la quantité de déchets déposés au fond de la cuve (DeLong, Losordo, & Rakocy, 2009 ; (Somerville et al., 2014)



Bac à poisson en IBC
(Brooke, 2018)



Bac à poisson avec baril
(Hughey, 2005)



Bac à poisson en bois
(Afoup Sarl, 2018)

Photo 2 : Différentes formes de bacs à poissons

1.2.2 *Les Filtres mécaniques*

Le filtre mécanique permet de séparer et d'éliminer les déchets solides en suspension afin de maintenir une bonne qualité de l'eau et un bon fonctionnement du système (Somerville et al., 2014 ; Thorarinsdottir et al., 2015). Les déchets non filtrés provoquent l'obturation des racines, des conduits d'eau et du substrat du système. L'accumulation de ces déchets solides dans le système augmente la demande en oxygène du système pour se décomposer et crée des zones anoxiques. Sous l'action des bactéries anaérobies ils se décomposent et libèrent des gaz nocifs comme le sulfure d'hydrogène à l'intérieur des réservoirs de poissons. Thorarinsdottir et al., 2015 estiment que l'élimination inefficace des déchets solides conduit à plus de 85% la défaillance 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 situé entre le réservoir de poissons et le lit de culture. Cet écran capte les déchets solides et doit être rincé souvent. Il existe de nombreux types de filtres mécaniques, notamment les bassins de décantation, les clarificateurs à flux radial, les filtres à sable ou à billes, filtre à tambour et les filtres à chicanes; chacun d'entre eux peut être utilisé en fonction de la quantité de déchets solides à éliminer (Somerville et al., 2014). Pour les unités NFT et DWC, la filtration mécanique est fortement recommandée 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.

➤ *Le filtre à tambour*

C'est un dispositif qui dispose d'un tambour rotatif sur lequel est déversée l'eau à filtrer. Ce tambour est constitué à sa périphérie d'une toile en inox de 63 microns. Les impuretés plus grosses que les mailles sont piégées dans le tambour et sont évacuées lors du rinçage automatique. Le tambour tourne alors à 15 tour/min et entraîne les impuretés vers le canal de sortie des boues. L'eau finement filtrée est ensuite dirigée vers la filtration biologique via deux refoulements.

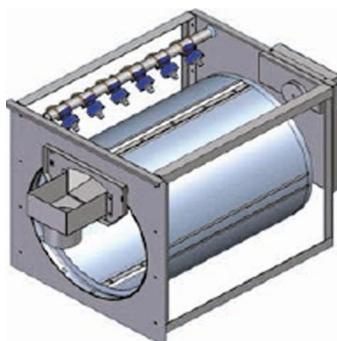


Photo 3 Filtre à tambour

(Poisson d'or, 2019)

➤ *Le filtre à sable*

Un filtre à sable est un type de filtre mécanique fréquemment constitué de sable disposé en couches de granulométrie croissante de haut en bas. Souvent utilisé pour le traitement d'eau et l'obtention d'un fort degré de purification, non seulement par l'élimination des matières en suspension mais également par la dégradation de la matière organique dissoute (Aquaportail)



Photo 4 Filtre à sable

<http://www.lightweight-uphill.eu/sable-filtration-piscine-2687/>

➤ *Filtre à tourbillon*

Encore appelé clarificateur, c'est un récipient disposé de manière à accélérer et à ralentir l'eau afin que les particules se concentrent sur le fond et puissent être éliminées. Dans un clarificateur

à tourbillon, l'eau du réservoir de poisson pénètre par un tuyau près de la plaque inférieure du clarificateur. Ce tuyau est positionné tangentiellement au récipient, forçant ainsi l'eau à tourner dans un mouvement circulaire à l'intérieur du récipient. La force centripète créée par le mouvement circulaire de l'eau draine les déchets solides contenus dans l'eau vers le centre et le bas du conteneur, car l'eau au centre du tourbillon est plus lente que celle à l'extérieur. Il est conseillé 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 (Somerville et al., 2014). Il est important de proportionner la taille du filtre en fonction du volume d'eau y arrivant. Pour un filtrage efficace, il faut environ un temps de passage de l'eau de 40 second à 2 minute. La taille du filtre correspondant à la durée de passage est alors déterminée par formule suivante: Temps que l'eau passe dans le filtre en secondes = $3600 \times \text{Volume en litres} / \text{Débit en litres par heure à l'entrée du filtre}$.



Photo 5 Filtre à tourbillon

(Harlaut, 2016)

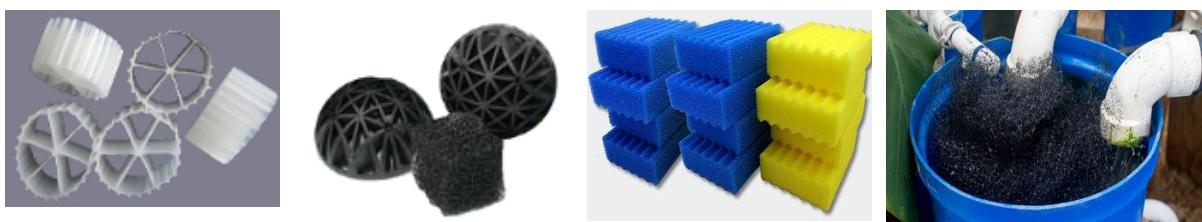
1.2.3 *Les Filtres biologiques*

Les biofiltres jouent un rôle indispensable dans les systèmes aquaponiques. Sous l'action des bactéries, l'ammoniac, un métabolite toxique rejeté par les poissons dans l'eau est converti en nitrate plus assimilable pour les poissons et les plantes. Le biofiltre est un composant installé pour héberger ces bactéries. En outre, le mouvement dynamique de l'eau dans un biofiltre décomposera des solides très fins non capturés par le clarificateur, ce qui empêchera davantage l'accumulation de déchets. Le biofiltre est généralement, un réservoir ou un baril contenant un support poreux fortement aéré (Nelson, 2008). Il est installé entre le filtre mécanique et les conteneurs hydroponiques. Le volume minimum du dispositif de biofiltre doit être égal à un

sixième de celui du réservoir de poissons. Mais il faut noter que ce volume est influencé par le type de substrat utilisé.

Une biofiltration séparée est inutile dans la technique du lit de culture, car les lits de culture sont eux-mêmes des biofiltres parfaits. Tout biofiltre doit avoir un rapport surface / volume élevé, être inerte et facile à rincer. Les matériaux qui peuvent être utilisés comme biofiltre sont 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.

Les bactéries nitrifiantes ont besoin d'un accès adéquat à l'oxygène pour oxyder l'ammoniac. Le processus d'aération implique que de l'air soit forcé dans l'eau, augmentant les niveaux d'oxygène dissous (Somerville et al., 2014; Wongkiew et al 2017 ; Wright, 2018).



Roues en plastique

Bio-balles

Mousses

Filets

Photo 6 : Différentes formes de biofiltre
(Aquaponie.fr)

★ *Système hub and flow*

Le système de flux et reflux devient de plus en plus fréquent dans les systèmes aquaponiques commerciaux et personnels, car ils offrent de nombreux avantages, notamment une meilleure oxygénation des racines et une circulation constante de l'eau. Dans un système de flux et reflux, le poisson produit des déchets riches en ammoniac. L'eau du réservoir est conduite vers le lit de semis à travers les tuyaux par gravité ou à l'aide d'une pompe. Les bactéries nitrifiantes entament ensuite le processus de conversion de l'ammoniac en nitrites, puis en nitrates. Une fois les lits de culture inondés, les plantes éliminent les nitrates de l'eau, en s'en servant comme nourriture. L'eau circule en continue dans le système. Le résultat final est une eau propre qui peut être renvoyée au poisson. Le cycle entre humide et sec peut être contrôlé par plusieurs méthodes, notamment une pompe sur une minuterie, une vanne d'irrigation à indexation ou la méthode du siphon automatique. Généralement, les unités hydroponiques sont drainées toutes les 20-30 minutes pour incorporer de l'oxygène dans la zone racinaire (Pattillo, 2017a). Le contrôle automatique le plus simple du cycle d'inondation et de drainage se fait à l'aide d'un siphon. Il existe des siphons cloches et des siphons en U.

Ces avantages permettent d'améliorer la croissance des plantes, de garantir que les plantes reçoivent de l'eau du réservoir riche en nutriments, réduire les problèmes associés à la stagnation de l'eau et aider à filtrer les déchets de poisson de l'eau, ce qui maintient les poissons en bonne santé.

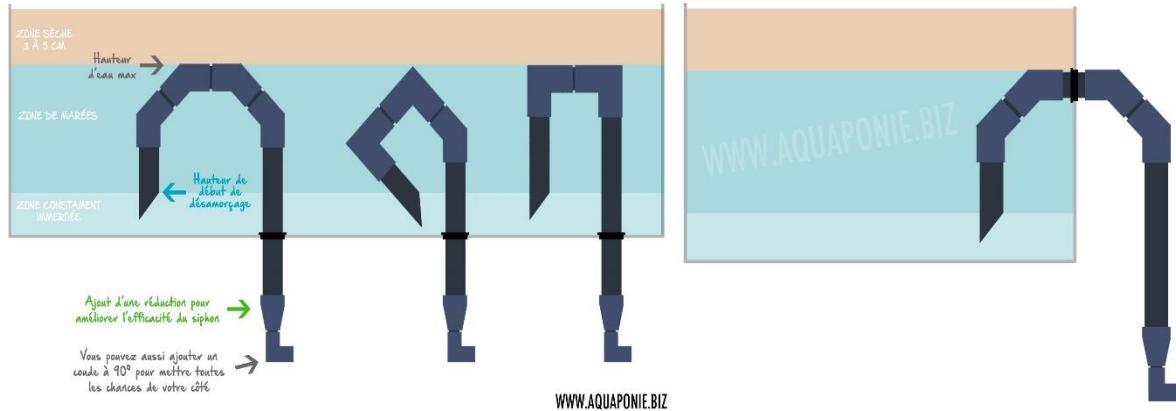


Figure 2 : Schéma du siphon en U
(Harlaut, 2016)

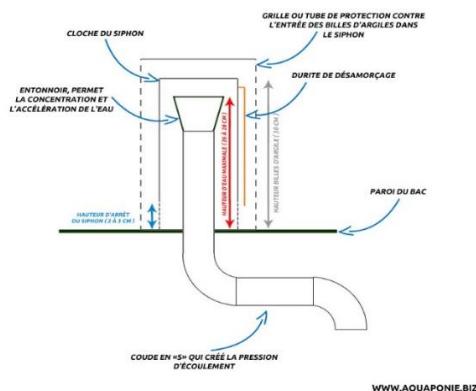


Figure 3 : Schéma du siphon cloche
(Harlaut, 2016)

1.2.4 *Le réservoir de vidange*

Le réservoir de vidange ou puisard est un réservoir collecteur d'eau situé au point le plus bas du système. Il permet surtout de protéger les poissons contre les stress liés aux variations du niveau d'eau dans le bac à poisson. C'est souvent l'emplacement de la pompe submersible. Les bassins de rétention peuvent être plus petits que les aquariums et pouvoir 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 la totalité du volume d'eau dans les lits de culture. Les réservoirs externes sont principalement utilisés dans les unités de lit de médias. Pour les unités DWC, le canal hydroponique peut également être utilisé comme réservoir puisard. Bien qu'utile, il ne s'agit pas

d'un composant essentiel du système et de nombreuses conceptions n'utilisent pas de réservoir externe. Les très petites unités, avec des réservoirs de poissons d'une capacité allant jusqu'à 200 litres, peuvent simplement pomper de l'eau des réservoirs de poissons vers les lits de culture, d'où l'eau retourne dans le réservoir de poissons (Somerville et al., 2014).

1.2.5 Les composantes hydroponiques

Les composantes hydroponiques les plus rencontrés 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 ; Harlaut, 2016)

a. Les systèmes NFT

➤ Description

Le système Nutrient Film Technique (N.F.T.) est un système hydroponique utilisant des tuyaux horizontaux légèrement inclinés (1 à 2%), chacun traversé par un ruisseau peu profond d'eau aquaponique riche en nutriments. Les plantes sont placées dans des trous au sommet des tuyaux et peuvent utiliser cette fine pellicule d'eau riche en nutriments. L'eau nutritive est injectée dans la partie la plus élevée et s'écoule vers la partie basse où elle est récupérée puis réinjectée dans le réservoir des poissons.

Le liquide nutritif circule sur les plateaux sous la forme d'un fin film qui entre en contact avec les racines. L'écoulement peu profond de l'eau n'atteint que le bas de l'épaisse couche de racines qui se développe dans le creux tandis que le sommet de la masse racinaire est exposé à l'air, recevant ainsi un apport suffisant en oxygène. Selon Connolly, 2010, s'il est correctement construit, le NFT peut supporter des densités de plantes très élevées.

La pente, la longueur et le débit du canal doivent tous être calculés pour garantir que les plantes reçoivent suffisamment d'eau, d'oxygène et de nutriments. Dans les systèmes NFT aquaponique, le biofiltre devient crucial car il n'y a pas de grande surface de développement de communautés de bactéries (Nelson, 2008).

Pour la confection des rigoles, le choix des tuyaux doit tenir compte du diamètre optimal pour les types de plantes cultivées. Les tuyaux de section carrée sont préférables, mais les tuyaux ronds sont plus courants et tout à fait acceptables. Des tuyaux de culture de 11 cm de diamètre sont nécessaires pour les légumes fruitiers plus volumineux, tandis que les légumes verts à feuilles à croissance rapide et les petits légumes à petites racines n'ont besoin que de tuyaux de 7,5 cm de diamètre. Pour la polyculture à petite échelle, il faut utiliser des tuyaux de 11 cm de diamètre. Cela permet d'éviter les limitations liées à la taille des bien que la densité de plantation soit sacrifiée. Plantes à racines étendues (Somerville et al., 2014).



Photo 7 : Composants du système NFT
(Somerville et al., 2014)

➤ **Circulation de l'eau.**

L'eau s'écoule par gravité depuis l'aquarium, à travers le filtre mécanique et dans le biofiltre. L'eau est pompée du biofiltre dans chaque tuyau hydroponique avec un petit débit égal, créant ainsi un courant peu profond d'eau aquaponique riche en nutriments qui coule au fond. Une variante du système peut être réalisée en ajoutant un puisard. Dans ce cas, l'eau est pompée du puisard dans les deux sens à travers un raccord et des vannes. Une partie de l'eau est pompée directement dans l'aquarium. L'eau restante est pompée 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 croissance où se trouvent les plantes. À la sortie des tubes de culture, l'eau est renvoyée dans le biofiltre / 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 1–2 litres / min. Le débit est contrôlé de la vanne, avec tout le surplus d'eau renvoyé dans le réservoir à poissons (Somerville et al., 2014 ; Pattillo, 2017).

Un inconvénient réside dans le fait que la combinaison puits / biofiltre permet de diluer la concentration en éléments nutritifs de l'eau atteignant les tubes de culture tout en redonnant de l'eau au poisson avant que celle-ci ne soit complètement débarrassée de ses éléments nutritifs. Cependant, la légère dilution est gérée en contrôlant le flux bidirectionnel quittant le puisard /

biofiltre et, globalement, elle a peu d'effet sur l'efficacité de ce système au vu des avantages procurés. En règle générale, 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 contrôlé à l'aide de la vanne. La longueur du tube de culture peut être comprise entre 1 et 12 m. Dans les tuyaux d'une longueur supérieure à 12 m, des carences en éléments nutritifs peuvent survenir chez les plantes vers l'extrémité des tuyaux, car les premières plantes ont déjà extrait les éléments nutritifs.

b. Les systèmes de culture en eau profond (DWC) ou raft

➤ **Description**

Ce système de culture encore appelé culture sur radeau, utilise une plateforme flottante ou suspendue avec des trous pour soutenir les plantes et permettre aux racines d'être submergées dans l'eau. Les isolants en polystyrène sont généralement utilisés comme radier et des pots en plastique pour soutenir les plantes. Les radeaux offrent de nombreux avantages, notamment la facilité d'utilisation, la mobilité, un nettoyage simple et un risque moins élevé de mortalité des plantes lors de pannes de courant. Les plantes d'une unité de culture en eau profonde peuvent survivre jusqu'à deux semaines sans écoulement d'eau ou aération, par rapport aux heures ou aux jours d'autres systèmes. La culture sur radeau est la technique la plus utilisée dans le commerce en raison de sa simplicité et de sa fiabilité (Pattillo, 2017a).



Photo 8: Culture en eau profond
(Somerville et al., 2014)

➤ **Circulation de l'eau.**

La dynamique de l'écoulement de l'eau dans le DWC est presque identique à celle d'un NFT. Le débit de l'eau entrant dans chaque canal est relativement faible. En règle générale, chaque canal a 1 à 4 heures de temps de rétention. Le temps de rétention est un concept similaire au taux de rotation et se réfère au temps nécessaire pour remplacer toute l'eau contenue dans un récipient. Par exemple, si le volume d'eau d'un canal est de 600 litres et le débit d'eau entrant

dans le récipient est de 300 litres / h, le temps de rétention serait de 2 heures (600 litres - 300 litres / h) (Somerville et al., 2014).

D'après Mullins, Nerrie, & Sink, 2010, pour assurer une bonne aération des racines, des pierres à air doivent être placées dans le lit du flotteur - une par 10 pieds carrés. Étant donné que des microbes nitrifiants colonisent les radeaux, ceux-ci devraient être lavés à l'eau pour éliminer les algues et les débris, mais ne devraient pas être autorisés à sécher et à tuer ces microbes. La hauteur des lits doit permettre un accès facile de tous les côtés.

c. Les systèmes de lits de culture (Media Bed)

➤ Description

Le système de lit de culture est la technique la plus répandue et la plus indiquée pour les pays en développement. Ces modèles sont efficaces en termes d'espace, ont un coût initial relativement faible pour les petites unités et conviennent aux débutants en raison de leur simplicité. Le principal avantage des lits de culture est qu'ils servent à soutenir les racines des plantes et au même moment servent également de filtre, à la fois mécanique et biologique. Un autre avantage considérable est la possibilité de recycler des matériaux pour sa construction. Cette double fonction est la principale raison pour laquelle les unités de lit multimédia sont les plus simples. Cependant, à grande échelle, le coût est relativement élevé avec un poids conséquent du média. Une autre conséquence est l'obturation du media liée aux déchets solides provenant des bacs de poissons. On note également une augmentation de l'évapotranspiration liés à une forte exposition du média au soleil (Somerville et al., 2014 ; Love, Uhl, & Genello, 2015). Ce phénomène peut être réduit en maintenant sèche la surface du substrat exposée au soleil.

Les lits de culture peuvent être en plastique, en fibre de verre ou en bois avec des feuilles de caoutchouc ou de polyéthylène imperméables à la base et à l'intérieur des murs. Les lits de culture les plus populaires sont fabriqués à partir de récipients en plastique. Les petits légumes verts à feuilles ne nécessitent que 15 à 20 cm de profondeur, ce qui en fait un bon choix si la taille du lit de support est limitée. Même dans ce cas, certaines expériences ont montré que même les plus grandes cultures peuvent être cultivées dans des lits peu profonds si les concentrations de nutriments sont suffisantes.



Photo 9: Système de lit de culture

(Hounsa, 2019)

➤ Circulation de l'eau.

Par rapport à la dynamique de l'eau, certains lits de culture 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. Cela ajoute de l'oxygène aux racines des plantes et contribue à la biofiltration de l'ammoniac. D'autres méthodes d'irrigation du lit de culture utilisent un flux d'eau constant, entrant soit d'un côté du lit et sortant de l'autre, soit distribuées à travers un réseau d'irrigation goutte à goutte.

Selon le substrat utilisé, il occupera environ 30 à 60% du volume total du lit de support. Ce pourcentage aidera à décider de la taille du réservoir de puisard pour chaque unité, car le réservoir de puisard devra au moins contenir le volume total d'eau contenu dans tous les lits de média. Les citernes de puisard doivent être légèrement surdimensionnées pour garantir qu'il y ait 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

d. Choix du substrat de culture

Le choix du milieu de culture se base sur la perméabilité à l'eau, la porosité permettant ainsi aux bactéries de se développer, à l'eau de couler et aux racines des plantes de respirer. Le milieu doit être inerte, non poussiéreux et non toxique, et son pH doit être neutre pour ne pas nuire à la qualité de l'eau. Le choix doit prendre également en compte la disponibilité, le poids, le coût et la facilité du substrat à être travailler (Somerville et al., 2014).

e. *Les différents types de substrat*

- ✓ Gravier volcanique



Photo 10: Substrat de gravier volcanique
(Harlaut, 2016)

Le gravier volcanique est le support le plus populaire pour les unités de lit de médias et est recommandé lorsque disponible. Les trois meilleures qualités du gravier volcanique sont qu'il présente un très bon rapport surface / volume, qu'il peut être peu coûteux et facile à obtenir et qu'il est presque chimiquement inerte. La taille recommandée du gravier volcanique est de 8–20 mm de diamètre.

Le plus petit gravier est susceptible de se boucher avec les déchets solides et le gravier plus gros n'offre pas un bon développement des racines. Le gravier volcanique a une surface au volume qui dépend de la taille des particules, ce qui laisse suffisamment d'espace pour que les bactéries puissent se coloniser (Harlaut, 2016; Somerville et al., 2014).

- ✓ Le gravier de construction



Photo 11: Gravier de construction
(Hounsa, 2019)

Le gravier de construction est également l'un des supports les plus populaires par sa disponibilité. Peu coûteux et facile à obtenir, il présente un très bon rapport surface / volume. Sa nature (quartz) lui confère une inertie chimique idéale pour un bon substrat. La taille recommandée du gravier de construction est de 8–20 mm de diamètre.

L'inconvénient de son utilisation réside dans son poids qui ne facilite pas sa manipulation pour un grand volume.

✓ Les billes d'argiles

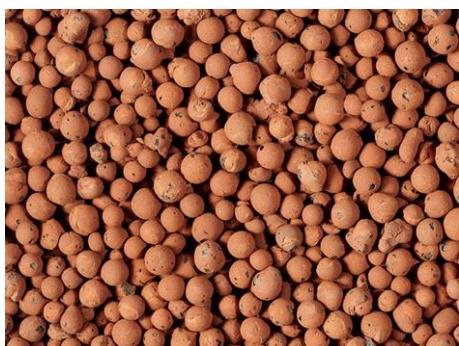


Photo 12 : Billes d'argiles

(Somerville et al., 2014)

Ils sont très confortables et conviennent parfaitement à la production sur les toits. La surface des billes est d'environ 250–300 m² / m³, qui est dans la fourchette cible. Cependant, elles sont relativement coûteuses et peu disponibles dans certaines régions du monde. Les billes sont de tailles variées. Pour l'aquaponie, les plus grandes tailles avec des diamètres de 8 à 20 mm sont recommandé.

f. Les zones des lits de culture

Les lits de culture sont composés de trois zones distinctes pouvant être considérées comme des micro-écosystèmes, qui se différencient par leur teneur en eau et en oxygène. Chaque zone abrite un groupe diversifié de bactéries, champignons, micro-organismes. La zone sèche constituée des 2-5 cm supérieur du lit sert de barrière lumineuse empêchant la lumière de frapper directement l'eau et les organismes nuisibles de détruire les plantes. La deuxième zone (zone sèche/humide) d'une profondeur de 10-20 cm est la zone principale où la majeure partie de l'activité biologique se produit. La dernière zone constituée des 3–5 cm inférieurs du lit, reste humide en permanence. Dans cette zone, les déchets solides à petites particules s'accumulent et les organismes les plus actifs dans la minéralisation se trouvent ici. Ceux-ci incluent des bactéries hétérotrophes et d'autres micro-organismes (Harlaut, 2016; Somerville et al., 2014). Dans les lits de culture, les vers de terre peuvent être introduits pour réduire l'accumulation des déchets solides. Ils améliorent la disponibilité des nutriments pour les plantes et l'aération du substrat pour les plantes. (Connolly, 2010; Pattillo, 2017b; Timmons & Ebeling, 2010)

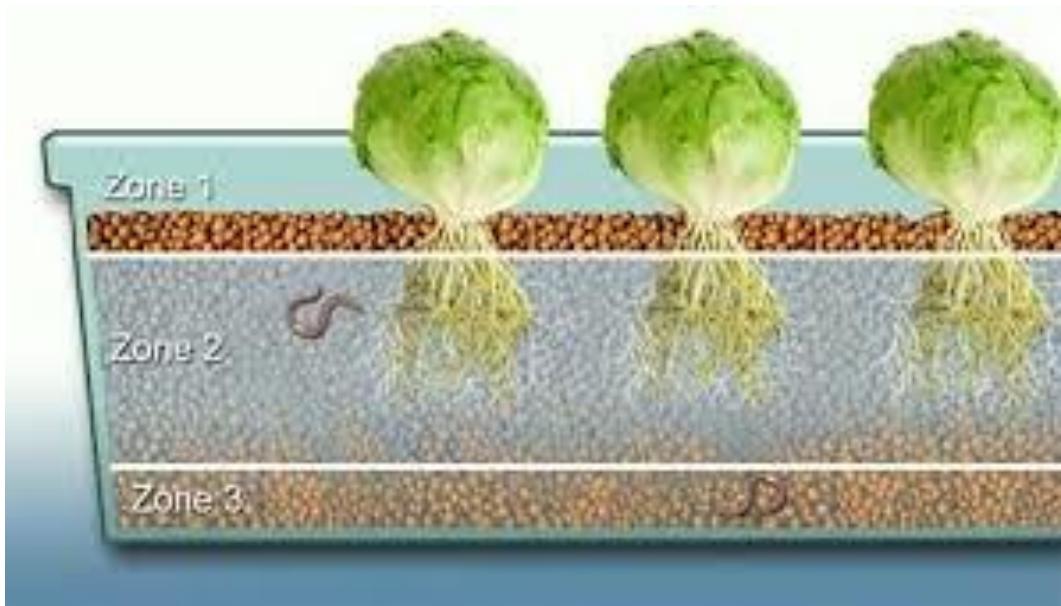


Figure 4 : Différentes zones des lits de culture

(Harlaut, 2016)

1.2.6 *Le Mouvement de l'eau*

a. *Recirculation de l'eau*

Le fonctionnement des systèmes aquaponiques est fondé sur la recirculation de l'eau pour maintenir tous les organismes vivants dans le système aquaponique. L'eau qui s'écoule des réservoirs de poissons, à travers le séparateur mécanique et le biofiltre, pour aboutir aux plantes dans leurs lits de culture, leurs tuyaux ou leurs canaux, éliminant ainsi les nutriments dissous. Si le mouvement de l'eau cesse, l'effet le plus immédiat sera une réduction de l'Oxygène Dissout et une accumulation de déchets dans l'aquarium; sans filtre mécanique ni biofiltre, les poissons peuvent souffrir et mourir en quelques heures. Sans écoulement d'eau, l'eau dans les lits de médias ou les unités DWC stagnera et deviendra anoxique, et les systèmes NFT se dessècheront. Pour assurer une bonne qualité de l'eau et apporter suffisamment d'oxygène, il est recommandé de faire circuler l'eau au moins deux fois par heure (Somerville et al., 2014). Les essais de Ngo Thuy Diem, Konnerup, & Brix, 2017 sur le taux de recirculation d'unité aquaponique sous abri ombragé au Organic Garden de l'Université internationale de Floride à Miami, ont montré que la croissance et la survie des poissons étaient excellentes avec un taux de 400% à une faible densité de poissons de 122 poissons / m³ et une température moyenne de l'eau de 25.5°C. Le mouvement de l'eau implique un dispositif pour déplacer l'eau, le système de tuyauterie et la gravité. La gravité est utilisée pour réduire le coût du mouvement de l'eau dans tout le système. Dans la mesure du possible, le producteur devrait utiliser des tuyaux surdimensionnés pour éviter tout encrassement éventuel (Mullins et al., 2010).

b. Le choix de la pompe

Le choix des pompes tient compte de son efficacité énergétique, de la quantité d'eau à faire circuler. Une pompe efficace peut déplacer 40 litres d'eau par heure pour chaque watt par heure consommée. D'après Shafahi & Woolston, 2014, la puissance totale de la pompe est fonction du débit massique, de la hauteur et de l'efficacité. Le débit est variable mais doit être maintenu entre 7.57 litres par minute et 18.92 litres par minute pour que les plantes puissent absorber les nutriments. Lors de la conception de la tuyauterie de la pompe, il est important d'utiliser un minimum de connexion car cela peut réduire jusqu'à 5% du débit total à chaque raccord de tuyau lorsque l'eau est forcée de passer. Il est également important de noter que plus le diamètre des tuyaux est petit, plus la perte de débit d'eau est importante. Un tuyau de 30 mm a le double du débit d'un tuyau de 20 mm, même s'il est alimenté par des pompes de même capacité. De plus, un tuyau plus gros ne nécessite aucun entretien pour éliminer l'accumulation de solides accumulés à l'intérieur. Concrètement, cela se traduit par d'importantes économies d'électricité et de coûts d'exploitation. Lors de l'installation d'une unité aquaponique, il est également important de placer la pompe submersible dans un endroit accessible, car un nettoyage périodique est nécessaire. En effet, le filtre interne devra être nettoyé toutes les 2 à 3 semaines. Les pompes à eau submersibles se briseront si elles fonctionnent sans eau; donc ne jamais faire fonctionner une pompe à sec.

1.2.7 L'aération des unités aquaponiques

a. Rôle de l'aération

L'aération des systèmes aquaponiques a pour but d'élever la teneur en oxygène dissout afin de favoriser la vie de tous les organismes en relation dans le système. A travers des conduites d'air et des pierres à air qui se trouvent à l'intérieur des réservoirs d'eau, les pompes à air injectent de l'air dans l'eau, augmentant ainsi les niveaux d'oxygène dissous dans l'eau. Il est recommandé d'utiliser des pierres à air de qualité afin d'obtenir les plus petites bulles d'air. Les petites bulles ont plus de surface et libèrent donc mieux l'oxygène dans l'eau que les grosses bulles; cela rend le système d'aération plus efficace et contribue à réduire les coûts. L'efficacité de l'absorption d'oxygène est calculée comme le rapport entre l'oxygène absorbé dans un appareil donné et la quantité d'oxygène ajoutée, et exprimé en pourcentage (Timmons & Ebeling, 2010).

b. Dimensionnement des pompes

James Rakoczy dans son guide pour l'aquaponie affirme que les niveaux d'oxygène dissout supérieurs ou égaux à 5 mg par litre doivent être maintenus dans l'aquarium et dans l'eau entourant les racines des plantes pour une bonne santé du système. Pour les unités de petites

taille, avec des aquariums d'environ 1 000 litres, il est recommandé d'installer au moins deux conduites d'air, également appelées injecteurs, avec des bulles d'air, et un injecteur dans le conteneur du biofiltre (Somerville et al., 2014).

Nwestwood, 2010 a publié une méthode de dimensionnement consistant à se baser sur la consommation d'oxygène (O_2) par les poissons et les bactéries. Ainsi 0,025 kg de O_2 est nécessaire par kg d'aliments fourni aux poissons. 0,012 kg de O_2 est nécessaire par kg de nourriture pour les bactéries nitrifiantes. 0,13 kg de O_2 est nécessaire par kg d'aliments pour les bactéries hétérotrophes (peut aller jusqu'à 0,5) ; ce qui fait un total de 0,5 kg par kg d'aliments nourri. Selon Timmons & Ebeling, 2010 dans le livre « Recirculating aquaculture » affirment que l'ammoniac est lié au taux d'alimentation du poisson. En principe, si on ne nourrit pas le système, la consommation d'oxygène est également réduite d'environ 50% et les taux de production de matières fécales sont réduits de 10 fois en un jour environ, une fois que l'activité d'alimentation a permis à la production de devenir nulle. L'auteur de Recirculating Aquaculture déclare: Dans un système d'aquaculture à recirculation pure (RAS), le rapport de 1,0 kg d'oxygène pour 1,0 kg d'aliments est la valeur de conception recommandée sans danger. La température, la pression barométrique, la salinité et l'altitude ont toutes une incidence directe sur les concentrations en oxygène dans l'air et dans l'eau (Secondat, 1952 ; M'balaka, Kassam, & Rusuwa, 2012 ; Rebouças, Lima, Cavalcante, & Sá, 2015)

c. Pompes de transport aérien

Les ponts aériens sont un excellent moyen de déplacer l'eau. En utilisant de l'air pour déplacer l'eau, on élimine la pompe à eau et aère l'eau en une seule étape. Cela réduit les coûts initiaux et l'apport d'énergie tout en offrant un bon débit pour la circulation de l'eau lorsque l'installation est faite dans les conditions optimales (Barrut, Blancheton, Champagne, & Grasmick, 2012 ; Oca & Masalo, 2013) . Lorsque vous essayez de faire monter l'eau à un niveau plus élevé, une pompe à eau est plus simple et plus efficace qu'un pont aérien. Les ponts aériens fonctionnent mieux dans les tuyaux de petits diamètres (Pade, 2008). L'augmentation des niveaux d'oxygène résultant de l'utilisation d'air pour déplacer l'eau sera bénéfique pour vos poissons, plantes et bactéries et votre système sera globalement en meilleure santé.

1.3 Les poissons en aquaponie

1.3.1 Choix des espèces en pisciculture

D'après Lacroix, 2004, les espèces de poissons utilisables en piscicultures doivent tenir compte des critères suivants :

- ✓ avoir une chair appréciée des consommateurs ;
- ✓ être rustique et facile à manipuler. Cela permet au tilapia de supporter des conditions de vie artificielles sans être sujet à des maladies épidémiques ; maniable, c'est à dire en particulier, sans épines dangereuses (Sohou, Houedjissin, & Ahoyo, 2009).
- ✓ pouvoir se reproduire facilement en captivité.

La reproduction peut être naturelle en étangs, ou provoquée dans les stations d'alevinage par divers procédés.

- ✓ avoir une croissance rapide :

La rapidité de croissance dépend de l'espèce, de l'alimentation et des conditions d'élevage., des poissons mal nourris ou en trop grand nombre pour le volume d'eau, resteront petits toute leur vie ; ils consommeront donc de la nourriture inutilement, d'où l'intérêt de placer dans certains étangs quelques poissons prédateurs. La famille la plus intéressante est celle des Cichlidae.

- ✓ avec une alimentation économique.

Etre économique à alimenter suppose généralement des poissons à chaîne alimentaire courte, capable d'exploiter le plancton et les aliments végétaux. Les poissons carnivores ne peuvent être employés que lorsqu'on dispose de sous-produits d'origine animale en quantité suffisante, ce qui est rarement le cas en zone tropicale. Les poissons prédateurs sont employés plutôt pour limiter la prolifération des espèces à forte reproduction naturelle ; ils consommeront les poissons trop petits pour être commercialisables.

1.3.2 Les espèces de poissons adaptées en aquaponie au Bénin

a. *Tilapia du Nil (Oreochromis niloticus)*

- ✓ *Description*

Le tilapia, membre de la famille des cichlidés et originaires d'Afrique de l'Est, est l'une des espèces d'eau douce les plus populaires dans les systèmes aquacoles mondiaux. Ils résistent à de nombreux agents pathogènes et parasites et supportent le stress. Le tilapia survie et colonisé des milieux aquatiques largement extrêmement variés. Ils peuvent tolérer un large éventail de conditions de qualité de l'eau et sont plus efficaces par temps chaud. Il est caractérisé par une croissance rapide, une reproduction aisée et rapide ; incubation buccale avec nid en cuvette, mais modérée pour un tilapia. C'est préférentiellement un microphage mais il assimile facilement divers aliments : son de riz, tourteau, déchets d'abattoir. Les alevins ont une tendance micro carnivore et même cannibale. On peut dire qu'il est omnivore en étangs. Il est

disponible localement et a une bonne chair, appréciée. De plus, c'est une espèce rustique, facile à manipuler et son hybridation est possible. Il supporte un large éventail de salinité de l'eau (El-Sayed, 2006). Ils peuvent normalement grandir et se reproduire dans l'eau des poissons (5 à 15 pour mille), ce qui réduit cependant la reproduction et gène la croissance. C'est pour ces raisons que le tilapia est considéré comme un très bon poisson à reproduire dans un système aquaponique.

✓ *Température*

D'après Lazard, 2009, les tilapias sont des poissons thermophiles et connus pour tolérer une large gamme de températures de l'eau. Dans son habitat naturel, cette espèce peut supporter des températures comprises entre 14 et 31 °C mais des conditions extrêmes des températures de 7 à 41 °C pendant plusieurs heures lui sont fatales. Toutefois, l'optimum d'élevage est compris entre 28 et 32 °C pour *Oreochromis niloticus*.

✓ *L'oxygène dissous*

L'oxygène dissous (OD) est l'un des facteurs environnementaux limitants qui affectent l'alimentation, la croissance et le métabolisme des poissons. La fluctuation est affectée par la photosynthèse, la respiration et les fluctuations journalières. Selon Tsadik & Kutty, 1987 et El-Sayed, 2006, ces facteurs doivent être pleinement pris en compte en ce qui concerne l'OD. La plage d'OD ambiante ($OD > 5 \text{ mg/l}$) offre les meilleures performances pour les poissons, tandis que de faibles niveaux d'OD limitent la respiration, la croissance et d'autres activités métaboliques des poissons. Les tilapias sont connus pour résister à de très faibles niveaux d'OD. La plupart des tilapias peuvent tolérer des niveaux d'OD aussi faibles que 0,1 à 0,5 mg / l pendant différentes périodes (Abdel Magid & Babiker, 1975; El-Sayed, 2006)

✓ *pH*

Les tilapias peuvent tolérer une gamme de pH assez large, mais se portent mieux entre 6,5 et 8,5. Des changements substantiels de pH sur de courtes périodes (des changements de 0,3 sur une période de 12 à 24 heures) peuvent être problématiques, voire mortels pour les tilapias. Par conséquent, il est important de maintenir le pH aussi stable que possible (Somerville et al., 2014). Il est recommandé de tamponner avec du carbonate pour éviter les fortes variations de pH. Wangead, Geater, & Tansakul, (1988) ont étudié en Thaïlande, les effets de l'eau acide sur la survie, le comportement et la croissance de deux groupes de poissons de taille différente : des juvéniles du tilapia du Nil (0,4 à 1,0 g) et des adultes (45,4 à 46,3 g). Ils ont constaté que les alevins et les adultes mouraient à un pH de 2-3 en un à trois jours. Les deux groupes de taille ont toléré les pH 4 à 5 avec beaucoup de succès et ont atteint des taux de survie et de croissance

similaires à ceux du groupe témoin (pH 7) après 60 à 70 jours. Cependant, les poissons adultes étaient plus résistants que les juvéniles à un pH faible, avec un taux de survie de 86,6 ; 100 et 100% à pH 4, 5 et 7, respectivement, alors que la survie des alevins était de 57,8 ; 82,2 et 84,5%, respectivement, à la même valeur de pH.

✓ *Ammoniac*

L'Ammoniac est la forme principale des déchets métaboliques excrétés par les branchies et les reins du poisson. L'ammoniac excréte pourrait se trouver sous deux formes différentes; la forme NH₃ non ionisée (UIA-N), qui est toxique pour les poissons et la forme ionisée NH₄ +, qui est beaucoup moins toxique (El-Sayed, 2006). La toxicité de l'ammoniac est étroitement liée au niveau de pH et, dans une certaine mesure, à la température de l'eau et à la concentration en oxygène dissous (Lim et Webster, 2006). De faibles niveaux d'oxygène dissous (OD) augmentent la toxicité de l'ammoniac (Lim et Webster, 2006) et lorsque le pH dépasse la valeur neutre, une partie croissante de l'ammoniac total est convertie de la forme ionique (NH₄ +) en une substance toxique non ionisée (NH₃). La toxicité a tendance à augmenter avec la température élevée (Soderberg, 1997). La mortalité massive du tilapia se produit quelques jours après leur transfert direct dans une eau dont les concentrations d'ammoniac sont supérieures à 2 mg. L-1 (Lim et Webster, 2006). D'autre part, une exposition prolongée (jusqu'à plusieurs semaines) à une concentration d'ammoniac non ionisé supérieure à 1 mg/L entraîne des pertes, en particulier chez les alevins et les juvéniles, lorsque l'oxygène dissous (OD) est faible (Lim et Webster, 2006). Outre les problèmes de mortalité, l'ammoniac non ionisé, même à partir de 0,08 mg. L-1, peut entraîner un manque d'appétit pour le tilapia (Popma et Masser, 1999).

b. Le poisson-chat (*Clarias gariepinus*)

✓ *Description*

Le poisson-chat est un groupe de poissons extrêmement rustique qui tolère de grandes variations de l'oxygène dissous, de la température et du pH. Ils sont également résistants à de nombreuses maladies et parasites, ce qui les rend idéaux pour l'aquaculture. Le poisson-chat peut être facilement stocké à des densités très élevées, allant jusqu'à 150 kg / m³.

✓ *Température*

Comme le tilapia, le poisson-chat croît mieux dans l'eau chaude et présente un taux de croissance élevé entre 25 et 33 ° C avec un optimum de 30 °C. La variation de la taille des

poissons élevés à 22 °C est nettement supérieure à celle élevés à des températures plus élevées (Britz & Hecht, 1987).

✓ *Oxygène dissous*

Compte tenu de la grande tolérance aux faibles niveaux d'OD et d'ammoniac, le poisson-chat peut être stocké à des densités plus élevées, à condition que la filtration mécanique soit adéquate. En ce qui concerne la gestion des déchets, il convient de noter que les déchets solides en suspension produits par le poisson-chat sont moins volumineux et plus dissous que ceux du tilapia, un facteur qui facilite une plus grande minéralisation. Le poisson-chat africain a des structures pulmonaires qui lui permettent de respirer de l'air. Cela a permis de survivre à de très faibles niveaux d'oxygène dans l'étang. Cependant, lorsque le poisson-chat africain est mélangé ou polyculture, le niveau d'oxygène est important pour les espèces mélangées dans l'étang.(Mallya, 2007).

1.3.3 Quantité de poissons

Les aquariums doivent contenir une quantité d'eau adéquate pour la quantité de poissons conservée dans le système. La densité de peuplement appropriée sera différente entre les espèces de poissons. Pour le tilapia, une densité de stockage d'environ 60 kg de poisson par m³ est souvent appliquée (Losordo et al., 1998; Rakocy et al., 2006). La densité de stockage dépend également des objectifs du système. En aquaculture intensive atteignant des niveaux de production très élevés, les densités de tilapia peuvent atteindre 200 kg/m³. Dans les cultures biologiques de Tilapia, une densité maximale de 20 kg / m³ est autorisée (Schuilenburg, 2012). Parfois, un réservoir est utilisé; d'autres systèmes utilisent plusieurs réservoirs. Cela permet l'élevage séquentiel de lots de poissons ou la présence de différents types de poissons dans un système.

1.4 Les plantes en aquaponie

1.4.1 Le choix des légumes en aquaponie

De nombreuses plantes peuvent être cultivées dans des systèmes aquaponiques. Plus de 150 espèces de légumes, d'herbes, de fleurs et de petits arbres différents ont été cultivés avec succès dans des systèmes aquaponiques, y compris des unités de recherche, domestiques et commerciales (Somerville et al., 2014).

Les légumes et les herbes à feuilles vertes sont les plus productifs et les plus faciles à planter en aquaponie. Le climat, la météo et le type de légume sont des facteurs déterminants pour le

choix des plantes. Le choix du type de lit qui sera utilisé et de l'environnement dans lequel il sera installé (climat ouvert, sous abris ou dans une serre), sont tous des facteurs déterminants dans les choix de plantation. Si l'installation est ouverte, la production est sous l'influence de son environnement. Par contre dans une serre, il est possible de créer un climat totalement différent et optimal pour les plantes.

✓ **La laitue (*Lactuca sativa*)**

La laitue est très demandée pour ses feuilles. Elle a une grande valeur dans les zones urbaines et périurbaines, ce qui en fait une culture très appropriée pour une production commerciale à grande échelle. La laitue pousse particulièrement bien dans les systèmes aquaponiques en raison des concentrations optimales de nutriments dans l'eau. De nombreuses variétés peuvent être cultivées en aquaponie (FAO, 2014).

La laitue croît bien sous une température de jour de 17 à 28 ° C. La croissance générative est affectée par la photopériode et la température - une lumière du jour prolongée et des températures chaudes ($> 18^{\circ}\text{C}$) provoquent la nuit un boulonnage. Une température de l'eau $> 26^{\circ}\text{C}$ peut également favoriser le boulonnage et l'amertume des feuilles. La plante a une faible demande en nutriments; Cependant, des concentrations plus élevées en calcium dans l'eau aident à prévenir les brûlures de la pointe des feuilles dans les cultures d'été. Le pH idéal est compris entre 5,8 et 6,2, mais la laitue pousse toujours bien avec un pH pouvant atteindre 7, bien que certaines carences en fer puissent apparaître en raison de la biodisponibilité réduite de ce nutriment au-dessus de la neutralité.

Selon FAO, 2014, les conditions optimales pour la croissance de la laitue en aquaponie sont :

- ✓ pH: 6.0–7.0
- ✓ Espacement des plantes: 18–30 cm (20–25 têtes / m²)
- ✓ Temps et température de germination: 3–7 jours; 13–21 ° C
- ✓ Temps de croissance: 24–32 jours (plus long pour certaines variétés)
- ✓ Température: 15–22 ° C (floraison supérieure à 24 ° C)
- ✓ Exposition à la lumière: plein soleil (faible ombrage par temps chaud)
- ✓ Hauteur et largeur de la plante: 20–30 cm; 25–35 cm
- ✓ Méthode aquaponique recommandée: lit de média, NFT et DWC

✓ **L'amarante**

L'amarante (*Amaranthus cruentus*) est un légume traditionnel cultivé tant pour les feuilles que pour les grains et est encore couramment cultivée comme céréale dans certaines régions d'Amérique centrale et d'Amérique du Sud. Les plantes de ces régions ont montré une

adaptation remarquable à un large éventail de climats, des tropiques de basses terres aux conditions froides. (Callalou, Laf Sag, Lalshank, 2015). Selon le "Department of Agriculture Forestry and Fisheries (South Africa), 2010", l'amarante est très tolérante dans un environnement aride. Les graines d'amarante ont besoin d'une température du sol comprise entre 18 °C et 25 °C pour germer et d'une température de l'air supérieure à 25 °C pour une croissance optimale. La croissance cesse à des températures inférieures à 18 °C. Le nombre de degrés-jours de croissance au cours de la saison de croissance est un facteur déterminant de la croissance des plantes d'amarante. Des températures plus basses et des jours plus courts induiront la floraison avec une réduction ultérieure du rendement en feuilles. Un trait qui l'aide dans des conditions extrêmement sèches est sa capacité à se faner temporairement puis à se rétablir après les précipitations. La culture ne peut pas résister à l'engorgement d'eau car elle a une capacité relativement faible de consommation d'eau. L'exposition de la plante à une sécheresse sévère induit une floraison précoce et arrête la production de feuilles.

1.4.2 Ratio plantes - poissons

Selon Rakocy, 2007, dans un système aquaponique correctement conçu et équilibré, le rapport entre le poisson et les plantes est basé sur le rapport du taux d'alimentation. Le ratio du taux d'alimentation correspond à la quantité d'aliments fournie au poisson quotidiennement par mètre carré de surface de culture. Pour un système hydroponique de radeau, le rapport optimal varie entre 60 et 100 g / m² / jour et 30 à 70% moins pour les systèmes NFT et de lit de culture. Par exemple, si les poissons sont nourris en moyenne à 1 000 g par jour, la superficie consacrée à la production hydroponique devrait être de 16,7 pour un ratio de taux d'alimentation de 60 g/m² / jour.

D'après DeLong et al., 2009, la conception du système doit être abordée de manière inverse. La taille finale du poisson et le poids total de la pêche sont déterminés, une densité de poisson maximale est établie et des hypothèses sur le taux de mortalité sont appliquées pour obtenir les premiers effectifs. La densité maximale indique le taux d'alimentation journalier maximum, qui représente généralement 1,0 à 1,5% de la biomasse de chaque poisson de taille marchande de 680 grammes. Cette densité de biomasse (kg / m³) est un paramètre de conception qui dépend fortement du type et de la taille de la technologie de filtration utilisée. Une filtration efficace des solides permet d'utiliser des quantités d'alimentation plus élevées tout en maintenant le système dans des limites sûres d'oxygène dissous, d'ammoniac dissous, de pH et de matières en suspension.

La règle générale pour DeLong et al., 2009 est que les systèmes très aérés dans lesquels les poissons sont nourris pour une bonne croissance ont une densité de biomasse maximale d'environ 30 kg / m³ bien que certains exploitants indiquent avoir atteint des densités de poisson maximales de 60 à 72 kg/ m³. Une aération vigoureuse est nécessaire pour dissoudre suffisamment d'oxygène dans l'eau, en particulier dans l'eau chaude utilisée pour la culture du tilapia. Mais une aération vigoureuse remet en suspension et fracture les solides qui doivent être rapidement retirés du réservoir afin de maintenir de bonnes conditions de qualité de l'eau. Dans les systèmes où de l'oxygène supplémentaire est appliqué et où l'aération est utilisée, la densité maximale de poissons peut souvent dépasser 60 kg / m³. Pour les opérations commerciales, la dépense en oxygène supplémentaire peut souvent être compensée par l'augmentation significative de la densité maximale de la biomasse. L'élimination efficace des solides est la clé d'un système bien conçu, car cela facilite le contrôle des autres paramètres de qualité de l'eau. Lorsque les déchets solides ne restent pas dans le réservoir et se décomposent en particules de plus en plus fines, il y a moins d'ammoniac dissous et de dioxyde de carbone et une demande en oxygène inférieure. Avec des concentrations de dioxyde de carbone plus basses, le pH de l'eau du système est plus facilement maintenu pour assurer les performances correctes du biofiltre (DeLong et al., 2009).

Récemment développée par INMED Partnerships for Children, 2017, la technique d'observation est une méthode d'alimentation des poissons qui consiste à observer la consommation de nourritures dans les 30 minutes (rigoureusement) qui suivent la livraison et ajuster en conséquence la quantité d'aliments.

Tableau 1: Fish Feeding Rate and Frequency by Size of Tilapia (at 28°C)

Average individual fish weight	Feeding rate (percent of bodyweight) per day	Feeding frequency (number of times/day)
1 - 5 g	8.0%	4
5 - 20 g	5.0%	4
20 - 100 g	3.5%	3
> 100 g	2.5%	2

(INMED Partnerships for Children, 2017)

Tableau 2: Tilapia Feeding Rates and Frequencies by Water Temperature Water

Water temperature (°C)	Average body weight < 100g		Average body weight > 100g Feeding	
	Feeding rate of the normal rate (%)	Feeding frequency (n/day)	Feeding rate of the normal rate (%)	Feeding frequency (n/day)
26 - 32	100	4	100	2 - 3
24 - 26	90	3	90	2
22 - 24	70	2	60	2
20 - 22	50	2	40	2
18 - 20	30	1 - 2	20	1
16 - 18	20	1	10	1
< 16	No feeding		No feeding	

(INMED Partnerships for Children, 2017)

QUESTION DE RECHERCHE

La présente étude repose sur une démarche scientifique dont les questions de recherches se résument en ces points :

- Quels sont les matériaux disponibles localement pour la conception d'un système aquaponique low-tech au Bénin ?
- Quel est la performance du système aquaponique dans les conditions environnementales locales ?

OBJECTIFS

L'objectif général de notre travail est de rendre accessible à tous un système aquaponique simple, performant et facile à construire localement.

De manière spécifique, il s'agit de :

- Concevoir un système aquaponique low-tech.
- Evaluer les performances du système.

Pour atteindre ces différents objectifs nous avons réalisé un dispositif expérimental constitué de 12 petites unités aquaponiques. Ce dispositif aura permis de tester 3 densités de poissons (10, 20 40) et leur effet sur le développement de la laitue et de l'amarante. Les performances de ces systèmes ont été évalués via un suivi de la qualité de l'eau et de la croissance des plantes et des poissons dans le but d'évaluer leur performance du système. L'expérimentation a été réalisée sur une période de 6 semaines au cours desquelles nous avons produits un cycle de culture de laitues et d'amarantes.

2. METHODOLOGIE

2.1. Mise en place et fonctionnement de l'expérimentation

2.1.1. *Localisation du site de l'expérimentation*

Le site de l'expérimentation est situé à Porto –Novo (capitale du Bénin) à 6.491° et 2.598° . Les dispositifs sont installés sous abri de 40 m^2 de superficie (10m x 4m) recouvert de tôles en plastique transparent (Photo 13). La température moyenne et l'humidité relative moyenne sont respectivement de $30,19^{\circ}\text{C} \pm 1,48$ et de $70,54\% \pm 3,83$. La Figure 19 (annexes) retrace l'évolution de ces deux paramètres durant la période de l'expérimentation.



Photo 13 : Construction de l'abri et installation des systèmes sur le toit
(Hounsa, 2019)

2.1.2. *Systèmes aquaponiques*

Chaque unité aquaponique est constituée d'un bac à poisson, d'un filtre à tourbillon d'un lit de culture et d'un réservoir d'eau. Nous avons construit au total 12 unités aquaponiques, permettant de tester 3 traitements de densité de poissons. Chacun de ces traitements était répété 4 fois.

- ✓ Le bac à poissons

Le bac à poissons est constitué d'un baril de 50 cm de diamètre et 100 cm de hauteur. Chaque baril est rempli avec 200 L d'eau.

- ✓ Le lit de culture

Le lit de culture est fabriqué à partir d'une caisse en bois de 120 cm de long, 85 cm de large et 30 cm de hauteur, soit une surface de culture de 1.02 m^2 et un volume de 0.306 m^3 . L'intérieur de la caisse est revêtu de bâche en plastique pour assurer l'étanchéité du lit de culture. La bâche

est fixée sur les bords de la caisse à l'aide d'une agrafeuse murale. Le substrat utilisé pour le lit de culture est du gravier de construction (quartz), rempli à une hauteur de 15 cm. Ce substrat joue le rôle de biofiltre et de support pour les plantes pour notre système aquaponique. Pour assurer l'automatisme du flux et reflux de l'eau, nous avons installé un siphon en U externe pour notre système aquaponique.

✓ **Le filtre à tourbillon**

La filtration mécanique est assurée par un filtre à tourbillon constitué d'un seau d'une contenance de 50 L. L'entrée de l'eau dans le seau est orientée tangentiellement à la paroi du seau à l'aide d'un coude en PVC pour assurer la rotation de l'eau dans le seau.

✓ **Le réservoir d'eau**

Chaque système est équipé d'un seau d'eau d'une contenance de 50l en guise de réservoir d'eau.

Le niveau d'eau dans le réservoir est maintenu à 25 l par ajout quotidien d'eau.

✓ **Le mouvement de l'eau**

La recirculation de l'eau est assurée par une pompe à eau qui transfère l'eau du réservoir vers le bac à poisson à un débit réglé sur 800 L/ h. L'eau descend ensuite par gravité dans le filtre à tourbillon puis dans le bac de culture puis retourne dans le réservoir d'eau et le cycle recommence. La tuyauterie utilisée est constitué de tuyau PVC pression de 32mm des coudes PVC de 32mm, de vanne et de passe-paroi (écrou tank 32mm).

Tableau 3 : Les différents composants du système

Composants du système			
Lit de culture <i>(Biofiltre et support des plantes)</i>		Surface de culture :	1.02 m²
Filtre à tourbillon <i>(Baril de 50L)</i>		Volume d'eau utilisé :	40 L

Réservoir (Sump : seau de 50 L)		Niveau d'eau maintenue à 30 L
Bac à poisson (Baril de 250L)		Volume d'eau utilisé : 200L
Pompe à air (JBL) 400 L/h		Débit utilisé : 400l/h
Pompe à eau submersible 1500l/h		Débit utilisé : 800 L/h

(Hounsa, 2019)

Tableau 4 : Liste des matériaux de construction du système

Composants	Matériaux
Bac à poissons	1x Baril (250 L) 2x Passe paroi (32mm) 1x Vanne (32 mm) 2x embouts (32mm)
Bac de culture	5x planches (30cm x 120cm) 2x Planches (30cm x 85 cm) 1x Passe paroi (32 mm) 1x embout (32mm) Gravier 1x coude (90° ;32mm)
Filtre à tourbillon	1x Baril (50 L) 3x Passe paroi (32mm) 3x embouts (32mm) 3x coude (90° ;32mm)

Siphon	3x coudes (45° ;32mm) 1x coude (90° ;32mm) Réducteur (20 mm) Tuyau (32 mm)
Réservoir d'eau	Seau de 50 L
Recirculation de l'eau	1x Tuyau (32mm* 2 m) 1x coude (90° ;32mm) Pompe à eau Raccord
Aération de l'eau	1x Pomme à air 2x Bulleurs Raccord (2x 1.5m)

(Hounsa, 2019)



Photo 14 : Installation des unités aquaponiques
(Hounsa, 2019)

2.1.3. Fonctionnement et maintenance du système

❖ La phase de cyclage

Une fois le système construit, nous avons introduit la quantité d'eau nécessaire (eau de robinet) et mis en marche les pompes, testé les siphons et réparer les fuites. Nous avons lancé alors la phase de cyclage en ajoutant de la nourriture pour poissons dans les bacs à poissons. Cela a pour but de mettre en marche l'activité bactérienne du biofiltre. Cette phase a duré 3 semaines au cours desquelles nous avons utilisé 60g d'aliments pour poissons par semaine.

❖ La maintenance du système

Au cours de l'expérimentation, les tâches de maintenance ont consisté à nourrir les poissons, vérifier le bon fonctionnement des pompes à eau et à air, siphonner le fond des bacs à poissons, observer les changements au niveau de l'eau, nettoyer le filtre à tourbillon, vérifier et ajuster le

niveau d'eau dans les réservoirs d'eau, vérifier l'état des poissons et des plantes et remplacer si nécessaire une partie de l'eau.

La qualité de l'eau est essentielle. Une bonne filtration assure une bonne qualité de l'eau. La vérification de l'eau se faisait quotidiennement. En effet, les aliments non consommés peuvent se décomposer au fond du réservoir, causant une accumulation d'ammoniac dans le système. Si le niveau d'impuretés dans l'eau augmente trop, l'eau prend une couleur trouble ou/et une surface mousseuse. Par conséquent, les aliments non consommés sont retirés du fond du réservoir. Quand cela se produit, nous procérons au changement partiel de l'eau.

2.2. Matériel vivant

➤ *Les poissons*

Le poisson utilisé est le Tilapia du Nil, *Oreochromis niloticus* (L.) issus de la ferme- société « AQUAFISH » sise à Porto-Novo.

➤ *Plantes*

Le matériel végétal est constitué de la laitue (*Lactuca sativa* var : maruli) et de l'amarante (*Amaratus cruentus*). Les semences de ces deux plants sont issues du Centre Songhaï de Porto-Novo.



Photo 15 : Matériel végétal
(Hounsa, 2019)

2.3. Protocole expérimental

L'expérimentation a consisté à comparer la performance du système avec 3 densités de poissons. D'après Somerville et al., 2014, une densité de 10kg/ m³ d'eau sont recommandées pour un début en aquaponie. Sur cette base, nous avons démarré avec des densités de 2.5 kg/ m³ (DP10); 5 kg/ m³ (DP20) et 10 kg/ m³ (DP40). Cela correspond respectivement à 10, 20 et

40 poissons de poids moyen de 50 g pour un bac de 200 L d'eau. Les poissons sont nourris 3 fois par jour avec 5g, 10g et 20 g, soit respectivement 15g, 30g et 60g d'aliments (granulé) par jour pour les traitements DP10, DP20 et DP40. Cela équivaut à un ratio de 3% de leur biomasse corporelle initiale comme le recommandent Somerville et al., 2014 ; INMED Partnerships for Children, 2017.

Sur chaque média de culture, nous avons repiqué 15 plants de laitue et 15 plants d'amarante 15 jours après semis en pépinière. Entre chaque plant il y a un écartement de 15cm. Après la construction du système, l'expérimentation est réalisée sur une période de 9 semaines (3 semaines pour la phase de cyclage et 6 semaines pour l'essai proprement dit.)

2.4. Collecte et analyse des données

2.4.1. Qualité de l'eau

Tout au long de la période de l'essai, la température de l'eau, le pH et l'électroconductivité ont été mesurée 3 fois par jour (10h, 14h et 18h) à l'aide du pH-mètre et de l'électroconductimètre de pancellent (précision : Résolution de pH est 0.01pH et Conductivité: 0 ~ 9990us / cm, Précision: $\pm 2\%$.). Chaque semaine, nous prélevions des échantillons d'eau dans le réservoir pour mesurer la dureté carbonatée de l'eau (KH), la dureté totale (GH), l'oxygène dissout (DO) la concentration d'ammoniaque (NH4), de nitrite (NO2), de nitrate (NO3). Pour les différents paramètres, nous avons utilisé le Testlab de JBL en suivant respectivement pour chaque paramètre, les différents modes opératoires indiqués dans le guides du test JBL.



Photo 16 : Matériels d'analyse des paramètres de l'eau
(Hounsa, 2019)

2.4.2. Croissance des poissons et des plantes

✓ Les poissons

Le suivi de la croissance des poissons a consisté à enregistrer la quantité d'aliments utilisé et mesurer la taille et le poids des poissons. Cette opération était réalisée toutes les deux semaines.

Pour la prise de poids des poissons nous avons procédé comme suit :

- Remplir un récipient avec de l'eau provenant du système aquaponique.
- Poser le récipient sur la balance et tarer la balance.
- Prélever 5 poissons et, égouttez l'épuisette pendant quelques secondes et placez les poissons dans le récipient.
- Peser et enregistrer le poids des poissons.
- Divisez ce chiffre par 5 pour obtenir un poids moyen pour chaque poisson.

Les paramètres de production suivants seront déterminés selon la procédure de Ridha et Cruz (2001)

$$\text{Taux de croissance spécifique} = \frac{(\ln(\text{poids moyen final}) - \ln(\text{poids moyen initial})) * 100}{\text{nombre de jours de culture}}$$

$$\text{Taux de conversion} = \frac{\text{poids total de l'aliment sec obtenu}}{\text{gain de poids humide total}}$$



Photo 17 : Prélèvement des données de croissance des poissons
(Hounsa, 2019)

✓ Les plantes

➤ Suivie de la croissance :

L'évolution de la croissance des plantes est suivie en enregistrant chaque semaine la hauteur des plants, le nombre de feuilles et la largeur des feuilles à l'aide d'une règle graduée et en

comptant le nombre de feuilles. A la fin de la production, les biomasses fraîches et sèches ont été déterminées.



Photo 18 : Prélèvement des données de croissance des plantes
(Hounsa, 2019)

➤ *Détermination de la teneur de la matière sèche*

A la récolte des plants de laitues et d'amarantes nous avons prélevé 3 échantillons de chaque système pour évaluer le taux de matières sèches. Les différentes manipulations ont été réalisées dans le laboratoire de technologie alimentaire de l'Institut National de Recherche Agronomique du Bénin (INRAB). La méthode utilisée est celle décrite par l'AFNOR (1989) qui consiste en une dessiccation de l'échantillon à une température de $103\pm2^{\circ}\text{C}$.

Mode opératoire

5 g d'échantillons sont introduits dans un verre de montre sec préalablement taré. Une opération de séchage pendant 48 heures est réalisée à l'étuve réglée à 103°C .

Mode de calcul

La teneur en eau est donnée par la relation suivante :

$$H\% = \frac{M_1 - M_2}{M_1 - M_0} * 100$$

Avec : H % : teneur en eau exprimée en grammes pour 100g d'échantillon

M₀ : masse en gramme de la capsule vide

M₁ : masse en gramme de la capsule avec l'échantillon avant étuvage

M₂ : masse en gramme de la capsule avec l'échantillon après étuvage

Ensuite, la teneur en matière sèche (MS%) est déduite de celle de l'humidité, selon la relation <:

$$MS\% = 100 - H\%.$$



Balance électronique



Etuve

Photo 19 : Matériels utilisés pour la détermination de la matière sèche
(Hounsa, 2019)

2.4.3. Consommation d'énergie électrique

La consommation électrique a été mesurée à l'aide d'un contrôleur électrique (Otio - Contrôleur de Consommation Électrique CC 5000) branché directement sur les prises électriques destinées à recevoir les pompes à eau et à air. Durant la période de l'expérimentation, la consommation électrique est enregistrée chaque semaine et le contrôleur est remis à zéro. Pendant la période de l'essai, le groupe électrogène est utilisé en cas de coupure.

2.4.4. Consommation en eau

La consommation en eau est mesurée lors de l'ajout d'eau dans le réservoir d'eau et du changement partiel d'eau. Le réservoir d'eau est un seau de 50 l gradué dans lequel nous avons maintenu journalièrement constante un volume de 30 l d'eau. Nous réalisons cette opération dans la matinée et enregistrons la quantité d'eau complétée dans le seau. Pour l'ajout, l'eau du robinet a été recueillie et laissée décanter pendant 72 h dans un récipient pour permettre au chlore de s'évaporer. Les sources de pertes d'eau étaient l'évaporation, l'évapotranspiration, les déversements lors du nettoyage du fond des bacs à poissons, les fuites et les échanges d'eau.

2.5. Analyses Statistiques

Après avoir encodé les données dans le tableur Excel 2016, l'analyse de variance entre les différents traitements des paramètres de croissance des poissons, des plantes et du rendement a été faite grâce à la fonction « aov » de R. le seuil de significativité a été fixé à $P < 0.05$. Ensuite, la méthode de Tukey a été utilisée à l'aide de la fonction Tukey. HSD test pour les comparaisons multiples des moyennes afin de dégager les différences significatives entre les systèmes au seuil de 5%. Enfin les graphes et figures ont été réalisés dans Excel. Les différentes analyses réalisées nous ont permis de dégager les résultats présentés dans la section suivante.

3. RESULTATS

3.1. Conception du système

3.1.1. Coût d'installation du système

L'évaluation des coûts des différents matériaux utilisés pour la réalisation du système est consignée dans le tableau ci-après. Au total un montant de 116500 FCFA soit environ 179,23 euros.

Tableau 5 : Coût de réalisation d'un système aquaponique

Composants	Coûts (FCFA)	Coûts (Euro)
Lit de culture	30000	46,15
support	5000	7,69
Tank poisson	20000	30,77
Filtre à tourbillon	12000	18,46
Sump	3500	5,38
Pompe à eau	16500	25,38
Pompe à air	24000	36,92
Plombier	5000	7,69
TOTAL	116500	179,23

3.1.2. Fonctionnement du système

➤ Heures de travail

Pour le fonctionnement du système, il est préférable d'effectuer des travaux d'entretien ou de réparation importants entre les récoltes de légumes et les récoltes de poissons, mais il est essentiel de vérifier chaque élément quotidiennement. Ainsi les activités listées dans le tableau ci-dessous sont effectuées quotidiennement. L'entretien du système demande environ 2h 15 min par semaine.

Tableau 6 : Temps de travail par système

Activités	Nombre d'heure de travail (min/semaine)
Ajout d'eau	35
Remplacement d'eau	30
Alimentation des poissons	25
Nettoyage du fonds des bacs	30

Contrôle de la tuyauterie	10
Contrôle de la santé des plants et des poissons	15
TOTAL	145

➤ Consommation en eau

Au début de l'expérimentation, 280 L d'eau étaient nécessaire pour mettre en marche le système. Par la suite il y a un besoin régulier d'ajout d'eau pour compenser la perte en eau. Au total une moyenne de 80 L a été utilisée par chaque système durant les trois semaines de la phase de cyclage.

Pendant les 6 semaines de l'essai proprement dite, une quantité totale moyenne de 204,62 L \pm 34,93 ; 297,875 L \pm 55,02 et 367,625 L \pm 67,06 d'eau ont respectivement été utilisé par les traitements DP 10, DP20 et DP40. Cela correspond à un besoin journalier moyen en eau de 4,87 L, 7,09 L et 8,75 L respectivement pour DP, 20 et 40. Ces quantités équivalent à un échange d'eau quotidien de 1,74% ; 2,53% et 3,12% respectivement pour les systèmes de densité 10, 20 et 40 tilapias.

Comme présenté dans la Figure 5, l'analyse de variance de la moyenne de consommation d'eau a ressorti une différence significative entre les systèmes ayant une densité de 10 tilapias et ceux ayant une densité de 40 tilapias.

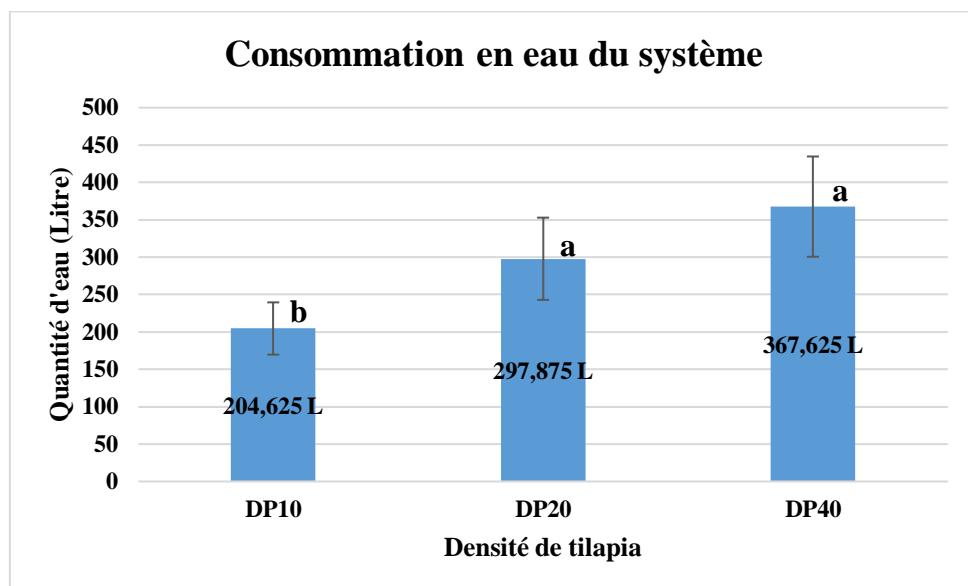


Figure 5 : Consommation en eau du système durant les 6 semaines d'expérimentation
(Hounsa, 2019)

La quantité d'eau pour produire 1 Kg de poissons est de 738,72 L ; 809,66 L et 482,64 L pour respectivement les densités 10, 20 et 40 tilapias. Pour 1Kg d'aliments apporté il faut 324.66 L ; 266.33L et 145 L d'eau respectivement pour DP10 ; DP20 et DP40.

➤ **Electricité**

Chaque système est équipé de pompe à eau et de pompe à air. Il n'y a pas de variation significative pour la consommation électrique aux niveaux de ces derniers. La consommation totale d'énergie par système est de 35,78 KWH pendant la période expérimentale. Cela équivaut à un coût d'environ 3900 FCFA, soit environ 6 euros.

Pendant la période de l'expérimentation, nous avons enregistré des coupures d'électricité pour un total de 105 heures avec en moyenne 40 minutes par coupure. Ce qui équivaut à 3,2 KWH l'énergie totale fournie par groupe électrogène pour un total de 20 L d'essence. Cela fait environ un coût de 6000 FCFA soit environ 9,23 euros.

3.2.Qualité de l'eau

3.2.1. Evolution du pH et de l'électroconductivité de l'eau

Les figures (Figure 6 et Figure 7) ci- après retracent l'évolution de l'électroconductivité (EC) et du pH de l'eau. Au début de l'expérimentation nous avons un EC faible (<300 μ s) et un pH élevé. L'Electroconductivité de l'eau des poissons évolue différemment en fonction du temps au niveau des différents systèmes mis en place. Pendant la phase de cyclage (les 3 premières semaines), l'EC a augmenté significativement, passant de 200 μ S /cm à environ 450 μ S /cm. Aucune différence significative n'a été observé entre les 3 traitements. Au niveau du système DP40, l'EC de l'eau est plus élevée avec comme maximum 634,88 μ s/cm. Suite à l'introduction des poissons l'EC a significativement augmenté de la semaine 3 à la semaine 4 pour les traitements DP20 et DP40. Par contre, aucune différence significative n'a été observée pour la DP10. Après l'ajout des plantes l'EC a significativement diminué entre la semaine 4 et 6 pour les DP20 et DP40. Entre la semaine 6 et 8, l'EC évolue sans tendance. A la fin de l'expérimentation (9ème semaine), l'EC des différents traitements ne montrait aucune différence significative.

Quant au pH, on constate que sa variation à travers le temps au cours de l'expérimentation est sans différence significative entre les différents traitements. Ce n'est qu'à la 4ème et 5ème semaine qu'une légère différence a été observée entre le système DP40 et les autres systèmes. C'est au niveau de DP40 qu'est enregistré le pH le plus élevé (pH=7.7).

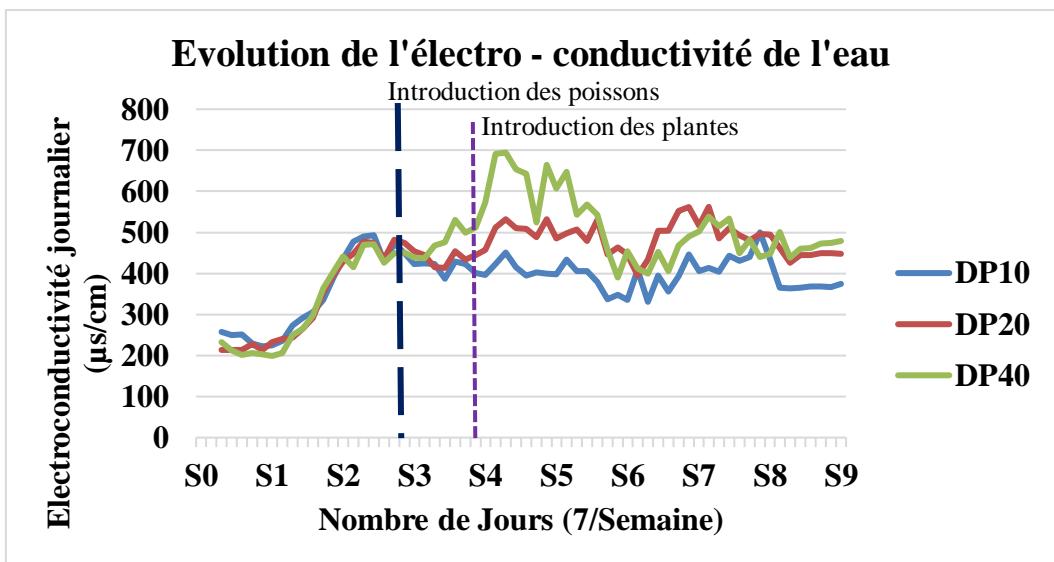


Figure 6 : Evolution de l'électroconductivité de l'eau
(Hounsa, 2019)

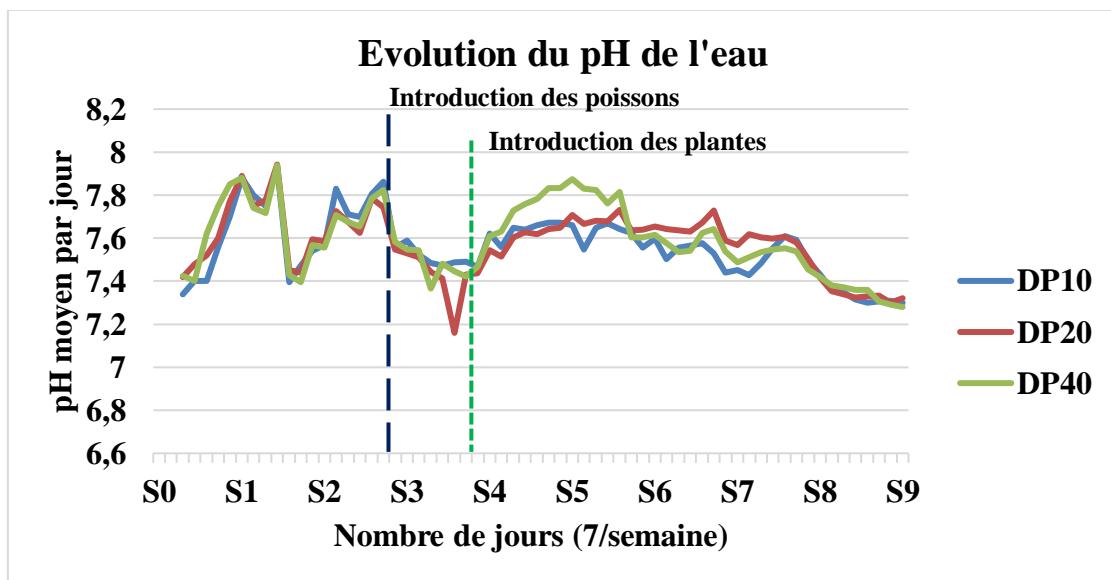


Figure 7 : Evolution du pH de l'eau
(Hounsa, 2019)

3.2.2. Température de l'eau

Les densités de poissons n'ont pas d'influence sur la température de l'eau des poissons. Par contre on observe un réchauffement de l'eau de tous les systèmes dans l'après-midi. Ainsi nous observons une température moyenne minimale de $30,34 \pm 1,5$ le matin et une température moyenne maximal de $32,88 \pm 2,67$.

3.2.3. L'azote dans le système

Les figures (Figure 8 Figure 9, et Figure 10) ci- après illustrent l'évolution de la concentration d'ammoniaque, de nitrite et de nitrate. Au cours de la phase de cyclage (S0, S1 et S3) on constate une baisse des concentrations d'ammoniaque et de nitrite et l'absence de nitrate dans tous les systèmes. Après l'introduction des poissons dans les systèmes au cours de la troisième semaine, on constate une légère augmentation de concentration d'ammoniaque uniquement au niveau des systèmes ayant une densité de 40 tilapias et l'apparition de nitrate dans tous les systèmes. Pendant la quatrième semaine, correspondant à l'introduction des plantes dans les différents systèmes, la concentration de nitrite a baissé dans pour tous les traitements. Mais la vitesse diminution a été influencée par la densité des tilapias dans le système. Plus grande est la densité plus vite la concentration de nitrite a baissé.

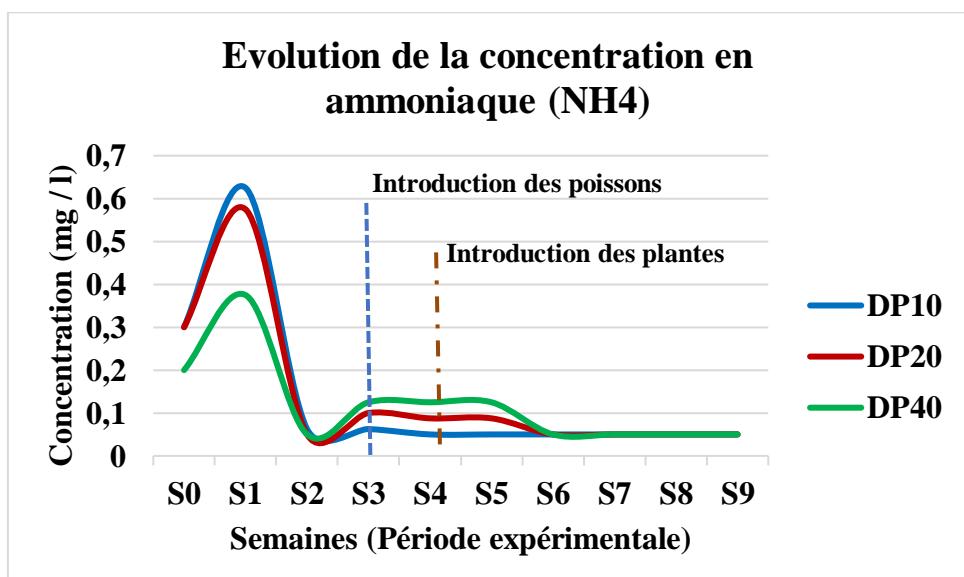


Figure 8 : Evolution de la concentration en ammoniacque
(Hounsa, 2019)

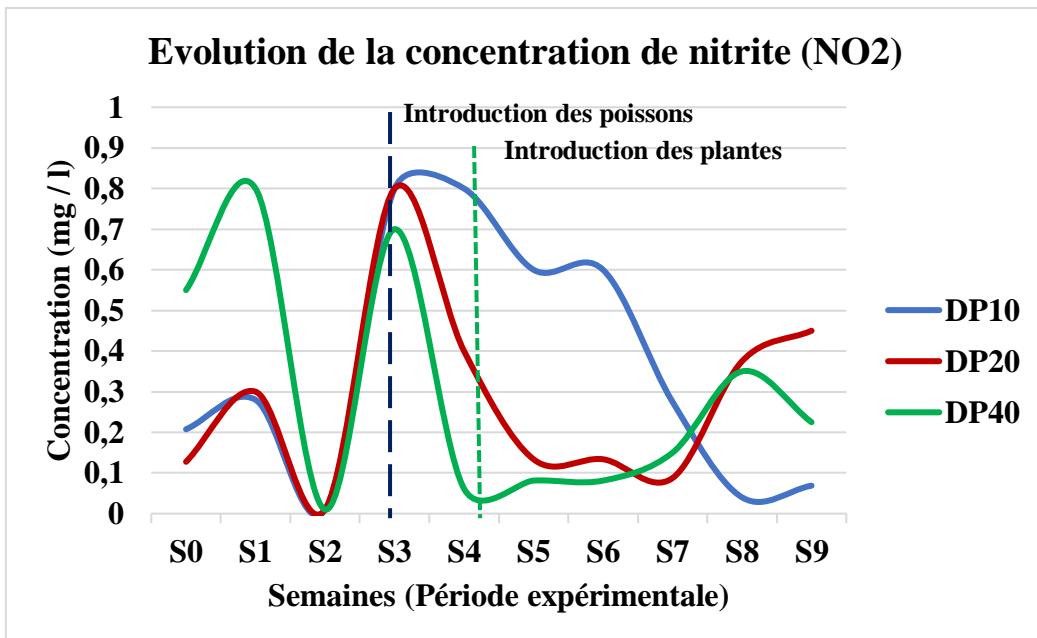


Figure 9 : Evolution de la concentration de nitrite
(Hounsa, 2019)

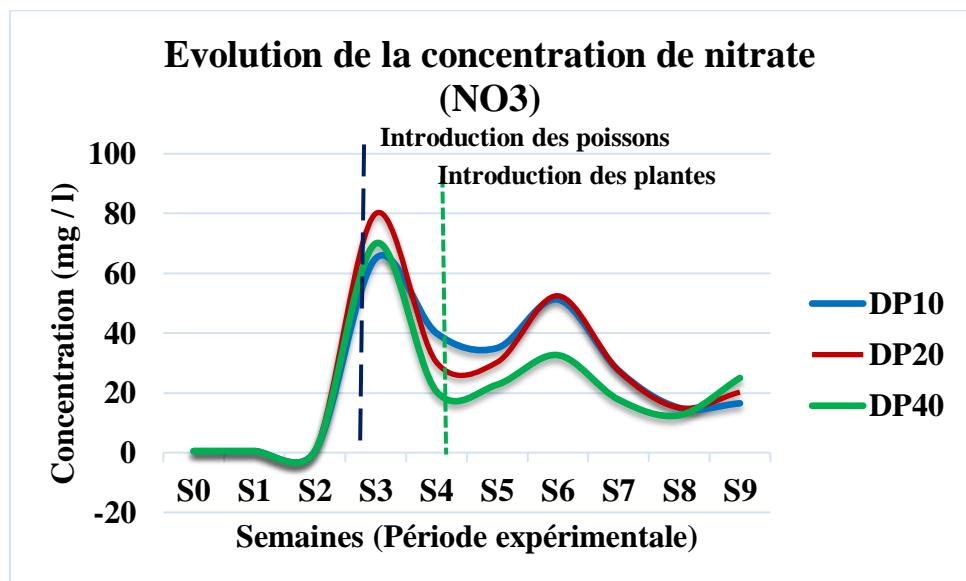


Figure 10 : Evolution de la concentration de nitrate (NO3)
(Hounsa, 2019)

3.3. Croissance des poissons

3.3.1. Evolution du poids des tilapias

Les Tilapias stockés à la densité 10 ont significativement gagné plus de poids individuellement que les deux autres densités (DP20 et DP40) de tilapias. Il n'y pas de différence de gain de poids entre la DP20 et la DP40. Cependant, vers la fin de l'expérimentation, le traitement DP40

a enregistré un gain de poids supérieur à celui du traitement DP20 (Figure 11 **Erreurs ! Source du renvoi introuvable.**).

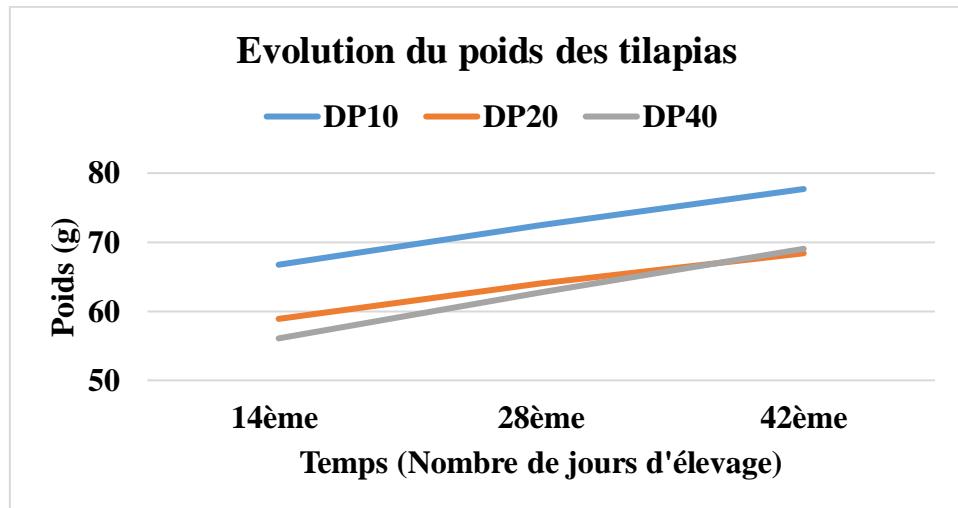


Figure 11 : Evolution du poids des tilapias durant la période de l'essai
(Hounsa, 2019)

A la fin de l'expérimentation, les systèmes ayant des densités de 40 poissons ont signification produit plus de biomasse supplémentaire de poissons ($761,7g \pm 95,39$) que les traitements avec les densités 10 et 20 de tilapia (Figure 12). Il n'y a pas de différence de biomasse produite entre les systèmes de densité 10 et 20.

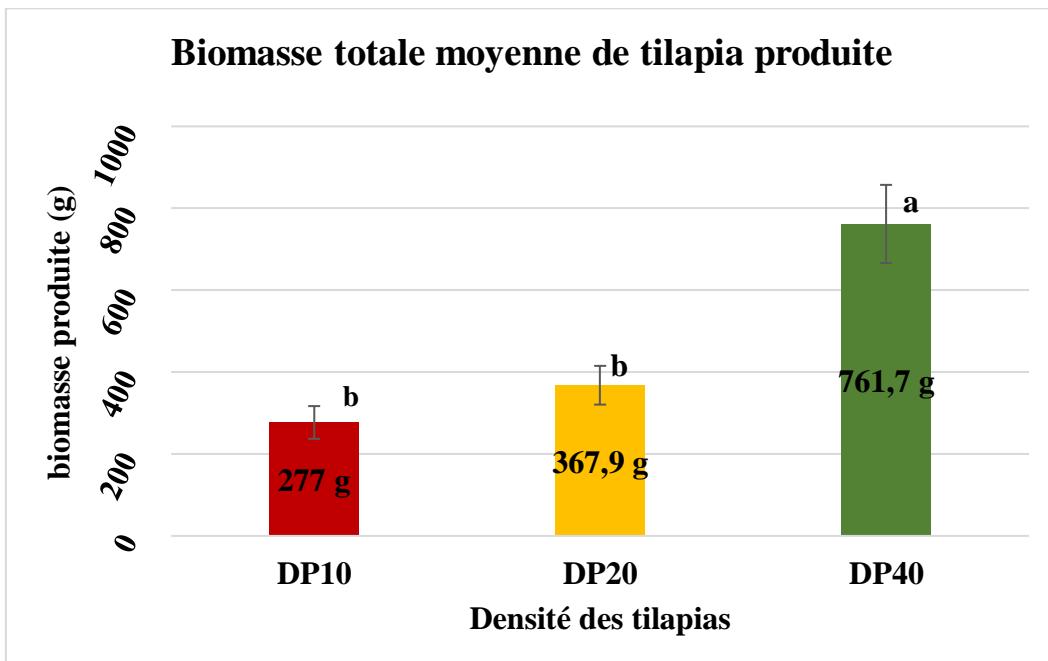


Figure 12 : Biomasse totale moyenne par densité de tilapias
(Hounsa, 2019)

3.3.2. Evolution de la croissance spécifique des tilapias

Du 1^{er} au 14^{ème} jours après l'introduction des poissons, DP10, DP20 et DP40 ont crû très rapidement avec ceux à la densité 10 qui détiennent le taux le plus élevé (2.02) de croissance. L'analyse de variance entre les différentes densités de tilapias à cet âge confirme que la DP10 est significative supérieure aux autres traitements. Sur toute la période de l'expérimentation, le taux de croissance spécifique des poissons a évolué en forme de cloche (Figure 13) pour les trois traitements étudiés (densité de 10, 20 et 40 tilapia). A la fin de l'expérimentation (42 jours d'élevage) le taux moyen de croissance spécifique des poissons à la densité 40 est de 0.82 et supérieur à celui des poissons à la densité 10 (0.48) et 20 (0.47).

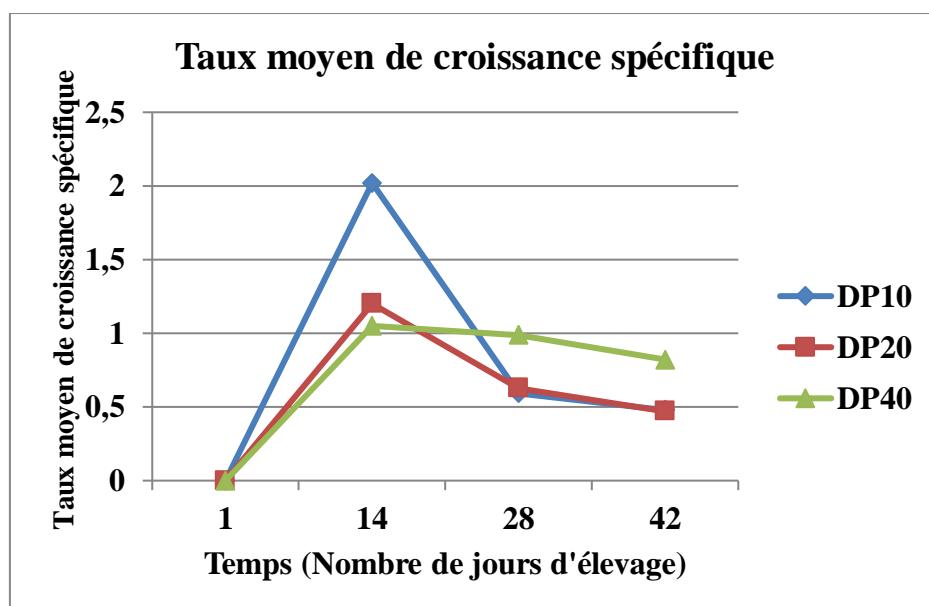


Figure 13 : Evolution du taux moyen de croissance spécifique du tilapias
(Hounsa, 2019)

3.3.3. Taux de conversion des tilapias

Globalement les taux de conversion alimentaire des différents traitements (DP10, DP20 et DP40) sur toute la période de l'expérimentation ne sont pas significativement différents. Cependant, Le taux de conversion des aliments observé chez les poissons au niveau des trois types de traitement croit du 1^{er} au 28^{ème} jour d'expérimentation et atteint son maximum avant de décroître (Figure 14).

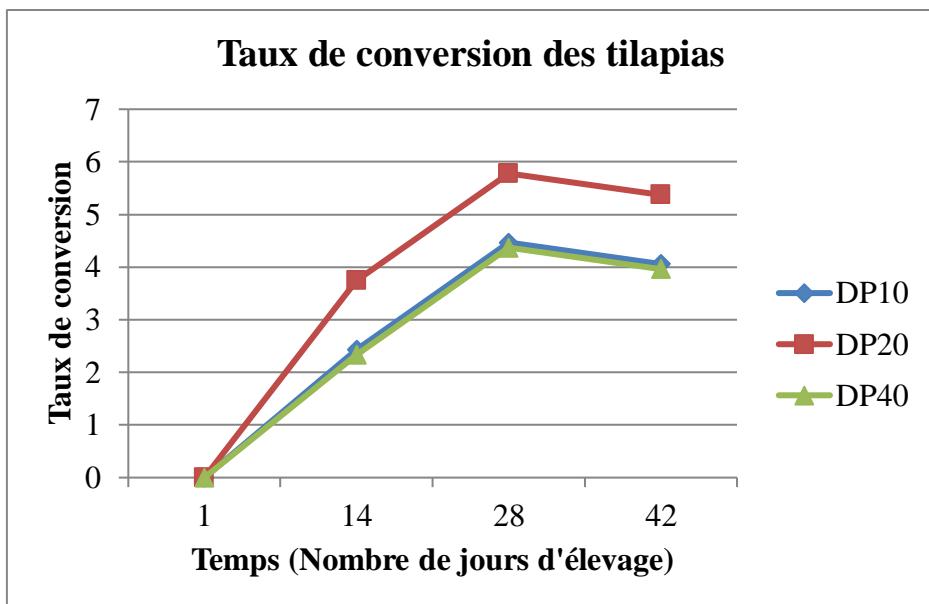


Figure 14 : taux de conversion des tilapias
(Hounsa, 2019)

Tableau 7 : Synthèse des paramètres de croissance des tilapias

Traitements	Taux moyen de croissance	Taux de conversion alimentaire	Gain moyen de poids des tilapias (g)	Gain moyen de taille des tilapias (cm)	Taux de survie des tilapias (%)
DP10	$1,035 \pm 0,23$ a	$2,788 \pm 0,55$ a	$27,7 \pm 4$ a	$4,175 \pm 1,41$ a	100
DP20	$0,7699 \pm 0,14$ a	$3,355 \pm 0,66$ a	$18,4 \pm 2,36$ b	$3,525 \pm 0,63$ a	95
DP40	$0,955 \pm 0,22$ a	$2,987 \pm 0,83$ a	$19,04 \pm 2,38$ b	$3,025 \pm 0,5$ a	93,5

* la différence entre les valeurs ayant les mêmes lettres sur la même colonne n'est pas significative.
(Hounsa, 2019)

3.4.Croissance des plants d'amarante

3.4.1. Effet de la densité des tilapias sur le rendement de l'amarante

Au 28^{ème} jour après repiquage, le rendement moyen des plants d'amarante varie de 955g/m² pour la DP 10 à 417,5 g/m² pour la DP 40. L'analyse de variance des rendements de l'amarante issue des différents traitements révèle que le rendement de la DP10 est significativement supérieur à celui des deux autres traitements. Cependant, il n'y a pas de différence significative entre les systèmes de densité 20 et 40. L'analyse des données de matières sèches pour les différents traitements ne révèle aucune différence significative entre les traitements.

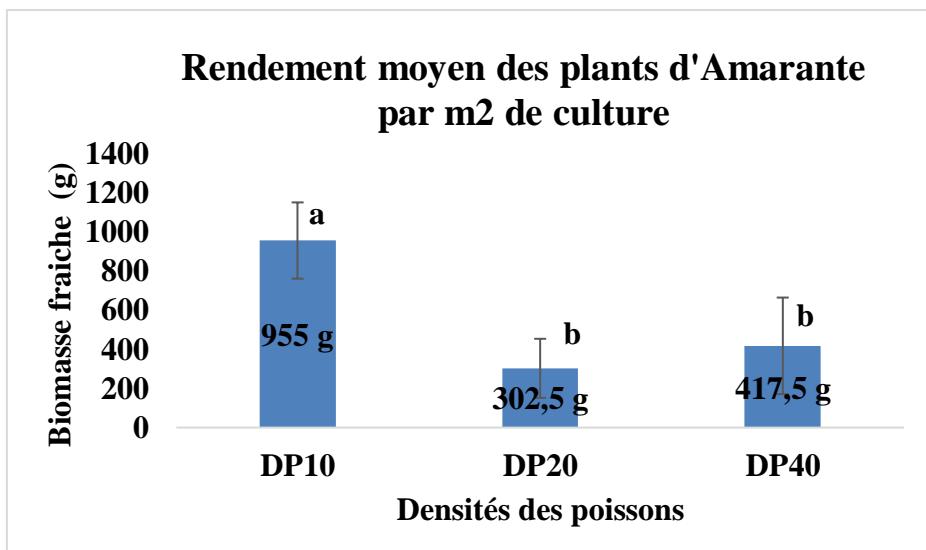


Figure 15 : Rendement moyen des plants d'amarantes

3.4.2. Effet de la densité de tilapia sur la croissance des plants d'amarante

En fonction des différentes densités de tilapias utilisés dans les systèmes, nous avons observé une variation de la croissance des plants d'amarante :

➤ *La hauteur des plants d'amarantes*

Au cours de la première semaine après repiquage, la croissance en hauteur des plants d'amarante ne présente pas de différence significative pour tous les traitements et se situe à 8,98 cm environ (Figure 16).

La différence se manifeste à partir du 14^{ème} jour après repiquage où les hauteurs moyennes des plants d'amarante de la DP10 ($17,8 \pm 3,5$) sont significativement plus élevées que celles de la DP40 ($10,3 \pm 2,6$). Cette différence est maintenue jusqu'à la fin du cycle de culture (28^{ème} jour) où les hauteurs finales des plants de la densité 10 sont de $38,9 \pm 6,1$ contre une hauteur de $24,8 \text{ cm} \pm 8$.

Nous avons aussi noté que les hauteurs moyennes des plants d'amarante du traitement DP20 sont resté statistiquement égales à celles du traitement DP10 au cours des deux premières semaines après repiquage et à celles du traitement DP40 au cours de deux semaines suivantes.

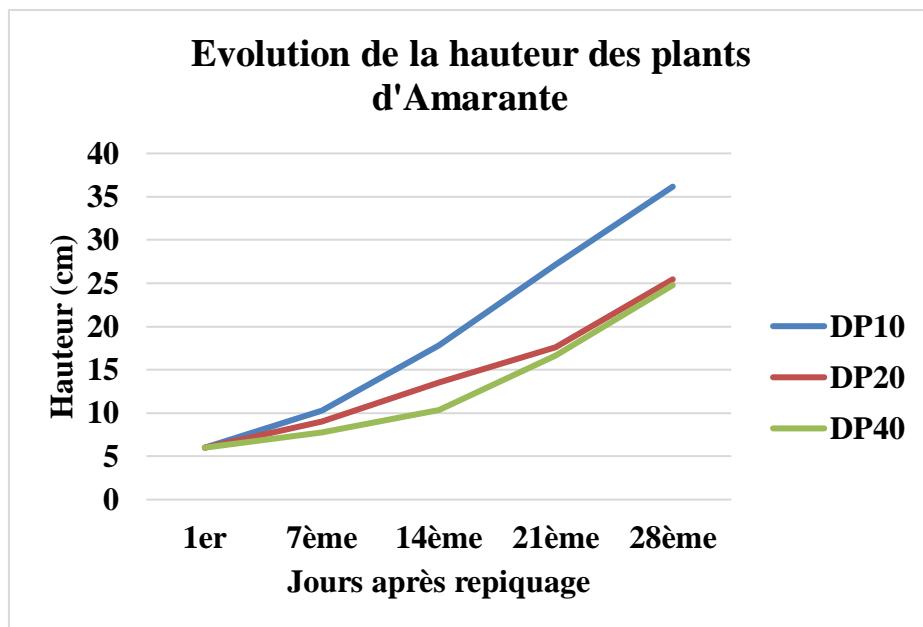


Figure 16 : Evolution de la hauteur des plantes d'amarante par traitement

(Hounsa, 2019)

➤ *Largeurs et nombre de feuilles*

Les plants d'amarante des systèmes à densité 10 tilapias ont des feuilles plus larges que ceux des systèmes autres systèmes jusqu'au 21^{ème} jour (Tableau 8). L'analyse statistique des largeurs moyennes des plants montre une différence signification au niveau de leur évolution en fonction des densités de poissons dans le système. Cependant, au 28^{ème} jours les largeurs des feuilles ne présentent plus de différence significative pour les trois traitements.

Quant au nombre de feuilles, il n'y a pas de différence significative entre tous les traitements jusqu'au 14^{ème} jours après repiquage. Pour le reste de la période (21 au 28^{ème} jours après repiquage), les différences du nombre de feuilles sont nettement perçues entre les traitements.

Tableau 8 : Synthèse de la croissance de l'amarante

	DP10	DP20	DP40
Hauteur plants			
7 ^{ème} jour	10,3±2,1 a*	9,0±0,7 a	7,7±1,3 a
14 ^{ème} jour	17,8±3,5 a	13,5±2,9 ab	10,3±2,6 b
21 ^{ème} jour	27,2±2,3 a	17,6±3,5 b	16,6±4,5 bc
28 ^{ème} jour	38,9±6,1 a	25,5±7,7 b	24,8±8,1 bc
	P<0.001		F= 17,5
Largeur feuilles			
7 ^{ème} jour	2,6±0,4 a	2,0±0,2 ab	1,8±0,2 b
14 ^{ème} jour	3,3±0,5 a	2,2±0,4 b	1,8±0,4 bc

<i>21^{ème} jour</i>	3,9±0,5 a	3,1±0,6 ab	2,9±0,7 b
<i>28^{ème} jour</i>	4,3±0,4 a	3,5±0,4 a	3,5±0,8 a
P<0,001		F= 20,25	
Nombre feuilles			
<i>7^{ème} jour</i>	9±1a	7±1a	6±0a
<i>14^{ème} jour</i>	16±4a	10±2a	10±2a
<i>21^{ème} jour</i>	28±6a	19±6ab	16±6b
<i>28^{ème} jour</i>	40±2a	28±8b	30±15bc
P= 0,001		F= 8,27	

* la différence entre les valeurs ayant les mêmes lettres sur la même ligne n'est pas significative.
(Hounsa, 2019)

3.5.Croissance des plants de laitue

3.5.1. Effet de la densité des tilapias sur le rendement de laitue

Le rendement moyen des plants de laitue varie de 342,45 g/m² pour la DP10 à 624,97 g/m² pour la DP40. Pour les différents traitements l'analyse de variance entre rendement de laitue révèle de différences significatives. Les rendements des systèmes à densité 20 et 40 tilapias sont statistiquement égaux. Le rendement du traitement DP10 est significativement inférieur au rendement des deux autres (Figure 17). L'analyse des données de matières sèches pour les différents traitements ne révèle aucune différence significative.

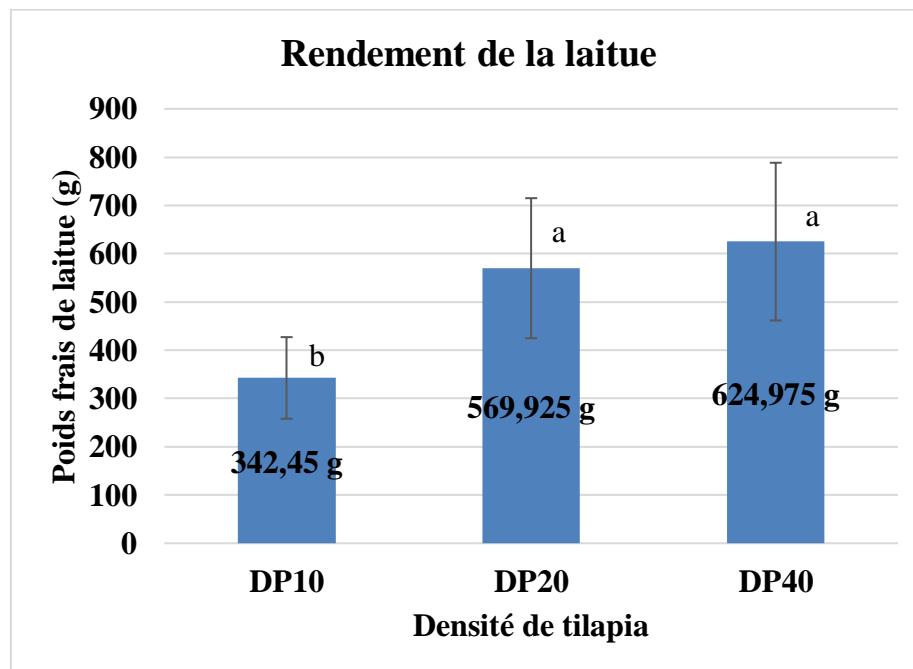


Figure 17 : Rendement de la laitue par traitement
(Hounsa, 2019)

3.5.2. Effet de la densité de tilapia sur la croissance des plants de laitue

➤ *Hauteur des plants de laitue*

La Figure 18 ci- dessous illustre l'évolution des hauteurs moyennes des plants de laitue selon des différents traitements tout au long de l'expérimentation. On observe une différence significative dans évolution de la hauteur moyenne des plants de laitue. Cette différence s'observe à partir du 21^{ème} jour par le traitement DP40 dont la hauteur des plants de laitue se démarque des deux autres.

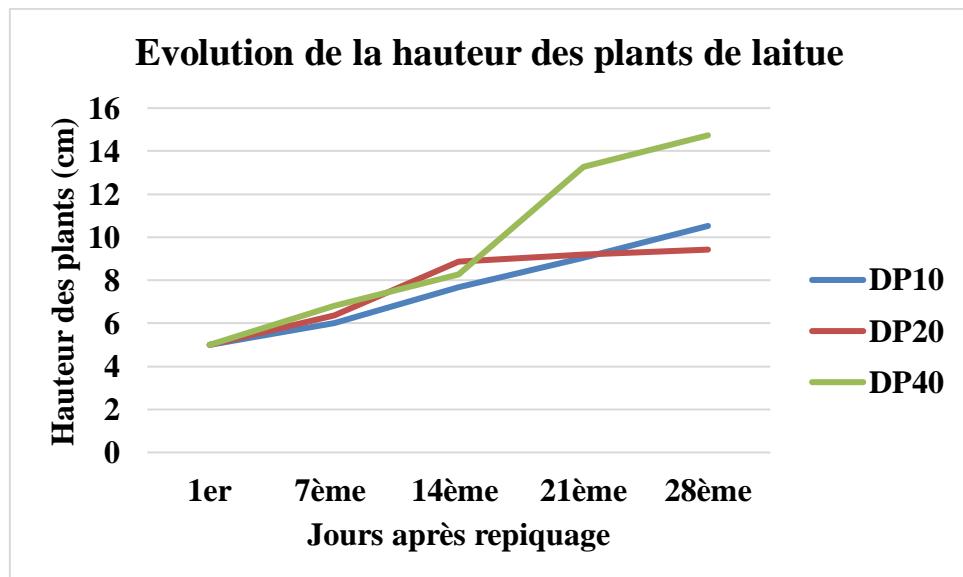


Figure 18 : Evolution des hauteurs moyennes des plants de laitue
(Hounsa, 2019)

➤ *Largeurs et nombre de feuilles*

La largeur moyenne des feuilles de laitue est similaire pour les différents traitements. L'analyse de variance n'a révélé aucune différence significative pour l'évolution des largeurs des feuilles de laitue dans les différents traitements. Quant aux nombres de feuilles, la différence significative n'est apparue qu'après le 21^{ème} jour avec le plus grand nombre de feuilles (10 ± 2) pour le système de densité 40 qui sont plus pourvus en feuilles.

Tableau 9 : Synthèse de la croissance des plants de laitue

	DP10	DP20	DP40
Hauteur plants			
<i>7ème Jour</i>	$6,0 \pm 1,1$ a*	$6,4 \pm 0,8$ a	$6,8 \pm 0,4$ a
<i>14ème Jour</i>	$7,7 \pm 0,9$ a	$8,9 \pm 0,6$ a	$8,3 \pm 1,9$ a
<i>21ème Jour</i>	$9,1 \pm 1,7$ b	$9,2 \pm 1,9$ b	$13,3 \pm 3,0$ a

<i>28ème Jour</i>	$10,5 \pm 2,8$ b	$9,4 \pm 1,6$ b	$14,7 \pm 3,1$ a
P<0.001			F= 8.57
Largeur Feuilles			
<i>7ème jour</i>	$3,7 \pm 0,7$	$4,5 \pm 0,5$	$4,6 \pm 0,5$
<i>14ème jour</i>	$5,2 \pm 1,0$	$6,6 \pm 0,6$	$4,5 \pm 0,6$
<i>21ème jour</i>	$5,9 \pm 1,3$	$6,2 \pm 0,9$	$8,3 \pm 1,5$
<i>28ème jour</i>	$7,5 \pm 3,3$	$6,8 \pm 1,7$	$9,2 \pm 2,6$
P= 0.14			F= 2
Nombre Feuilles			
<i>7ème jour</i>	4 ± 1	5 ± 1	5 ± 1
<i>14ème jour</i>	6 ± 1	7 ± 1	7 ± 1
<i>21ème jour</i>	8 ± 1	8 ± 2	7 ± 1
<i>28ème jour</i>	8 ± 1 b	8 ± 1 b	10 ± 2 a
P= 0.02			F= 4.29

* la différence entre les valeurs ayant les mêmes lettres sur la même ligne n'est pas significative.
(Hounsa, 2019)

4. DISCUSSION

4.1. Analyse économique

La construction du système s'est faite grâce au matériaux disponibles localement. Elle est relativement simple et facile à réaliser. La construction d'un système a coûté environ 116500 FCFA soit environ 180 euros.

Les essais proprement dits ont été réalisés sur une période de 6 semaines. Ce délai trop court ne nous permet pas de disposer de données suffisantes pour une étude de rentabilité sérieuse. Ainsi donc, nous avons procédé à une extrapolation à base des données fournies par Somerville et al., 2014, sur la productivité des systèmes aquaponique low- tech. Cet exercice nous a permis d'avoir une idée sur la rentabilité de notre système à travers quelques scénarii de production. Il ressort de cette extrapolation (Tableau 16 en annexe) que seule la DP40 promet une marge brute positive. C'est-à-dire que pour la DP40, on a des scénarii pour lesquels le revenu annuel de production (Tableau 14) est supérieur aux coûts des consommables (Tableau 11 et

Tableau 12). Cela signifie que lorsque le système sera capable de fonctionner avec une densité élevée de tilapia, on pourra observer une rentabilité financière. Cette conclusion nous interpelle alors à poursuivre les essais jusqu'à la maturation des systèmes. selon Somerville et al., 2014 les systèmes aquaponique low- tech mature et bien oxygéné peuvent contenir sans risque une densité de 20kg/ m3 de poissons.

4.2. Performance du système

4.2.1. Qualité de l'eau

Au cours de l'essai, les niveaux des différents paramètres de qualité de l'eau sont restés dans les limites acceptables dans tous les systèmes. Cependant, le système de densité de 10 tilapias offre une plus bonne qualité de l'eau comparée à celle des autres traitements (Tableau 10 en annexe). Ce résultat est meilleur que celui observé par Simeonidou et al 2012 en offrant une meilleure qualité de l'eau en ce qui concerne l'ammoniaque, le nitrite (NO2) et le nitrate (NO3). Ils avaient utilisé des densités similaires (10, 25 et 40 tilapias) lors de leur expérimentation. L'évolution des concentrations de NH4, NO2 et NO3 au cours de notre expérimentation a permis de mettre en évidence l'activité des bactéries car pendant la phase de cyclage les concentrations NH4 et le NO2 contenues initialement dans l'eau ont totalement baissé. De plus les nitrates ne sont apparus dans le système qu'après introduction des poissons à partir de la

troisième semaine. Mais il faut noter que la concentration de NO₃ dans tous les systèmes est restée en dessous des standards fixés par Somerville et al., 2014.

La concentration en oxygène dissout (OD), est restée supérieure à 10mg/l pour tous les systèmes pendant toute la période de l'essai. Cette concentration en OD est largement supérieure à celle recommandée par Timmons & Ebeling, 2010 ; Somerville et al., 2014. Cela serait sans doute dû au surdimensionnement de la pompe à air (400l/h). Li et al., 2019 avaient obtenu un OD compris 7,19 à 9,40 mg/l lors de l'évaluation de la qualité de l'eau de leur système aquaponique utilisant la culture hydroponique et le traitement du biofilm immobilisé. Ils avaient conclu que cet OD était plus que suffisant et favorable pour les poissons et la plupart des microorganismes aérobies. Ce résultat nous permet à l'avenir de choisir sans risques pour les organismes vivants du système, une pompe à air moins performante pour une efficience économique et énergétique accrue. On pourrait également la maintenir et tout en augmentant la densité des poissons. La variation de la température notée au cours de la journée est intrinsèquement liée aux conditions du climatique de notre milieu d'essai. Ces hausses de température surviennent dans l'après-midi et réchauffent l'eau du système. Ce phénomène pourrait influencer le bon développement des organismes au sein du système car d'après Somerville et al., 2014, les systèmes sont plus productifs si, chaque jour, de jour en nuit, les fluctuations de température sont minimes. Par conséquent, ils suggèrent que la surface de l'eau elle-même, dans tous les aquariums, unités hydroponiques et biofiltres, soit protégée du soleil par des structures d'ombrage. De même, l'unité peut être protégée thermiquement par une isolation contre les températures nocturnes fraîches.

L'électroconductivité obtenue au niveau des différents traitements reste faible comparée au standard requis en hydroponie (Resh, 2013) et en aquaponie (Delaide et al., 2017 ; Stalport, 2018). Cela est en effet dû au fait que le système n'a pas encore eu le temps d'accumuler les nutriments (Nicoletto et al., 2018 ; Maucieri et al., 2018). Il faut noter que les changement d'eau sont aussi responsables de la lente augmentation de l'EC des différents systèmes.

4.2.2. Consommation en eau et en énergies

Les systèmes avec la densité de 10 tilapias ont consommé moins d'eau que les deux autres systèmes (204,62 L ± 34,93 ; 297,875 L ± 55,02 et 367,625 L ± 67,06 d'eau ont respectivement été utilisé par les traitements DP 10, DP20 et DP40). Cela est dû principalement au fait que la DP10 a eu moins de changement d'eau que les autres traitements. Cela se justifie bien par le fait que la densité des poissons influence la qualité de l'eau. Ainsi donc, il faut plus d'eau pour maintenir une bonne qualité de l'eau (Timmons & Ebeling, 2010). Pour produire 1 Kg de

poissons dans le système, il faut 738,72 L ; 809,66 L et 482,64 L pour respectivement les densités 10, 20 et 40 tilapias. Pour 1Kg d'aliments apporté il faut 324.66 L ; 266.33L et 145 L d'eau respectivement pour DP10 ; DP20 et DP40. Ces résultats peuvent être améliorés avec une bonne maintenance et la maturation du système. Pour la production de cultures, les systèmes doivent être construits et utilisés de manière à minimiser les pertes en eau; ils doivent également optimiser le ratio plantes / poissons pour optimiser l'efficacité de la réutilisation de l'eau et assurer un recyclage maximal des éléments nutritifs.

4.3.Effet de la densité des poissons sur la production

4.3.1. Production des poissons

Dans les différents systèmes, les tilapias ont montré une croissance évidente durant les 42 jours de l'expérimentation. La densité de 10 tilapias a enregistré le gain le plus élevé en poids ($27,7 \pm 4$) et en taille ($4,175 \pm 1,41$). Ce résultat corrobore les travaux de Chikorela, Chirwa, & Mzengereza, 2019 qui ont conclu que de faibles densités favorisent les prises d'aliments et par conséquent de poids chez les poissons. Par contre les tilapias à la densité 20 ont grandi en taille sans prendre considérablement de poids. Ce qui place ce traitement en fin de classement par rapport au poids des tilapias de densités 10 et 40. Il faut bien noter que les gains de poids obtenus pour les différents traitements sont supérieurs à ceux obtenus par Elegbe et al., 2016 lors des essais sur la co-culture *Clarias gariepinus* - *Oreochromis niloticus* dans le cadre de l'amélioration des performances zootechniques et économiques des poissons élevés dans les « whedos » du delta de l'Ouémé au Bénin »

La densité des tilapias n'a pas eu d'incidence sur le taux de conversion alimentaire qui est resté cependant élevée dans pour les différentes densités de tilapias. Cette valeur élevée est sûrement due à la température trop élevée de l'eau dans les bacs à poissons en soirée. D'après Pandit & Nakamura, 1970 les performances de croissance sont réduites à des températures supérieures à 32°C à cause de la faible consommation de nourritures et au taux élevé d'évacuation gastrique. Elliott, 1973 avait observé une corrélation positive entre la température de l'eau et le taux d'évacuation gastrique chez les poissons. Il conclut qu'une température plus élevée accélère le processus de digestion des aliments dans le tractus intestinal, réduisant ainsi la digestibilité et l'assimilation des nutriments. Autrement dit, une hausse de la température réduit l'efficacité des processus physiologiques associés à la digestion et à la rétention d'azote et par conséquent à la prise rapide de poids.

Le taux de survie de 100, 95 et 93,5% respectivement pour DP10, DP20 et DP40 est supérieur à celui obtenu par Elegbe et al., 2016. Ces résultats sont également satisfaisants quand on les comparant à ceux recommander par El-Sayed, 2006.

4.3.2. Production des plantes

Les deux cultures de notre expérimentation (Laitue et amarante) ont été influencées par les densités de poissons du système au cours de leur croissance. A la fin de l'expérimentation la densité de 10 tilapias a permis de produire plus d'amarante tout en favorisant la prise de poids des tilapias. Par contre pour les plants de laitue le record de croissance est détenu par la DP40. Les résultats obtenus pour la culture de l'amarante avec la DP10 sont expliqués par Bitsánszky et al., 2016. Ils avaient aussi constaté que les concentrations de nutriments fournies par les poissons dans le système aquaponique sont significativement plus faibles pour la plupart des nutriments, par rapport aux systèmes hydroponiques. Cependant, les plantes prospéraient dans des solutions contenant moins de nutriments que les solutions hydroponiques « standard ». Ils ajoutent que cela est particulièrement vrai pour les légumes à feuilles vertes qui ont rarement besoin de suppléments nutritionnels supplémentaires. Une autre différence observée est la coloration des feuilles. Elles sont plus foncées au niveau des plants de la densité de 40 tilapias que pour les plants de la densité 10. Ceci confirme le fait que l'eau de la DP40 est plus riche. Cela se manifeste également par son électroconductivité moyenne plus élevée ($481,51 \pm 80,84$) que les autres traitements. De plus, de nombreux facteurs influencent l'aptitude des plantes à absorber les nutriments présents dans la zone racinaire des plantes. Au nombre de ces facteurs, on peut citer la disponibilité de tous les nutriments essentiels, leur présence dans des proportions appropriées et des conditions extérieures favorables, comme le pH, la température, l'O₂ et le CO₂ (Love et al., 2015; Delaide et al., 2017). La loi de Liebig sur la disponibilité minimale de nutriments stipule que le nutriment le moins disponible détermine le taux de croissance maximal. Par exemple, Monsees et al 2017 ont montré une absorption accrue de NO₃⁻ lorsque la source de N de la solution nutritive contenait entre 5% et 25% de NH₄⁺.

Les rendements obtenus au niveau des différentes cultures n'ont pas montré une hausse de performance supplémentaire par rapport aux résultats de performance obtenus en terre pleine. Selon Adegbola et al., 2017 le rendement de l'amarante au Bénin est compris entre 700 g/m² et 1000 g/m². Seul les systèmes ayant une densité de poissons de 10 tilapias ont permis d'avoir un rendement situé dans cette marge avec un rendement moyen de 955g/m². Selon les mêmes auteurs, le rendement de la laitue au Bénin est compris entre 500 g/m² et 1500 g/m². Ce quota a été atteint par les systèmes de densité 20 et 40 tilapias où le rendement moyen est de 569,92

$\pm 145,08 \text{ g/m}^2$ et $624,97 \pm 163,41 \text{ g/m}^2$ respectivement pour ces derniers. Une fois encore les performances réalisées par les unités aquaponiques installées au cours de cette première expérimentation s'annoncent encourageants et suscitent de l'intérêt.

CONCLUSION

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 au Bénin avec du matériel disponible localement. Sa construction et sa maintenance n'exige pas de grande compétence 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 pays en développement et au Bénin 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. Etant donné que tous les systèmes ont une qualité relativement acceptable de l'eau, nous recommandons alors la densité de 40 tilapias car ayant produit plus de biomasse de poissons et de légumes en un temps records. 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'essais 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.

PERSPECTIVES

A travers la présente étude, nous avons entamé une exploration des possibilités de l'aquaponie au Bénin. 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 :

1. Sur la performance du système

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 poissons

Réaliser les essais avec le *Clarias gariepinus* qui est plus résistant et offre une bonne performance dans les conditions locales de production piscicole au Bénin

2. Renforcer l'efficacité énergétique

Evaluer les performances de notre système en incluant des timers 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)

3. Tabler sur les ressources locales

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

4. Pour les systèmes commerciaux

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

BIBLIOGRAPHIE

- 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>
- Adegbola, P. Y., Adjovi Ahoyo, N. R., Mensah, S. E. P., Houedjofonon, E. M., Dossou, R. A., Noukpozounkou, D., & Adeguelou, R. K. (2017). Recueil des Technologies Agricoles prometteuses développées par le Système National de Recherche Agricole (SNRA) de 1996 à 2015. 288p
- Afoup Sarl. (2018). Comment élever des poissons chez soi. <https://afoup.net/comment-elever-des-poissons-chez-soi/>. Consulté le 10 Août 2019
- Ahossin, F. (2016). Culture hors sol au Bénin. <https://www.facebook.com/pg/Lagriculture-Hors-Sol-Au-Bénin-113032602375961/posts/>. Consulté le 15 Août 2019
- Alderman, S. (2015). The practicality and sustainability of aquaponic agriculture versus traditional agriculture with emphasis on application in the middle. *Evolution*, (May), 1–14.
- Aquaponie.fr. (2019). Le filtre à tourbillons. <http://aquaponique.fr/filtres/filtre-tourbillons/>. Consulté le 10 Août 2019,
- Aquaportal. Filtre à sable. Extrait de <https://www.aquaportal.com/definition-6310-filtre-a-sable.html> Consulté le 05 Août 2019
- Aubry, C. (2013). L'agriculture urbaine, contributrice des stratégies alimentaires des mégapoles, 12p.
- Bah, A. A., & Laleye, A. P. (2019). Comparaison des performances de croissances des alevins monosexes issus des populations de *Oreochromis niloticus* (Linnaeus, 1758) collectées dans les Bassins du Mono, Niger, Ouémé et la ferme piscicole Yohane Esteve au Bénin. 46p.
- Barrut, B., Blancheton, J. P., Champagne, J. Y., & Grasmick, A. (2012). Water delivery capacity of a vacuum airlift - Application to water recycling in aquaculture systems. *Aquacultural Engineering*, 48, 31–39. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2011.12.010>
- Bittsánszky, A., Uzinger, N., Gyulai, G., Mathis, A., Junge, R., Villarroel, M., Kőmíves, T. (2016). Nutrient supply of plants in aquaponic systems. *Ecocycles*, 2(2), 17–20. <https://doi.org/10.19040/ecocycles.v2i2.57>

- Bosma, R. H., Lacambra, L., Landstra, Y., Perini, C., Poulie, J., Schwaner, M. J., & Yin, Y. (2017). The financial feasibility of producing fish and vegetables through aquaponics. *Aquacultural Engineering*, 78(April), 146–154. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2017.07.002>
- Britz, P. J., & Hecht, T. (1987). Temperature preferences and optimum temperature for growth of African sharptooth catfish (*Clarias gariepinus*) larvae and postlarvae. *Aquaculture*, 63(1–4), 205–214. [https://doi.org/10.1016/0044-8486\(87\)90072-X](https://doi.org/10.1016/0044-8486(87)90072-X)
- Brooke, N. (2018). Flood and drain aquaponics: any Good? Retrieved August 15, 2019, from <https://www.howtoaquaponic.com/designs/flood-and-drain-aquaponics/>
- Callalou, Laf Sag, Lalshank, T. (2015). Growing Amaranthus, 2.
- Castonguay, M.-J., & Berge, J.-M. (2013). Les toits urbains, un gisement vert à exploiter, 2(SGEM2016 Conference Proceedings, ISBN 978-619-7105-16-2 / ISSN 1314-2704), 1–39.
- Chikorela, G., Chirwa, E. R., & Mzengereza, K. (2019). Optimal Stocking Density of Tilapia rendalli (Boulenger, 1896) for Increased Growth in a Periphyton Based Aquaculture System. *Journal of Fisheries and Aquatic Science*, 14(1), 33–38. <https://doi.org/10.3923/jfas.2019.33.38>
- Coco sol. (2014). L’Agriculture Hors Sol. 64 p
- Connolly, K. (2010). Optimization of a Backyard Aquaponic Food Production System. 74 p
- Courard, L. (2005). Matériaux de construction. Université de Liège. 327 p.
- Dabbaudie, L. (2017). Formations à distance: Aquaculture : Perspectives et Solutions. 3 p
- 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(November 2016), 130–139. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2017.06.002>
- Delaide, B., & Jijaki, M. H. (2017). Etude des éléments minéraux disponibles en aquaponie, de leur impact sur la productivité des laitues et de la potentielle amélioration de leur disponibilité. Université de liège – Gembloux agro-bio tech. 101 p
- DeLong, D. P., Losordo, T. M., & Rakocy, J. E. (2009). Tank Culture of Tilapia. Southern Regional Aquaculture Center, 282(282), 523–529. <https://doi.org/10.1186/bcr1514>
- Department of Agriculture Forestry and Fisheries (South Africa). (2010). Amaranthus Production Guidline. 24 p

Direction de la Pêche. (2013). Programme de Développement de la Pêche et de l'Aquaculture (PDPA). Cadre Programmatique du Plan Stratégique de Relance du Secteur Agricole. Cotonou. 100p

Dos Santos, M. J. P. L. (2016). Smart cities and urban areas—Aquaponics as innovative urban agriculture. *Urban Forestry and Urban Greening*, 20, 402–406. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2016.10.004>

Eid, A. R., & Hoballah, E. M. A. (2014). Impact of Irrigation Systems, Fertigation Rates and Using Drainage Water of Fish Farms in Irrigation of Potato under Arid Regions Conditions. *International Journal of Scientific Research in Agricultural Sciences*, 1(5), 67–79. <https://doi.org/10.12983/ijsras-2014-p0067-0079>

El-Sayed, A.-F. M. (2006). Tilapia Culture. Oceanography Department, Faculty of Science, Alexandria University, Alexandria, Egypt. Cabi Publishing 293 p

Elegbe, H. A., Imorou Toko, I., Agbohessi, P., Ble, C., Banag, A., Chikou, A., ... Laleye, P. (2016). 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. <https://doi.org/10.4314/ijbcs.v9i4.19>

Elliott, J. M. (1973). The food of brown and rainbow trout (*Salmo trutta* and *S. gairdneri*) in relation to the abundance of drifting invertebrates in a mountain stream. *Oecologia*, 12(4), 329–347. <https://doi.org/10.1007/BF00345047>

FAO. (2003). Intégration agriculture-aquaculture: Princioes de base et exemples. In Document technique sur les pêches p. 162.

FAO. (2014). Vegetable production guidelines for 12 common aquaponic plants. *Aquaponics*, 169–181.

Filtre à sable. <http://www.lightweight-uphill.eu/sable-filtration-piscine-2687/>. Consulté le 10 Août 2019.

Foucard P., Tocqueville A., Gaumé M., Labbé L., Baroiller J.F., Lejolivet C., Lepage S., D. B. (2015). *Innovations Agronomiques* 45 (2015), 125-139, 45, 125–139.

Foucard, P., Tocqueville, A., Gaumé, M., Labbé, L., Baroiller, J. F., Lejolivet, C., Darfeuille, B. (2015). Tour d'horizon du potentiel de développement de l'aquaponie en France :

présentation et regard critique sur cette voie de développement alternative pour les productions piscicoles et horticoles. Innovations Agronomiques, 45, 125–139.

Gangbe, L., Agadjihouede, H., Chikou, A., Senouvo, P., Mensah, G. A., & Laleye, P. (2016). Biologie et perspectives d'élevage de la crevette géante d'eau douce *Macrobrachium vollenhovenii* (Herklotz, 1857). International Journal of Biological and Chemical Sciences, 10(2), 573. <https://doi.org/10.4314/ijbcs.v10i2.11>

Gélinas, L., & Olivier, M. (2013). Plastiques Biosourcés : Étude De Leur Performance Environnementale Comparativement Aux Plastiques Pétrochimiques. Université de sherbrooke.

Harlaut, P. (2016). Tout savoir sur l'aquaponie.

Hounsa, P. (2019). Évaluation de la performance d'un système aquaponique simple pour la production de tilapia et de légumes (Laitue et Amarante) au Bénin. Université de Liège Gembloux Agro bio-tech.

Hughey, T. (2005). Aquaponics for Developing Countries, 16–18.

Imorou Toko, I., Fiogbé, E. D., & Kestemont, P. (2008). Determination of appropriate age and stocking density of vundu larvae, *Heterobranchus longifilis* (Valenciennes 1840), at the weaning time. Aquaculture Research, 39(1), 24–32. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2109.2007.01857.x>

INMED Partnerships for Children. (2017). AQUAPONICS HANDBOOK: Guidance Manual for Aquaponic System Construction, Operation and Management.

Kikaboni Commercial Aquaponics Farm - Kenya - Developonics. (2018). Retrieved July 11, 2019, from <http://www.developonics.com/2018/06/commercial-aquaponics-kenya/>

Kissoon, nadia russell, Vissenberg, T., Gouzille, D., Cachot, J., & Baudrimont, M. (2017). Sculptures aquaponiques. Livret Pédagogique, p. 13.

Kozai, T., Niu, G., & Takagaki, M. (2016). Plant Factory An Indoor Vertical Farming System for Efficient Quality Food Production. Climate Change 2013 - The Physical Science Basis. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>

Kpenavoun, S. (2018). Recencement des pisciculteurs du Bénin, (July 2015), 42. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.14440.11524>

Kyaw, T. Y., & Ng, A. K. (2017). Smart Aquaponics System for Urban Farming. *Energy Procedia*, 143, 342–347. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.12.694>

Lazard, J. (2009). La pisciculture des tilapias, 18, 174–182.

Li, C., Zhang, B., Luo, P., Shi, H., Li, L., Gao, Y., ... Wu, W. (2019). Performance of a pilot-scale aquaponics system using hydroponics and immobilized bio film treatment for water quality control. *Journal of Cleaner Production*, 208, 274–284. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.10.170>

Lisan, B. (2018). La philosophie du centre de formation agro-écologique Songhaï (p. 108).

Love, D. C., Fry, J. P., Genello, L., Hill, E. S., Frederick, J. A., Li, X., & Semmens, K. (2014). An International Survey of Aquaponics Practitioners, 9(7), 1–10. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0102662>

Love, D. C., Uhl, M. S., & Genello, L. (2015). Energy and water use of a small-scale raft aquaponics system in Baltimore, Maryland, United States. *Aquacultural Engineering*, 68, 19–27. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2015.07.003>

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>

MAEP. (2017). Projet de vulgarisation de l’aquaculture continentale en république du Bénin phase 2.

Mallya, Y. J. (2007). The effects of dissolved oxygen on fish growth in aquaculture, 30.

Maty Diao Ba. (2003). Situation et contraintes des systèmes urbains et périurbains de production horticole et animale dans la région de Dakar, 39–49.

Maucieri, C., Forchino, A. A., Nicoletto, C., Junge, R., Pastres, R., Sambo, P., & Borin, M. (2018). Life cycle assessment of a micro aquaponic system for educational purposes built using recovered material. *Journal of Cleaner Production*, 172, 3119–3127. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.11.097>

McBratney, A., Whelan, B., & Ancev, T. (2014). Future Directions of Precision Agriculture. *Research in Agricultural Engineering*, 60(July 2004), S44–S51. <https://doi.org/10.1094/CM-2008-0925-01-RS>

Mchunu, N., Lagerwall, G., & Senzanje, A. (2018). Aquaponics in South Africa: Results of a national survey. *Aquaculture Reports*, 12(August), 12–19. <https://doi.org/10.1016/j.aqrep.2018.08.001>

Mensah, A. C. G., Simon, S., Komlan, F. A., Adjaïto, L., Martin, T., & Ngouajio, M. (2016). Intensification de la culture de tomate sous abri couvert de filet anti-insectes en région chaude et humide du Sud-Bénin, *Revue semestrielle de la recherche du Centre National de la Recherche Scientifique et Technologique (CNRST)*. Série Science et technique, Sciences naturelles et agronomie. 22 p

Meybeck, A., Laval, E., Lévesque, R., & Parent, G. (2017). Sécurité alimentaire et nutrition à l'heure des changements climatiques Sécurité alimentaire et nutrition à l'heure des changements climatiques. In actes du colloque international organisé par le gouvernement du Québec en collaboration avec la fao (p. 134). Québec.

Michael, J. J., S, I., & Goic, R. (2015). Flat plate solar photovoltaic-thermal (PV/T) systems: A reference guide. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 51, 62–88. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.06.022>

Monsees, H., Klatt, L., Kloas, W., & Wuertz, S. (2017). Chronic exposure to nitrate significantly reduces growth and affects the health status of juvenile Nile tilapia (*Oreochromis niloticus* L.) in recirculating aquaculture systems. *Aquaculture Research*, 48(7), 3482–3492. <https://doi.org/10.1111/are.13174>

Montchowui, E., Lalèyè, P., Poncin, P., & Philippart, J. C. (2010). Reproductive strategy of *labeo senegalensis* valenciennes 1842 (Teleostei: Cyprinidae) in the Ouémé basin, Benin. *African Journal of Aquatic Science*, 35(1), 81–85. <https://doi.org/10.2989/16085914.2010.466586>

Mullins, C., Nerrie, B., & Sink, T. D. (2010). Principles of Small-Scale Aquaponics, 1–8.

Nelson, B. R. L. (2008). Aquaponic Equipment: the Bio Filter, 22–23.

Ngo Thuy Diem, T., Konnerup, D., & Brix, H. (2017). Effects of recirculation rates on water quality and *Oreochromis niloticus* growth in aquaponic systems. *Aquacultural Engineering*, 78(July 2016), 95–104. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2017.05.002>

Nicoletto, C., Maucieri, C., Mathis, A., Schmautz, Z., Komives, T., Sambo, P., & Junge, R. (2018). Extension of Aquaponic Water Use for NFT Baby-Leaf Production: Mizuna and Rocket Salad. *Agronomy*, 8(5), 75. <https://doi.org/10.3390/agronomy8050075>

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>

Oca, J., & Masalo, I. (2013). Flow pattern in aquaculture circular tanks: Influence of flow rate, water depth, and water inlet & outlet features. *Aquacultural Engineering*, 52, 65–72. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2012.09.002>

Okemwa, E. (2015). Challenges and Opportunities to Sustainability in Aquaponic and Hydroponics Systems. *International Journal of Scientific Research and Innovative Technology*, 2(11), 2313–3759.

Pade, J. S. (2008). Aquaponic Equipment, 24–25.

Pandit, N. P., & Nakamura, M. (1970). Effect of High Temperature on Survival, Growth and Feed Conversion Ratio of Nile Tilapia, *Oreochromis niloticus*. *Our Nature*, 8(1), 219–224. <https://doi.org/10.3126/on.v8i1.4331>

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.

Pierre, F., & El Ayoubi, H. (2015). Industrie des pêches et de l'aquaculture au Bénin, (September), 140. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.2410.7689>

Pivot, D., Gilli, C., & Carlen, C. (2005). Données de base pour la fumure des cultures de légumes, de fleurs et de fraises sur substrat Edition 2005. *Revue Suisse Viticulture, Arboriculture, Horticulture*, 37(2), 2–8.

Poisson d'or. (2019). AquaForte filtres à tambour professionnels ATF-500. Retrieved from <https://www.poisson-or.be/fr/filtres-a-tambour-bande-professionnels/106183-aquaforte-filtres-a-tambour-professionnels-atf-500-modele-a-inserer.html>

Rakocy, J. (2007). Use a feeding rate ratio for design calculations, (3), 14–17.

Rakocy, J. (2010). Ten Guidelines for Aquaponic Systems, 4.

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. (2013). Hydroponic food production: A Definitive Guidebook for the Advanced Home Gardener.

Scott, J. (2002). Evolution of Aquaponics. *Aquaponics Journal*, VI (1).

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>

Shafahi, M., & Woolston, D. (2014). Aquaponics: a sustainable food production system, 1–4.

Simeonidou, M., Paschos, I., Gouva, E., Kolygas, M., & Perdikaris, C. (2012a). Performance of a small-scale modular aquaponic system. *AACL Bioflux*, 5(4), 182–188.

Simeonidou, M., Paschos, I., Gouva, E., Kolygas, M., & Perdikaris, C. (2012b). Performance of a small-scale modular aquaponic system. *AACL Bioflux*.

Sohou, Z., Houedjissin, R. C., & Ahoyo, N. R. A. (2009). La pisciculture au Bénin : de la tradition à la modernisation. *Bulletin de La Recherche Agronomique Du Bénin*, 66(12), 48–59. Retrieved from

http://193.191.134.57/benin/images/Benin_NODC/Documents/Pisciculture_Benin_tradition_modernisation.pdf

Somerville, C., Cohen, M., Pantanella, E., Stankus, A., & Lovatelli, A. (2014). Small-scale aquaponic food production. *Integrated fish and farming*. Rome: FAO Fisheries and Aquaculture Technical Paper No.589.

Stalport, B. (2018). Atelier de Bossimé Guide aquaponique. 10p

Thorarinsdottir, R. I., Kledal, P. R., Skar, L. G., Sustaeta, F., Ragnarsdottir, K. V., Mankasingh, U., R. Charlie Shultz. (2015). Aquaponics Guidelines.

Timmons, M. B., & Ebeling, J. M. (2010). Recirculating Aquaculture. (Ca Yuga Aqua Ventures, Ed.), *Aquaculture*. Sunset Drive Ithaca, Ny 1485: NRAC Publication No. 401-2010.

Tokuyama, T., Mine, A., Kamiyama, K., Yabe, R., Satoh, K., Matsumoto, H., Itonaga, K. (2004). Nitrosomonas communis strain YNSRA, an ammonia-oxidizing bacterium, isolated

from the reed rhizoplane in an aquaponics plant. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 98(4), 309–312. <https://doi.org/10.1111/j.1444-0938.1954.tb01317.x>

Tsadik, G., & Kutty, M. N. (1987). Influence of Ambient Oxygen on Feeding and Growth of the Tilapia, *Oreochromis niloticus* (Linnaeus), (1975), ARAC/87/WP/10.

United Nations, D. of E. and S. A. (2018). 2018 Revision of World Urbanization Prospects. United Nations Department of Economic and Social Affairs. Revision of World Urbanization Prospects | Multimedia Library - United Nations Department of Economic and Social Affairs. <https://doi.org/10.3181/00379727-134-34916>

Wangead, 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, J. W., & Khanal, S. K. (2017). Nitrogen transformations in aquaponic systems: A review. *Aquacultural Engineering*, 76, 9–19. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2017.01.004>

Wright, S. D. (2018). Aquaponic System Design and Modeling Ammonia Production : An Overview of Aquaponics. : https://scholar.rose-hulman.edu/mechanical_engineering_grad_theses/58p

Yousef S. Al-Hafedh, Alam, A., & Beltagi, M. S. (2008). Food Production and Water Conservation in a Recirculating Aquaponic System in Saudi Arabia at Different Ratios of Fish Feed to Plants - Al-Hafedh - 2008 - *Journal of the World Aquaculture Society* - Wiley Online Library. *Journal of the World Aquaculture Society*, 39(4), 510–520. Retrieved from <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1749-7345.2008.00181.x/abstract>

ANNEXES

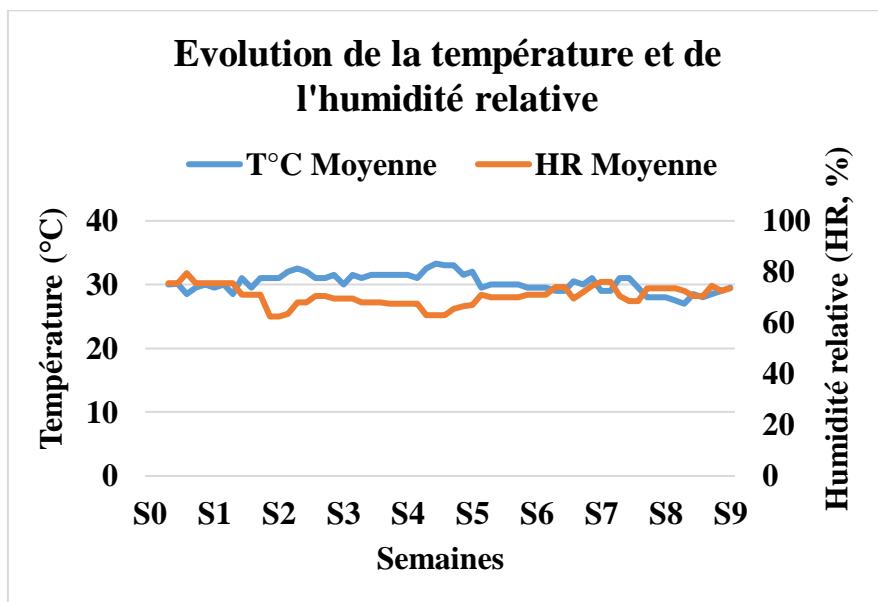


Figure 19 : Evolution de la température Moyenne et de l'humidité relative Moyenne de l'abri (Hounsa, 2019)

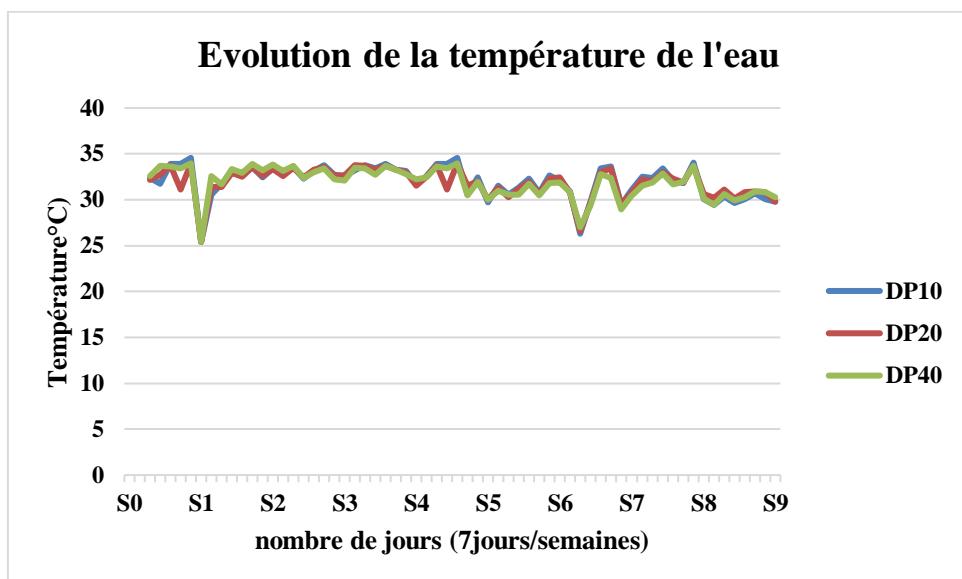


Figure 20 : Evolution de la température de l'eau
(Hounsa, 2019)

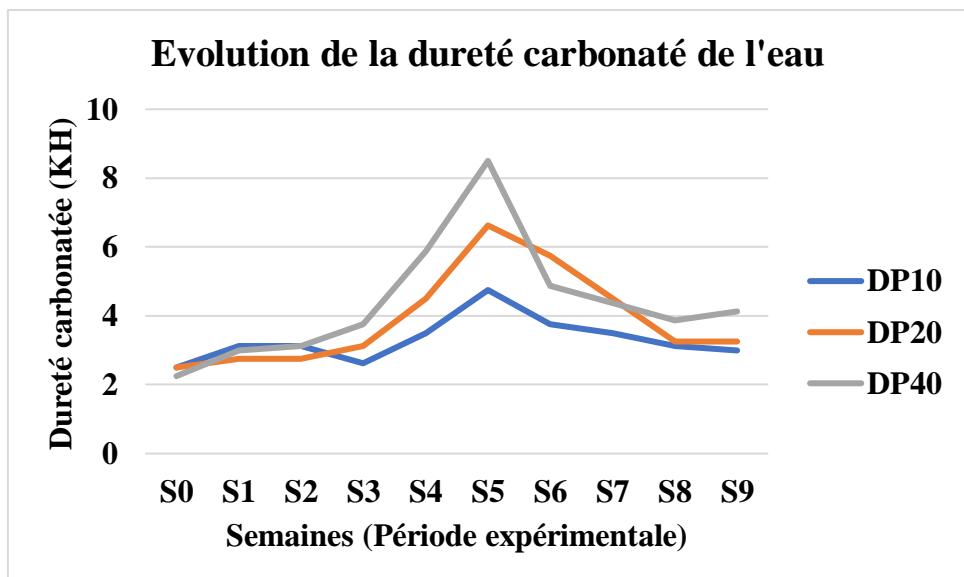


Figure 21 : Evolution de la dureté carbonatée
(Hounsa, 2019)

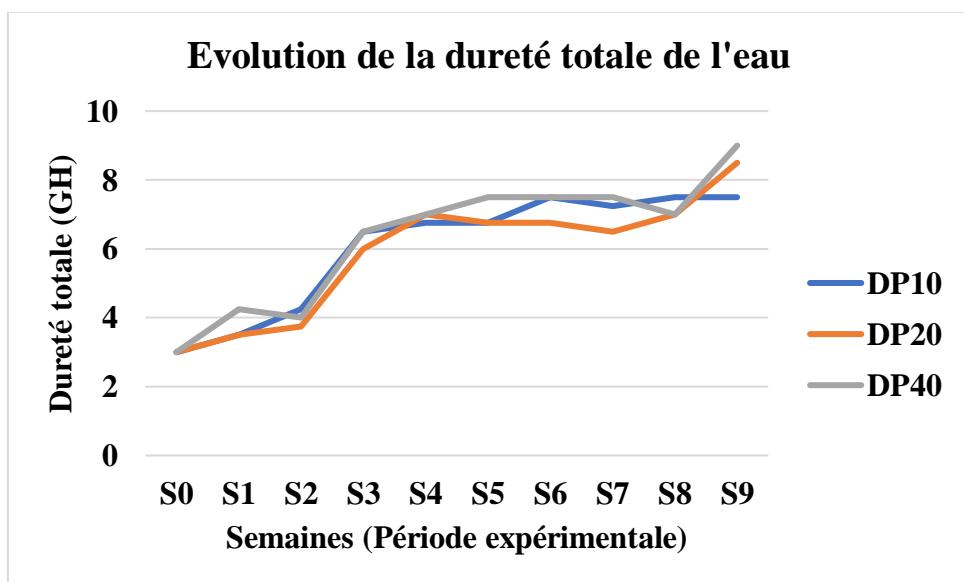


Figure 22 : Evolution de la dureté totale de l'eau
(Hounsa, 2019)

Tableau 10 : Récapitulatif de la qualité de l'eau

Paramètres de l'eau	Densités des tilapias			Valeurs de référence idéales	Sources
	DP10	DP20	DP40		
TEMP (°C)	31,98 ± 1,06	31,95 ± 0,95	31,83 ± 1,18	28 à 30°C	(Somerville et al., 2014)
EC (µs/cm)	400,11 ± 33,49	460 ± 53,36	481,51 ± 80,84	300 à 1500 µs	(Resh, 2013)

PH	$7,55 \pm 0,18$	$7,56 \pm 0,125$	$7,58 \pm 0,14$	6,5 à 7,5	(Somerville et al., 2014)
KH (°d)	$3,42 \pm 0,65$	$4,22 \pm 1,39$	$5,03 \pm 1,56$	7 à 14 °d	(Somerville et al., 2014)
GH (°d)	$6,75 \pm 1,08$	$6,53 \pm 1,33$	$7,44 \pm 0,73$	4 à 8 °d	(Somerville et al., 2014)
NO2 (mg/L)	$0,4 \pm 0,34$	$0,3 \pm 0,2$	$0,22 \pm 0,22$	0 à 0,25 mg/l	(Somerville et al., 2014)
NO3 (mg/L)	$31,34 \pm 20,94$	$21,36 \pm 21,17$	$21,3 \pm 19,46$	5–150mg/l	(Somerville et al., 2014)
NH4 (mg/L)	$0,05 \pm 0,005$	$0,12 \pm 0,08$	$0,11 \pm 0,06$	0	(Somerville et al., 2014)
O2 (mg/L)	10	10	10	> 5 mg/l	(Somerville et al., 2014)

Tableau 11 : Charges fixes d'une unité aquaponique

Composants	coûts	durée	Amortissement				
			van 1	van 2	van3	total	reste
Lit de culture	30000	5	5000	5000	5000	15000	10000
support	5000	10	500	500	500	1500	3500
Tank poisson	20000	10	1500	1500	1500	4500	10500
swirl	12000	10	600	600	600	1800	4200
Sump	4000	3	1166,67	1166,67	1166,67	3500	0
Pompe à eau	16500	2	8250	8250	0	0	0
Pompe à air	24000	2	12000	12000	0	0	0
Plomberie	5000	3	6666,67	6666,67	6666,67	0	0
TOTAL	116500		36850	36850	16600	26300	28200
TOTAL en Euro	179,23		56,69	56,69	25,54	40,46	43,38

(Hounsa, 2019)

Tableau 12 : Charges variables par traitement

ELECTRICITE								
Traitemen ts	cons o jour	conso mois (KHH)	Prix KWH	TVA+ En	coût mensuel	durée (mois)	coût annuel	Coût en euros
DP10	0,852	25,56	109	595	3381,04	12	40572,48	62,42
DP20	0,852	25,56	109	595	3381,04	12	40572,48	62,42
DP40	0,852	25,56	109	595	3381,04	12	40572,48	62,42

EAU									
Traitements	Cons o jour	conso mois (L)	Prix m3	TVA	LC	coût mensuel	durée (mois)	coût annuel	Coût en euros
DP10	4,87	146,1	198	5,207004	402	436,13	12	5233,62	8,05
DP20	7,09	212,7	198	7,580628	402	451,69	12	5420,34	8,34
DP40	8,75	262,5	198	9,3555	402	463,33	12	5559,96	8,55

ALIMENTATION DES POISSONS							
Traitements	Quantité jour (kg)	Quantité mois (kg)	Prix unit(kg)	coût mensuel	durée (mois)	coût annuel	Coût en euros
DP10	0,015	0,45	650	292,5	12	3510	5,4
DP20	0,03	0,9	650	585	12	7020	10,8
DP40	0,06	1,8	650	1170	12	14040	21,6
ACHAT DES ALEVINS							
Traitements	quantité		Prix unit(kg)	coût annuel		Coût en euros	
DP10	20		50	1000		1,54	
DP20	40		50	2000		3,07	
DP40	80		50	4000		6,15	

Tableau 13 : Charges variable totales par an et par traitement

Traitements	Charges annuelles totales	Coût en euros
DP10	87166,09765	134,1
DP20	89862,82274	138,25
DP40	101022,446	155,42

Tableau 14 : Scénario de revenue de production par traitement

PRODUCTION								
		Valeur min (FCFA)	Valeur max (FCFA)	Revenu min (FCFA)	Revenue max (FCFA)	N cycle	Revenu Annuel Laitue min (FCFA)	Revenu Annuel Laitue max (FCFA)
DP10	30	25	100	750	3000	12	9000	36000
DP20	30	25	100	750	3000	12	9000	36000
DP40	30	25	100	750	3000	12	9000	36000
Biomasse tilapias								
	Poids moy min	Poids moy max	Poids total min	Poids total max	Prix (kg)	N cycle	Revenu Annuel Poissons min (FCFA)	Revenu Annuel Poissons max (FCFA)
DP10	0,3	0,6	3	6	2500	2	15000	30000
DP20	0,3	0,6	6	12	2500	2	30000	60000
DP40	0,3	0,6	12	24	2500	2	60000	120000

Tableau 15 : Scénario de revenu pour une année de production par unité aquaponique

Revenu Scénario Production		
RAP min	RAL min	RAL max
DP10	24000	51000
DP20	39000	66000
DP40	69000	96000
RAP max	RAL min	RAL max
DP10	39000	66000
DP20	69000	96000
DP40	129000	156000

Tableau 16 : Scénario de marges brute pour une année de production par traitement

Traitements	Scénarii	FCFA	Euro
DP10	scénario 1	-63166,0977	-97,1786118
	scénario 2	-36166,0977	-55,6401502
	scénario 3	-48166,0977	-74,1016887
	scénario 4	-21166,1	-32,5632271
DP20	scénario 1	-50862,8227	-78,2504965
	scénario 2	-23862,8227	-36,712035
	scénario 3	-20862,8227	-32,0966504
	scénario 4	6137,1773	9,44181118
DP40	scénario 1	-32022,446	-49,2653015
	scénario 2	-5022,446	-7,72684
	scénario 3	27977,554	43,0423908
	scénario 4	54977,554	84,5808523