الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة محمد البشير الإبراهيمي - برج بوعريريج

Université de Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi - Bordj Bou Arreridj

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département d'Electromécanique

MÉMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme** de **MASTER**

En : filière ELECTROMECANIQUE

Spécialité : ENERGIE RENOUVELABLE

Par: - SLAMA ACHEREF - TAMETELT AFLEH

-MEBARKI ISLAM -BOUARIF TAHAR

-BOUAAYA ALAA EDDINE -BELKARFA IHAB

Sujet

ETUDE ET REALISATION D'UN SYSTEME D'UNE SERRE AGRIVOLTAIQUE (AQUAVOLT)

Soutenu publiquement, le 29 / 06 / 2026, devant le jury composé de :

DAWDI SALIM	PR	**Univ-BBA**	Président
IMAKHLEF ANIS	DR	**Univ-BBA**	Examinateur
SAAD SAOUD MERWAN	DR	**Univ-BBA**	Encadrant
ADUI IBTISSEM	DR	**Univ-BBA**	Co-Encadrant

Année Universitaire 2025/2026

Sommaire

1. List des figures
2. List des tableaux
3. List des abréviations
4. Remerciement
5. Dédicace
6. Résume/ملخص / Abstract …… 1
7. Introduction général……..2

Chapitre I : Contexte général et cadre conceptuel

1.1 Introduction……...3
1.1.1 Présentation du projet……3
1.1.2 Importance de l'innovation en agriculture durable……3

1.2 Problématique……4
1.2.1 Rareté de l'eau……4
1.2.2 Coût énergétique élevé…… ……4
1.2.3 Besoin en systèmes agricoles durables……...5

1.3 Objectifs……5
1.3.1 Objectif général……..5
1.3.2 Objectifs spécifiques……..5

1.4 Concepts de base……...5
1.4.1 Aquaponie……..5
1.4.2 Hydroponie……6
1.4.3 Aquaculture……...6
1.4.4 Agrivoltaïque……7

1.5 État de l'art……...8
1.5.1 Projets similaires (international / local)……8
1.5.2 Limites des systèmes existants……8

1.6 Conclusion……...9

Chapitre II : Description et modélisation du système

2 Introduction……..10

2.1 Architecture globale du système……...10
2.1.1 Bassin de poissons (Tilapia)……...12

2.1.2 Système hydroponique……...13
2.1.3 Circuit d'eau……14

2.2 Système de filtration……...14
2.2.1 Filtration mécanique……14
2.2.2 Filtration biologique (cycle de l'azote)……16

2.3 Système photovoltaïque……..17
2.3.1 Principe de fonctionnement
2.3.2 Composants (panneaux, batterie, régulateur, pompe)

2.4 Schéma fonctionnel……21
2.4.1 Description des flux (eau, énergie, nutriments)

2.5 Conclusion……..22

Chapitre III : Dimensionnement, étude technique et prototypage

3 Introduction……23

3.1 Dimensionnement aquaponique……23
3.1.1 Volume du bassin……..23
3.1.2 Densité des poissons……23
3.1.3 Surface de culture……24

3.2 Dimensionnement du système de pompage……25
3.2.1 Débit nécessaire
3.2.2 Hauteur manométrique

3.3 Dimensionnement du système solaire……27
3.3.1 Besoin énergétique……..27
3.3.2 Choix des panneaux photovoltaïques……..28
3.3.3 Capacité des batteries……..29

3.4 Choix technologiques……29
3.4.1 Type de pompe……...29
3.4.2 Type de filtration……30
3.4.3 Choix des capteurs……32
3.4.4 Choix des actionneurs……36

3.5 Prototype……38
3.5.1 Fonctionnement en conditions réelles……38
3.5.2 Optimisation du rendement……39

3.6 Étude économique……..40

3.6.1 Analyse économique……...40
3.6.1.1 Coût d'investissement
3.6.1.2 Coût d'exploitation
3.6.2 Rentabilité……...41
3.6.2.1 Revenus (poissons + plantes)
3.6.2.2 Temps de retour sur investissement
3.6.3 Analyse SWOT……42
3.6.3.1 Forces
3.6.3.2 Faiblesses
3.6.3.3 Opportunités
3.6.3.4 Menaces

3.7 Impact environnemental……..43
3.7.1 Économie d'eau
3.7.2 Réduction des émissions
3.7.3 Agriculture durable

3.8 Conclusion……..44

Chapitre IV Réalisation du prototype AquaVolt.

4 Introduction
4.1 Réalisation de la structure mécanique
4.2 Réalisation du bassin piscicole
4.3 Réalisation du système hydroponique et du circuit hydraulique
4.3.1 Fabrication de l'étagère DWC à trois niveaux
4.3.2 Circuit hydraulique
4.4 Réalisation du système de filtration
4.4.1 Filtration mécanique le filtre à éponge
4.4.2 Filtration biologique le biofiltre à médias céramiques
4.4.3 Vérification de l'efficacité de la filtration
4.5 Réalisation du système photovoltaïque
4.6 Réalisation du coffret électronique et du système de commande
4.6.1 Architecture du coffret
4.6.2 Capteurs et leur intégration
4.6.3 Actionneurs
4.7 Développement logiciel
4.7.1 Environnement de développement et bibliothèques
4.7.2 Architecture du programme principal
4.7.3 Gestion de la sécurité de la batterie
4.7.4 Stratégie de commande des panneaux mobiles
4.8 Assemblage et mise en service du prototype
4.8.1 Ordre d'assemblage
4.8.2 Difficultés d'assemblage
4.8.3 Protocole de mise en service
4.9 Conclusion

5 Conclusion générale
5.1 Synthèse des résultats
6 Apport du projet
6.1 Recommandations

List des figures

Figure 01 — Schéma de principe du cycle aquaponique solaire (à réaliser par l'étudiant). 2
Figure 2 — Comparaison de la consommation d'eau : agriculture conventionnelle vs aquaponie (à réaliser par l'étudiant avec Ai). 3
Figure 3 — Schéma de principe du système aquaponique intégré (à réaliser par l'étudiant). 5
Figure 4 — Schéma du système DWC à 3 niveaux retenu pour AquaVolt (à réaliser par l'étudiant). 5
Figure 5 — Schéma d'un bassin RAS avec système de recirculation et filtration (à réaliser par l'étudiant). 6
Figure 6 — Schéma d'une installation agrivoltaïque couplant panneaux solaires et production agricole (à réaliser par l'étudiant). 6
Figure 2.1 — Bassin en verre fumé noir 60×40×40 cm — prototype AquaVolt avec tilapias 12
Figure 2.2 — Étagère DWC 3 niveaux × 3 plants — laitue en système AquaVolt 13
Figure 2.3 — Filtre mécanique à éponge — assemblage et installation dans le circuit AquaVolt 14
Figure 2.4 — Biofiltre LECA, anneaux céramiques et charbon actif — assemblage AquaVolt 16
Figure 2.5 — Panneaux solaires monocristallins PERC 100 Wc — système AquaVolt 17
Figure 2.6 — Batterie AGM 100 Ah / 12V — stockage énergétique AquaVolt 19
Figure 2.7 — Schéma fonctionnel 3D complet AquaVolt — flux eau, énergie et nutriments 20
Figure 3.1 — Cycle laitue 46 jours — semis à récolte en DWC AquaVolt 24
Figure 3.2 — Pompe à eau centrifuge AC 220V — 5W — système AquaVolt 28
Figure 3.3 — Filtre mécanique à éponge — intégration dans le circuit AquaVolt 29
Figure 3.4 — Biofiltre — billes d'argile LECA, anneaux céramiques et charbon actif — AquaVolt 30
Figure 3.5 — Sonde pH électronique — connexion à l'ESP32 — AquaVolt 31
Figure 3.6 — Capteur de température et d'humidité DHT22 — AquaVolt 32
Figure 3.7 — Capteur de qualité de l'air ENS160 — AquaVolt 32
Figure 3.8 — Capteur d'ensoleillement BH1750 — AquaVolt 33
Figure 3.9 — Capteur de fin de course infrarouge — mécanisme panneaux AquaVolt 34
Figure 3.10 — Microcontrôleur ESP32 — unité de contrôle intelligente AquaVolt 34
Figure 3.11 — Pompe à eau AC 220V – 5W — actionneur principal AquaVolt 35
Figure 3.12 — Pompe à air 220V – 18W — oxygénation du bassin AquaVolt 35
Figure 3.13 — Ventilateur 12V — régulation de la chambre de culture AquaVolt 36
Figure 3.14 — Moteur électrique 12V DC — déplacement automatique des panneaux AquaVolt 36
Figure 3.15 — Module relais — interface de puissance ESP32 / actionneurs AquaVolt 36
Figure 3.16 — Driver moteur — module de contrôle du mécanisme de rotation AquaVolt 37
Figure 3.17 — Vue générale du prototype AquaVolt — système complet opérationnel 38

La Figure 4----- présente le bassin en verre fumé noir installé dans la partie inférieure du châssis, avec les tilapias visibles à travers la paroi.

La Figure 4.1 montre le circuit hydraulique complet, avec les conduites en PVC reliant le bassin, les filtres et les bacs DWC le long de la structure en aluminium.

La Figure 4.2 présente le système de filtration complet, avec le filtre à éponge et le biofiltre assemblés.

La Figure 4.3 montre les deux panneaux solaires installés sur la structure inclinée, avec le mécanisme de déplacement visible.

La Figure 4.4 présente le coffret électronique ouvert, avec les différents modules et le câblage.

La Figure 4.5 présente l'organigramme simplifié du programme principal.

La Figure 4.6 montre le prototype AquaVolt assemblé et en fonctionnement.

List des tableaux

Tableau 01 comparatif des projets de référence 7

Tableau 2 ----Dimensions exactes de la structure AquaVolt 9

Tableau 2.1 — Dimensions et caractéristiques du bassin AquaVolt 10

Tableau 2.2 — Comparaison des matériaux pour le bassin AquaVolt 11

Tableau 2.3 — Comparaison des techniques hydroponiques pour AquaVolt 12

Tableau 2.4 — Comparaison des filtres mécaniques pour AquaVolt 14

Tableau 2.5 Équations biochimiques du cycle de l'azote dans le biofiltre AquaVolt 15

Tableau 2.6 — Médias de biofiltration comparés pour AquaVolt 15

Tableau 2.7 — Comparaison des technologies de panneaux solaires 17

Tableau 2.8 — Comparaison des régulateurs de charge 18

Tableau 2.9 — Comparaison des technologies de batteries 18

Tableau 2.10 — Comparaison des types de pompes à eau 19

Tableau 2.11 — Tableau des flux du système AquaVolt 20

Tableau 3 — Tableau de Volume du bassin 22

Tableau 3.1 — Tableau de Nombre et densité des poissons 23

Tableau 3.2 — Tableau de Surface de culture et production de laitue 23

Tableau 3.3 — Tableau de débit nécessaire 25

Tableau 3.4 — Hauteur manométrique totale (HMT) 26

Tableau 3.5 — Bilan énergétique des équipements AquaVolt 26

Tableau 3.6 — Production photovoltaïque et bilan saisonnier 27

Tableau 3.7 — Capacité des batteries 28

Tableau 3.8 — Des analyses d’eau ont été réalisées au niveau d’ADE 30

Tableau 3.9 — L’amélioration du système 37

Tableau 3.10 — Coût d'investissement 39

Tableau 3.11 — Coût d'exploitation annuel 40

Tableau 3.12 — Revenus (poissons + plantes) 40

Tableau 3.13 — Temps de retour sur investissement 41

Tableau 3.13 — Économie d'eau 42

Tableau 3.14 — Les quatre Objectifs de Développement Durable des Nations Unies 43

Tableau 4 — Concentration en nitrates à trois points du circuit hydraulique

List des Abréviations

ADE ---------- Algérienne Des Eaux
Ai ---------- Artificial Intelligence
CO_2 ----------Carbon Dioxide
DC ----------Direct Current
ESP32 ----------Espressif 32-bit Microcontroller
I^2C ----------Inter-Integrated Circuit
IoT ----------Internet of Things
LCD ----------Liquid Crystal Display
LDR ----------Light Dependent Resistor
LED ----------Light Emitting Diode
mg/L ----------Milligrams per Liter
NFT--------- Nutrient Film Technique
O_2 ----------Oxygen
pH ----------Potential of Hydrogen (Acidity/Alkalinity)
PWM ----------Pulse Width Modulation
PV---------- Photovoltaic
RPM ----------Revolutions Per Minute
SDGs---------- Sustainable Development Goals
TDS ----------Total Dissolved Solids
°C ----------Degree Celsius
%RH---------- Relative Humidity
V ----------Volt
A ----------Ampere
W ----------Watt
Wh ---------Watt-hour

ODD--------- Objectifs de Développement Durable

DoD---------- Depth of discharge

Remerciements

Avant tout, nous remercions Allah, le Tout-Puissant, de nous avoir accordé la force, la patience et la volonté nécessaires pour mener ce travail à son terme.

Nous exprimons notre profonde gratitude à nos encadrants, M. Dr Saad Saoud Marouane et Mme Dr Addoui Ibtissam, pour leurs précieux conseils, leur disponibilité, leur accompagnement et leurs orientations tout au long de la réalisation de ce projet.

Nous adressons également nos sincères remerciements à tous les enseignants du département, qui nous ont transmis leurs connaissances et contribué à notre formation universitaire.

Nos remerciements s'adressent aussi aux membres du jury, qui ont accepté d'évaluer ce travail et de nous faire bénéficier de leurs remarques et suggestions.

Nous tenons enfin à remercier nos familles, nos amis ainsi que toutes les personnes qui nous ont soutenus, encouragés et aidés, de près ou de loin, durant notre parcours universitaire.

À toutes et à tous, nous adressons notre profonde reconnaissance.

Dédicaces

Nous dédions ce travail, fruit de nos efforts, de notre persévérance et de notre passion, à nos chers parents, pour leur amour inconditionnel, leurs sacrifices et leur soutien permanent.

À nos encadrants, pour leurs précieux conseils, leur disponibilité et leur accompagnement tout au long de ce projet.

À nos enseignants, qui nous ont transmis leur savoir et leur expérience avec dévouement.

À nos familles, nos amis et à toutes les personnes qui nous ont encouragés et soutenus durant notre parcours universitaire.

Enfin, nous dédions ce modeste travail à tous ceux qui œuvrent pour un avenir plus durable, où l'innovation technologique est au service de l'environnement et du développement durable.

Les membres du projet AquaVolt

Résume

Ce projet consiste à concevoir et réaliser un système aquaponique intelligent alimenté par l'énergie solaire, combinant l'aquaculture et la culture hydroponique dans un environnement durable. Le système repose sur l'Internet afin d'assurer la surveillance et le contrôle automatiques des principaux paramètres environnementaux tels que la température, l'humidité, la qualité d'air et le ph ainsi que l'ensoleillement. Une commande intelligente permet également de gérer la pompe ainsi que l'orientation des panneaux photovoltaïques pour optimiser la production d'énergie. Un prototype fonctionnel a été développé et testé avec succès, démontrant une réduction de la consommation d'eau et d'énergie tout en améliorant les conditions de croissance des plantes et le bien-être des poissons. Cette solution représente une approche innovante pour promouvoir l'agriculture intelligente et le développement durable.

Mots-clés : Aquaponie, agriculture intelligente, énergie solaire, ESP32, développement durable.

الملخص

يهدف هذا المشروع الى تصميم و انجاز نظام أكوابونيك ذكي ومستدام يعمل بالطاقة الشمسية يجمع بين تربية الأسماك والزراعة المائية في دورة بيئية متكاملة مع الاعتماد على الانترنت للتحكم والمراقبة عن بعد. يعتمد النظام على مجموعة من الحساسات لقياس أهم المعايير البيئية مثل درجة الحرارة, الرطوبة, جودة الهواء, شدة سطوع الشمس, قياس حموضة الماء اضافة الى التحكم الالي في مضخة المرشح وحركة انزلاق الألواح الشمسية لتحقيق أعلى مردود لنظام. وقد تم تطوير نموذج أولي واجراء اختبارات عملية أثبتت فعالية النظام في تقليل استهلاك المياه والطاقة وتحسين نمو النباتات والاسماك مع الحفاظ على الظروف المناسبة للنظام. يمثل هذا المشروع حلا مبتكرا يساهم في دعم الزراعة الذكية والتنمية المستدامة ويمكن تطويره مستقبلا ليستخدم في البيوت المحمية والمزارع الحديثة.

الكلمات المفتاحية: الأكوابونيك ,الزراعة الذكية, الطاقة الشمسية, انترنت, التنمية المستدامة, ESP32

Abstract

This project involves designing and building a smart, solar-powered aquaponics system that combines aquaculture and hydroponics in a sustainable environment. The system relies on the Internet to automatically monitor and control key environmental parameters such as temperature, humidity, air quality, pH, and sunlight exposure. A smart control system also manages the pump and the orientation of the photovoltaic panels to optimize energy production. A functional prototype has been developed and successfully tested, demonstrating reduced water and energy consumption while improving plant growth conditions and fish welfare. This solution represents an innovative approach to promoting smart agriculture and sustainable development.

Keywords: Aquaponics, smart agriculture, solar energy, ESP32, sustainable development

Introduction générale

L'Algérie fait face à un paradoxe alimentaire difficile à ignorer. D'un côté, un territoire vaste, un ensoleillement exceptionnel, et une population en croissance constante qui génère une demande alimentaire de plus en plus importante. De l'autre, des ressources en eau qui s'épuisent, des terres agricoles qui se dégradent, et une dépendance aux importations alimentaires qui pèse lourd sur la balance commerciale du pays. Entre ces deux réalités, la question se pose naturellement : comment produire plus, avec moins ?

Ce projet de fin d'études est né de cette question. Il ne prétend pas y apporter une réponse définitive personne ne le peut. Mais il propose une piste concrète, à petite échelle, reproductible et adaptée au contexte algérien : un système de production alimentaire aquaponique, alimenté exclusivement par l'énergie solaire.

Le principe de l'aquaponie repose sur une idée élégante dans sa simplicité : faire travailler les poissons et les plantes ensemble, dans un cycle fermé où les déchets des uns deviennent la nourriture des autres. Les poissons produisent de l'ammoniaque, des bactéries la transforment en nitrates, les plantes absorbent ces nitrates et purifient l'eau, qui retourne dans le bassin. Ce cycle ne nécessite ni engrais chimiques, ni pesticides, ni grandes surfaces de sol et consomme jusqu'à 98 % moins d'eau qu'une culture irriguée conventionnelle.

Pour alimenter ce système sans dépendre du réseau électrique une contrainte réelle dans de nombreuses régions d'Algérie deux panneaux solaires photovoltaïques de 100 Wc chacun ont été intégrés à la structure. Leur particularité : ils sont mobiles, capables de se déplacer automatiquement pour ombrager les cultures lorsque la chaleur devient excessive, tout en continuant à produire de l'énergie.

Le résultat est le prototype AquaVolt une structure compacte de 116 × 83 cm qui loge un bassin en verre fumé noir de 80 litres pour l'élevage de tilapias, une étagère hydroponique à trois niveaux pour la culture de neuf plants de laitue, un système de filtration biologique, et une installation solaire autonome avec batterie de stockage. Tout cela dans un espace inférieur à un mètre carré au sol.

Ce mémoire est organisé en trois chapitres. Le premier établit le contexte général du projet : problématique, objectifs, concepts de base et état de l'art. Le deuxième décrit l'architecture du système AquaVolt dans ses moindres détails : composants, matériaux, circuits hydraulique et électrique, et modèles de fonctionnement. Le troisième présente le dimensionnement complet calculs aquaponiques, hydrauliques et énergétiques ainsi que l'étude économique, l'analyse SWOT et l'impact environnemental du projet.

AquaVolt n'est pas qu'un projet académique. C'est une démonstration de faisabilité. La preuve qu'avec les bons choix technologiques, un budget étudiant et des composants disponibles localement, il est possible de produire de la nourriture fraîche, de l'emploi, et de la valeur à partir du soleil et de l'eau, là où l'agriculture conventionnelle abandonne.

CHAPITRE I INTRODUCTION GÉNÉRALE

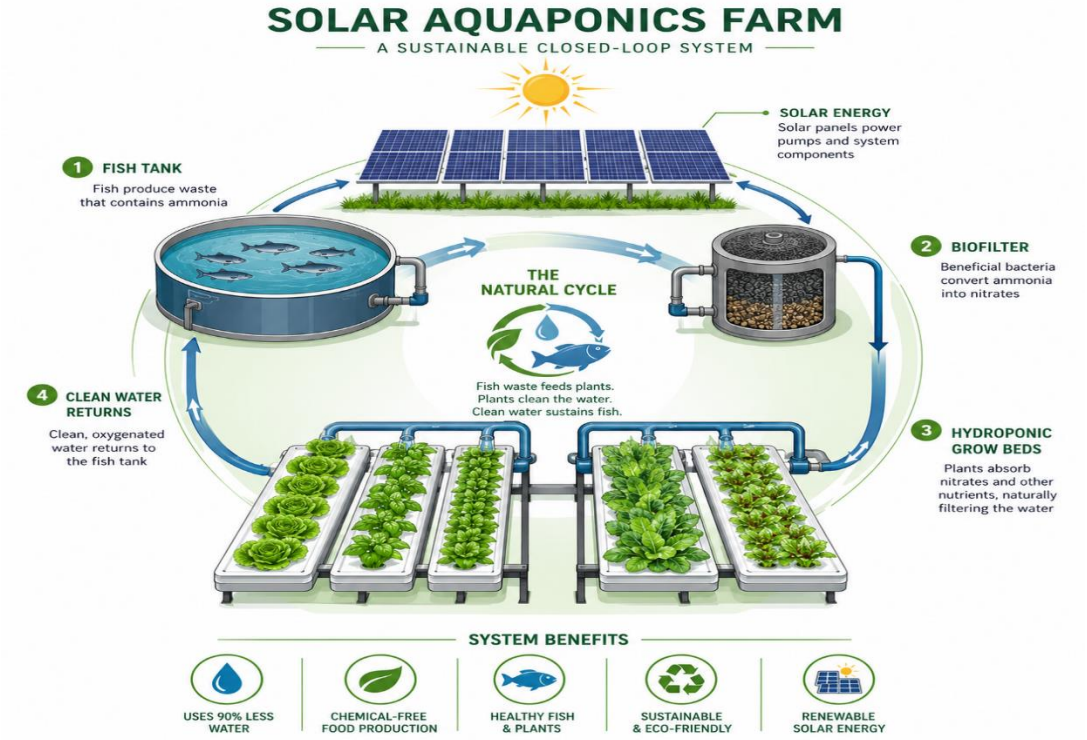
1.1 Introduction

1.1.1 Présentation du projet

L'agriculture conventionnelle, caractérisée par une surexploitation des ressources hydriques, une dépendance croissante aux intrants chimiques et une facture énergétique en augmentation constante, fait face à des limites structurelles qui imposent l'exploration de modèles alternatifs durables [2,5].

Le présent projet s'inscrit dans cette perspective en proposant la conception d'un système intégré de production alimentaire combinant aquaponie et énergie solaire. L'aquaponie repose sur l'association symbiotique de l'élevage piscicole et de la culture végétale en circuit fermé : les déjections des poissons, riches en ammoniaque, sont transformées par des bactéries nitrifiantes en nitrates assimilables par les plantés, qui à leur tour épurèrent l'eau avant son retour vers les bassins [3,6,8].

Afin de garantir l'autonomie énergétique du système et son indépendance vis-à-vis du réseau électrique, l'ensemble des équipements est alimenté par des panneaux photovoltaïques. Ce type de configuration, bien que déjà déployé dans plusieurs régions du monde, fait l'objet dans le cadre d'une adaptation spécifique au contexte climatique, économique et technique de l'Algérie [22 - 23].



Figur 01 — Schéma de principe du cycle aquaponique solaire.

1.1.2 Contexte et justification de l'agriculture durable

L'agriculture durable ne constitue plus une option marginale mais une nécessité démontrée par les données disponibles. Selon la FAO (2017), la demande alimentaire mondiale devrait augmenter d'environ 60 % d'ici 2050, tandis que les surfaces cultivables continuent de se réduire sous l'effet de l'urbanisation et de la dégradation des sols [2].

L'agriculture conventionnelle consomme à elle seule environ 70 % des ressources en eau douce disponibles au niveau mondial. Dans les pays du Maghreb, cette proportion est encore plus élevée en raison de l'aridité du climat et de l'inefficience des systèmes d'irrigation traditionnels [1,5].

Le présent projet vise à démontrer qu'une alternative concrète est réalisable à une échelle accessible, en s'appuyant sur des technologies maîtrisées et disponibles localement. Il ne prétend pas résoudre l'ensemble des problèmes agricoles du pays, mais propose un référentiel technique reproductible adapté au contexte algérien [4].

1.2 Problématique

La problématique de ce projet repose sur l'interdépendance de trois contraintes structurelles qui limitent le développement agricole en Algérie : la rareté de l'eau, la dépendance énergétique et l'absence de modèles de production adaptés au contexte local. Ces contraintes, analysées ci-après, justifient une approche systémique intégrant aquaponie et énergie solaire.

1.2.1 La rareté de l'eau

L'eau est sans doute la ressource la plus critique dans le contexte algérien. Plus de 80 % du territoire national est classé en zone aride ou semi-aride, avec des précipitations annuelles inférieures à 200 mm, Pourtant, l'agriculture continue d'absorber l'essentiel des ressources hydriques disponibles, en grande partie à travers des pratiques d'irrigation peu efficientes où les pertes par évaporation et infiltration peuvent dépasser 50 %. [1,5]

Les projections climatiques ne sont pas rassurantes. Selon les modèles du GIEC, le bassin méditerranéen devrait enregistrer une baisse des précipitations de l'ordre de 15 à 25 % d'ici la fin du siècle, accompagnée d'une hausse des températures qui accélère l'évapotranspiration. Dans ce scénario, maintenir une agriculture productive sans réformer radicalement les pratiques d'irrigation devient tout simplement impossible.[5]

Le système proposé dans ce mémoire réduit la consommation d'eau de 90 % par rapport à une culture en plein champ, car l'eau circule en boucle fermée entre les bassins de poissons et les bacs de culture. Ce résultat est documenté par de nombreuses études sur des systèmes aquaponiques opérationnels. [1,6]

1.2.2 La dépendance énergétique

Un système aquaponique nécessite un apport énergétique continu pour assurer la circulation de l'eau, l'aération des bassins, le fonctionnement des capteurs de surveillance et, le cas échéant, l'éclairage en culture protégée. Dans les systèmes de production sous serre, la part de l'énergie dans les coûts opérationnels peut atteindre 25 à 40 % selon les configurations [17, 19].

L'énergie solaire photovoltaïque représente la réponse la plus adaptée à cette contrainte dans le contexte algérien. Le coût des panneaux solaires a diminué de plus de 90 % au cours de la dernière décennie, et l'Algérie bénéficie d'un ensoleillement exceptionnel entre 2 500 et 3 000 heures par an selon les régions ce qui en fait un candidat privilégié pour l'alimentation énergétique de systèmes agricoles autonomes [20].

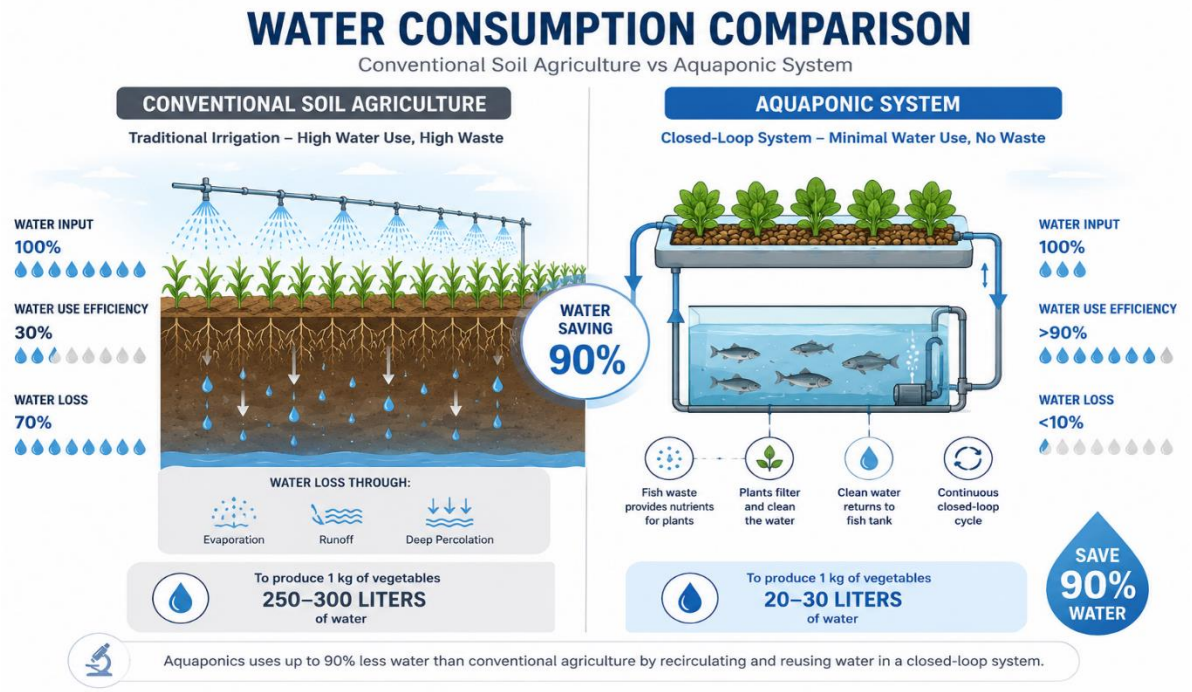


Figure 2 — Comparaison de la consommation d'eau : agriculture conventionnelle vs aquaponie.

1.2.3 Absence de systèmes agricoles adaptés au contexte local

Le troisième problème réside dans l'absence, à notre connaissance, de modèle complet et opérationnel de ferme aquaponique solaire adapté aux conditions algériennes. Les références internationales abondent, mais elles

ont été développées dans des contextes radicalement différents : climat tempéré, réglementation distincte et marchés locaux structurés [27–29].

Ce projet vise ainsi à produire un référentiel technique et économique utilisable localement, prenant en compte les contraintes spécifiques : disponibilité des espèces piscicoles adaptées, température ambiante élevée, coût de la main-d'œuvre et débouchés commerciaux réalistes [9,16].

Problématique de recherche : Comment concevoir, dimensionner et évaluer un système de production alimentaire intégrant aquaponie et énergie solaire, adapté aux conditions climatiques, économiques et techniques du contexte semi-aride algérien ?

1.3 Objectifs

1.3.1 Objectif général

L'objectif général de ce travail est de concevoir un prototype fonctionnel d'unité de production aquaponique alimentée par énergie solaire, dimensionné pour une exploitation à petite échelle, et d'en évaluer la faisabilité technique et économique dans les conditions algériennes.

1.3.2 Objectifs spécifiques

Cet objectif général se décline en quatre axes spécifiques :

a) Sur le plan technique

- Concevoir l'architecture globale du système : bassins piscicoles, unité de biofiltration, bacs hydroponiques et circuit hydraulique.
- Calculer les besoins énergétiques réels du système et dimensionner la surface de panneaux solaires et la capacité des batteries de stockage.
- Choisir les espèces végétales et piscicoles les mieux adaptées au climat local et aux contraintes du système.

b) Sur le plan de la modélisation

- Modéliser le cycle biologique de l'azote au sein du système (transformation de l'ammoniaque en nitrates utilisables par les plantes).
- Estimer les productions attendues en kilogrammes de légumes et de poissons pour différentes configurations.

c) Sur le plan du contrôle et de l'automatisation

- Mettre en place un système de surveillance des paramètres essentiels : pH, température, oxygène dissous, turbidité.
- Développer une interface simple permettant au gérant de suivre le système à distance via smartphone.

d) Sur le plan économique

- Estimer le coût d'installation et de fonctionnement du système, et calculer le délai de retour sur investissement.
- Identifier les débouchés commerciaux réalistes et construire un modèle d'affaires adapté à une startup locale.

1.4 Concepts de base

Ce projet repose sur quatre concepts techniques interdépendants dont la combinaison constitue l'originalité de l'approche proposée. Cette section les définit et les situe dans le contexte du système AquaVolt [3].

1.4.1 L'aquaponie

L'aquaponie désigne un système de production alimentaire intégré combinant l'aquaculture (élevage de poissons) et l'hydroponie (culture de plantes sans sol) au sein d'un circuit fermé. Le principe repose sur un cycle biologique naturel : les poissons produisent des déjections riches en ammoniaque, lesquelles sont transformées par des bactéries nitrifiantes (Nitrosomonas, puis Nitrobacter) en nitrites, puis en nitrates directement assimilables par les racines des plantes. Les plantes absorbent ces nitrates, épurent l'eau au passage, et cette eau traitée est renvoyée vers les bassins piscicoles [3, 6, 8].

Les performances documentées de ce modèle incluent une réduction de la consommation d'eau à 5–10 % par rapport à un système d'irrigation classique, l'absence totale d'engrais chimiques et la possibilité de générer deux sources de revenus à partir d'une même infrastructure [1, 4].



Figure 3 — Schéma de principe du système aquaponique intégré.

1.4.2 L'hydroponie

L'hydroponie est une technique de culture hors sol dans laquelle les racines des plantes baignent dans une solution aqueuse contenant l'ensemble des éléments nutritifs nécessaires, ou reposent sur un substrat inerte (billes d'argile, laine de roche, fibre de coco) arrosé régulièrement par cette solution [10,11].

Il existe plusieurs variantes techniques. Le NFT (Nutrient Film Technique) fait circuler un mince filet de solution sous les racines. Le DWC (Deep Water Culture) immerge les racines directement dans un bac de solution oxygénée. C'est cette dernière technique qui est la plus couramment utilisée en aquaponie, car elle est simple, robuste et facilement scalable. Dans notre système, les plantes puisent leurs nutriments directement dans l'eau enrichie par les poissons, sans aucun ajout d'engrais extérieur. [10,12]



Figure 4 — Schéma du système DWC à 3 niveaux retenu pour AquaVolt.

1.4.3 L'aquaculture

L'aquaculture désigne l'élevage contrôlé d'animaux aquatiques. Dans notre cas, on parle d'élevage de poissons d'eau douce en bassin fermé. L'eau est filtrée en continu, mécaniquement (retrait des matières solides) et biologiquement (traitement de l'azote ammoniacal), Elle est aussi constamment oxygénée. [13,14]

Les deux espèces candidates les plus pertinentes pour le contexte algérien sont le tilapia du Nil (Oreochromis niloticus), apprécié pour sa rusticité, sa croissance rapide et sa tolérance aux variations de paramètres physico-chimiques, et le poisson-chat africain (Clarias gariepinus), particulièrement résistant au stress et bien valorisé sur les marchés locaux. Ces deux espèces sont déjà élevées dans plusieurs stations aquacoles algériennes, notamment dans les régions du sud [15,16].



Figure 5 — Schéma d'un bassin RAS avec système de recirculation et filtration.

1.4.4 L'agrivoltaïque

L'agrivoltaïque désigne le couplage de la production agricole et de la production d'énergie solaire sur un même site. Dans sa forme la plus avancée, les panneaux solaires sont installés au-dessus des cultures, créant un ombrage partiel qui protège les plantes de la chaleur excessive tout en produisant de l'électricité [17-18].

Dans le cadre de ce projet, l'agrivoltaïque est entendu dans un sens plus large : les panneaux solaires alimentent l'ensemble des équipements du système aquaponique. Les batteries de stockage assurent la continuité de fonctionnement la nuit et lors des journées nuageuses. L'objectif est de ne dépendre d'aucune source d'énergie extérieure. [19-20,22]



Figure 6 — Schéma d'une installation agrivoltaïque couplant panneaux solaires et production agricole.

1.5 État de l'art

Avant de proposer un système original, il convient d'examiner les travaux existants afin d'identifier les acquis, les limites et les lacunes que ce projet cherche à combler. Cette revue de la littérature structure la justification scientifique de la démarche proposée [7].

1.5.1 Revue des travaux internationaux

L'aquaponie et les systèmes agricoles solaires ont suscité un intérêt croissant depuis le début des années 2010, avec un nombre significatif de projets pilotes et de fermes commerciales sur tous les continents [7, 21].

Le réseau de recherche européen COST FA1305 (2014–2018), regroupant une trentaine de pays, a produit un référentiel scientifique complet sur l'optimisation des systèmes aquaponiques, couvrant la gestion des biofilms, les densités d'élevage, les équilibres nutritifs et l'automatisation [7].

L'exemple le plus proche de ce que ce projet vise reste celui des systèmes aquaponiques solaires déployés dans des zones désertiques, dont les caractéristiques climatiques sont proches des zones semi-arides algériennes. Ces projets ont démontré qu'une unité aquaponique entièrement solaire pouvait être rentable, avec des coûts d'exploitation significativement inférieurs. [21, 23-24]

Des travaux récents soulignent également l'intérêt d'optimiser la gestion énergétique en utilisant le volume d'eau du système comme tampon thermique, réduisant ainsi les besoins de chauffage et de refroidissement [25].

1.5.2 Travaux réalisés dans le contexte algérien

En Algérie, les travaux académiques sur l'aquaponie restent rares et souvent limités à des études théoriques ou des expériences de laboratoire. Des résultats encourageants ont toutefois été obtenus à la station d'aquaculture de Ouargla, où des expériences pilotes ont confirmé la faisabilité du concept [27].

La stratégie nationale de développement de l'aquaculture 2020–2024 identifie les systèmes intégrés comme axe prioritaire, mais sans intégration documentée avec la production photovoltaïque.

Des travaux sur la culture hydroponique en zones arides algériennes confirment la faisabilité agronomique du modèle, mais n'intègrent ni la composante piscicole ni la production d'énergie solaire.

1.5.3 Tableau comparatif des projets de référence

Le tableau ci-dessous résume les principaux projets de référence identifiés dans la littérature et met en évidence les lacunes que ce projet cherche à combler :

Tableau 01 comparatif des projets de référence

Projet / Pays	Technologies	Énergie	Lacunes identifiées
COST FA1305 (Europe)	Aquaponie variée	Variable	Pas de déploiement commercial documenté
Systèmes solaires (Australie)	Aquaponie + PV	100 % solaire	Contexte marché radicalement différent
Smart Farming IoT	Aquaponie + capteurs	Partiellement solaire	Pas d'adaptation au contexte local
Optimisation énergie	Aquaponie + batteries	Renouvelable	Pas de modèle économique pour petite structure
ENSA / Ouargla	Hydroponie ou aquaponie	Réseau national	Ni intégration solaire, ni modèle complet

1.5.4 Lacunes identifiées et positionnement du projet

À travers cette revue de la littérature, trois lacunes principales émergent et fondent le positionnement scientifique de ce projet :

Premièrement, l'intégration systémique. La majorité des travaux traitent soit la composante végétale, soit la composante piscicole, soit la composante énergétique rarement les trois ensemble de manière cohérente [3, 25].

Deuxièmement, l'adaptation au contexte local. Les références internationales offrent des modèles utiles, mais les espèces de poissons, les variétés végétales, les conditions climatiques et les structures de marché diffèrent sensiblement d'un pays à l'autre [27–29].

Troisièmement, la viabilité économique pour une petite structure. La majorité des études portent sur des projets à grande échelle ou des démonstrateurs académiques sans modèle économique. Il manque un référentiel conçu pour une startup disposant d'un budget limité et visant une rentabilité à moyen terme [25].

Ces trois lacunes intégration systémique, adaptation locale et viabilité économique à petite échelle constituent le fondement de la démarche de conception développée dans le chapitre suivant. Le Chapitre II présente l'architecture globale du système AquaVolt, le dimensionnement de chaque sous-système et les choix technologiques retenus pour répondre à ces insuffisances identifiées.

1.6 Conclusion

Ce premier chapitre a posé les bases sans lesquelles le reste du travail n'aurait pas de sens. Avant de concevoir un système, il faut comprendre pourquoi il est nécessaire et la réponse est apparue clairement à travers trois constats qui se renforcent mutuellement : l'eau se raréfie, l'énergie coûte cher, et les systèmes agricoles conventionnels ne peuvent pas répondre à ces deux contraintes à la fois.
L'aquaponie n'est pas une idée nouvelle. Des systèmes de ce type existent depuis des décennies à travers le monde, et la littérature scientifique sur le sujet est aujourd'hui abondante. Ce qui est nouveau ou du moins peu documenté c'est leur adaptation au contexte algérien : le climat semi-aride, les ressources disponibles localement, les espèces de poissons élevées dans la région, et les marchés alimentaires qui peuvent absorber ce type de production.
C'est précisément là que se situe l'espace qu'AquaVolt cherche à occuper. Pas en réinventant l'aquaponie, mais en montrant qu'elle peut fonctionner ici, avec ce qu'on a, dans les conditions qu'on connaît.
Les quatre concepts présentés dans ce chapitre aquaponie, hydroponie, aquaculture en circuit fermé et agrivoltaïque ne sont pas des notions théoriques isolées. Ils forment ensemble l'architecture intellectuelle du projet. Le chapitre suivant les traduit en architecture physique : composants, matériaux, circuits, et modèles de fonctionnement.

Chapitre 2 Architecture et conception du système AquaVolt

2 Introduction

Le premier chapitre nous a permis de comprendre pourquoi un système comme AquaVolt est nécessaire et sur quels concepts il repose. Maintenant, il s'agit de passer de l'idée à la réalité : décrire concrètement comment ce système est construit, comment ses composants interagissent entre eux, et comment on peut modéliser les échanges qui s'y produisent.

Ce chapitre présente l'architecture complète du prototype AquaVolt. On y décrit le bassin en verre fumé noir de 80 litres qui accueille les tilapias, l'étagère hydroponique à trois niveaux où poussent les neuf plants de laitue, le système de filtration mécanique et biologique qui maintient la qualité de l'eau, et l'installation photovoltaïque de 200 Wc qui alimente l'ensemble. Pour chaque composant, les choix technologiques ont été justifiés par comparaison avec les alternatives disponibles sur le marché algérien.

La deuxième partie du chapitre est consacrée à la modélisation : bilan de matière, cycle de l'azote, et schéma fonctionnel des flux. Ces modèles sont le lien entre la description physique du système et le dimensionnement qui sera réalisé au chapitre suivant.

2.1 Architecture globale du système AquaVolt

Le système AquaVolt est construit autour d'une structure compacte dont toutes les dimensions ont été définies avec précision pour optimiser l'espace, le flux d'eau par gravité et l'angle de captation solaire des panneaux photovoltaïques.

Tableau 2 ----Dimensions exactes de la structure AquaVolt

Paramètre	Valeur
Longueur totale	116 cm
Largeur totale	83 cm
Hauteur avant (façade)	60 cm
Hauteur arrière	108 cm
Angle de la toiture	45° optimisé pour les panneaux solaires (latitude BBA ≈ 36°N)
Volume intérieur total	116 × 83 × ((60+108) ÷ 2) ≈ 809 L

L'inclinaison à 45° est légèrement supérieure à l'optimum théorique estival, mais elle favorise la production hivernale période critique où l'ensoleillement est plus faible et où la demande en énergie pour maintenir la température de l'eau est plus importante. [7]

2.1.1 Bassin de poissons Tilapia du Nil (Oreochromis niloticus)

Le bassin piscicole est le point de départ du cycle. C'est là que les poissons vivent, se nourrissent et croissent et c'est également là que se génère la matière organique qui alimentera l'ensemble du système. [5, 6]

Pour ce projet, le choix s'est porté sur le tilapia du Nil (Oreochromis niloticus). Ce n'est pas un choix arbitraire : le tilapia est l'une des espèces les mieux documentées en aquaponie, avec une tolérance remarquable aux variations de paramètres physico-chimiques pH entre 6 et 9, température entre 20 et 32 °C et une résistance aux maladies qui en fait un candidat idéal pour un système géré avec des ressources limitées. [5, 6]

Les dimensions du bassin ont été définies pour maximiser le volume utile tout en s'intégrant dans le gabarit de la structure et en restant facilement manipulable par une seule personne.

Tableau 2.1 — Dimensions et caractéristiques du bassin AquaVolt

Paramètre	Valeur
Longueur × Largeur × Hauteur	60 cm × 40 cm × 40 cm
Volume total brut	60 × 40 × 40 = 96 000 cm³ = 96 litres
Volume d'eau utile (remplissage à 85 %)	96 × 0,85 = 81,6 litres = 0,0816 m³
Matériau	Verre fumé noir teinté dans la masse, opaque aux UV et à la lumière visible
Épaisseur des parois	8 à 10 mm (standard aquariophilie professionnelle)
Assemblage	Silicone alimentaire de grade aquariophile (non toxique pour les poissons)
Couleur	Noir fumé opaque opacité totale, esthétique professionnelle

Propriétés spécifiques du verre fumé noir

Le verre fumé noir est un matériau de haute qualité couramment utilisé en aquariophilie professionnelle et en aquaculture intensive. Ses propriétés physico-chimiques en font un choix techniquement supérieur à la majorité des plastiques pour un bassin d'élevage de poissons destinés à la consommation. [3]

- Inertie chimique absolue : le verre ne réagit avec aucun composé chimique présent dans l'eau du système ammoniaque, nitrites, nitrates, acides ou bases. Il n'y a aucune migration de molécules dans l'eau, contrairement aux plastiques qui peuvent libérer des plastifiants avec le temps.
- Opacité totale aux UV et à la lumière visible : la teinte dans la masse bloque intégralement le rayonnement lumineux. Cette propriété empêche la photosynthèse des algues dans le bassin et réduit le stress lumineux des poissons qui préfèrent naturellement les environnements semi-obscurs.
- Résistance thermique : le verre supporte des variations de température importantes sans déformation ni fragilisation, contrairement aux plastiques qui se déforment progressivement sous l'effet de la chaleur.
- Durée de vie illimitée : le verre ne se dégrade pas, ne jaunit pas et ne devient pas cassant avec le temps, à condition d'éviter les chocs mécaniques. Sa durée de vie est pratiquement illimitée.
- Facilité de nettoyage : la surface lisse du verre ne retient pas les biofilms pathogènes et se nettoie facilement avec une lame de rasoir ou une éponge magnétique sans aucun produit chimique.

Choix du matériau du bassin analyse comparative

Cinq matériaux ont été étudiés et comparés selon six critères techniques pour justifier le choix du verre fumé noir pour le bassin du prototype AquaVolt.

Tableau 2.2 — Comparaison des matériaux pour le bassin AquaVolt

Matériau	Inertie chimique	Opacité	Durée de vie	Coût approx.	Entretien
Verre fumé noir	Absolue aucune migration	Totale (teinté masse)	Illimitée	3 000–5 000 DZD	Très facile lame rasoir
HDPE alimentaire	Très bonne (certifié)	Nulle (translucide)	20 ans	1 200–1 800 DZD	Facile brosse douce
Verre transparent standard	Absolue	Nulle (transparent)	Illimitée	2 000–3 500 DZD	Facile algues visibles
Béton enduit époxy	Bonne après traitement	Totale	Très longue	800–2 000 DZD	Difficile poreux
Polypropylène (PP)	Moyenne (non certifié)	Partielle selon couleur	3–5 ans	400–700 DZD	Facile

Figure 2.1 — Bassin en verre fumé noir 60×40×40 cm prototype AquaVolt avec tilapias



2.1.2 Système hydroponique Étagère DWC à 3 niveaux

Le module de culture du système AquaVolt comprend 3 niveaux superposés avec 3 plants de laitue par étage, pour un total de 9 plants par cycle. Cette configuration verticale maximise la densité de production dans l'espace disponible et simplifie la gestion et la récolte.

Choix du système hydroponique analyse comparative

Trois techniques hydroponiques ont été comparées pour le système AquaVolt. Le critère le plus important pour ce prototype est la robustesse en cas de panne du système solaire.

Tableau 2.3 — Comparaison des techniques hydroponiques pour AquaVolt

Technique	Consommation eau	Robustesse panne pompe	Complexité install.	Coût fabrication	Adapté laitue
NFT (Nutrient Film Technique)	Très faible	Faibles racines sèchent en < 2 h	Moyenne	800–1 500 DZD	Oui
DWC (Deep Water Culture)	Faible	Très bonne tampon eau 6–8 h	Simple	400–800 DZD	Excellent
Aéroponie	Minimale	Très faibles racines sèchent en 30 min	Élevée	> 3 000 DZD	Oui

Choix retenu : DWC (Deep Water Culture). Justification détaillée :

- En cas de coupure de la pompe solaire (nuit, nuage prolongé), le volume d'eau dans les bacs (67,5 L au total) protège les racines pendant 6 à 8 heures sans dommage temps largement suffisant pour que les panneaux solaires reprennent leur production au lever du soleil.
- La laitue est l'espèce qui présente les meilleurs rendements en DWC : croissance 25 à 30 % plus rapide qu'en NFT grâce à l'accès direct et permanent aux nutriments.
- Coût de fabrication minimal : bacs en polystyrène extrudé découpés, net cups en PVC.
- Entretien réduit : pas de canaux à nettoyer, pas de pompe NFT de précision à régler. [5, 6]

Figure 2.2 — Étagère DWC 3 niveaux × 3 plants laitue en système AquaVolt



2.1.3 Circuit d'eau principe de circulation

Le circuit hydraulique du système AquaVolt utilise la gravité comme moteur principal du flux retour, ce qui permet de réduire la consommation énergétique. L'eau monte une seule fois depuis le bassin (via la pompe principale), traverse le circuit de filtration puis les bacs en descendant par gravité d'étage en étage, et revient enfin au bassin par débordement naturel.

Cette organisation en circuit fermé est fondamentale : il n'y a aucun rejet d'eau vers l'extérieur en régime normal de fonctionnement. Les seules pertes d'eau du système proviennent de l'évapotranspiration des plantes et de l'évaporation depuis la surface du bassin, selon les conditions climatiques et la saison.

2.2 Système de filtration

Le système de filtration est l'un des composants les plus critiques du système AquaVolt. Sans une filtration efficace, les matières solides produites par les tilapias colmateraient les racines des laitues en 48 à 72 heures, et l'accumulation d'ammoniaque non traitée atteindrait des niveaux létaux pour les poissons en 3 à 5 jours. [9, 10]

La filtration s'organise en deux étages distincts et complémentaires :

2.2.1 Filtration mécanique Filtre à éponge

L'eau chargée en matières solides (fèces, restes d'aliments non consommés, débris organiques) sort du bassin et entre dans le système de filtration mécanique avant d'atteindre le biofiltre. Le principe est simple : retenir les particules en suspension pour éviter leur accumulation dans les bacs de culture.

Pour un bassin de 80 litres avec des poissons produisant environ 28 g d'aliment transformé par jour, la charge en matières solides en suspension est faible. [9]

Choix du type de filtration mécanique analyse comparative

Plusieurs solutions de filtration mécanique ont été étudiées et comparées selon différents critères techniques et économiques, notamment l'efficacité de séparation des particules, la facilité de fabrication, les besoins en maintenance, le coût de mise en œuvre ainsi que l'adaptation au volume du bassin utilisé.

Tableau 2.4 — Comparaison des filtres mécaniques pour AquaVolt

Type de filtre	Efficacité	Fabrication	Entretien	Coût	Adapté à 80 L
Swirl filtre (tourbillon)	Bonne > 100 µm	Locale en PVC	Hebdomadaire	3 500–5 000 DZD	Oui mais surdimensionné
Drum filtre rotatif	Excellente > 60 µm	Import uniquement	Faible (auto)	> 40 000 DZD	Très surdimensionné
Décanteur statique seau	Bonne > 150 µm	Locale HDPE 10 L	Hebdomadaire	700–1 200 DZD	Adapté
Filtre à éponge	Bonne > 200 µm	Très simple et locale	Hebdomadaire légère	300–600 DZD	Parfaitement adapté

Choix retenu : filtre à éponge. Après analyse des différentes solutions de filtration mécanique, le filtre à éponge a été retenu pour le système AquaVolt. Ce choix s'explique principalement par sa simplicité de mise en œuvre, son faible coût d'acquisition, sa disponibilité sur le marché local ainsi que son excellente adaptation aux systèmes aquaponiques de petite capacité.

Bien que son efficacité de filtration soit légèrement inférieure à celle des systèmes plus complexes tels que le filtre rotatif, elle demeure largement suffisante pour le volume du bassin utilisé dans ce projet (≈ 80 L). De plus, le filtre à éponge assure simultanément une filtration mécanique des particules solides et constitue un support favorable au développement des bactéries nitrifiantes.

Le choix du filtre à éponge s'inscrit dans une démarche de conception économique, simple et reproductible, cohérente avec les objectifs d'accessibilité et de durabilité du projet AquaVolt.

Figure 2.3 — Filtre mécanique à éponge assemblage et installation dans le circuit AquaVolt



2.2.2 Filtration biologique Biofiltre et cycle de l'azote

La filtration biologique est le cœur chimique du système AquaVolt. Le biofiltre héberge des colonies de bactéries nitrifiantes qui transforment l'ammoniaque (NH_4^+) un déchet métabolique des poissons toxique à forte concentration en nitrates (NO_3^-), qui sont au contraire d'excellents engrais directement assimilables par les racines des laitues. [9, 10]

Tableau 2.5 Équations biochimiques du cycle de l'azote dans le biofiltre AquaVolt

Étape	Réaction biochimique	Organisme responsable	Résultat
ÉTAPE 1 Nitritation	$2\ NH_4^+ + 3\ O_2 \rightarrow 2\ NO_2^- + 2\ H_2O + 4\ H^+$	Nitrosomonas sp.	Nitrites NO_2^- (encore toxiques > 0,5 mg/L)
ÉTAPE 2 Nitratation	$2\ NO_2^- + O_2 \rightarrow 2\ NO_3^-$	Nitrobacter sp.	Nitrates NO_3^- (engrais pour les plantes, non toxiques < 150 mg/L)

Bilan global : NH_4^+ (toxique pour les poissons) → NO_3^- (engrais pour les plantes). Durée de démarrage du biofiltre (colonisation bactérienne) : 4 à 6 semaines. [9, 10]

Ce processus de nitrification se déroule en deux étapes biochimiques successives, chacune assurée par un genre bactérien différent. Ces bactéries sont strictement aérobies : elles ont besoin d'un apport continu en oxygène dissous pour fonctionner, ce qui justifie l'aération permanente du biofiltre par une pompe à air. [9, 10]

Tableau 2.6 — Médias de biofiltration comparés pour AquaVolt

Média	Surface spécifique	Disponibilité locale	Durée de vie	Volume nécessaire	Coût
Billes d'argile LECA	150–250 m²/m³	Excellente (jardineries)	Illimitée	3 L	400–600 DZD
Anneaux céramiques	250–350 m²/m³	Bonne (aquariophilie)	Illimitée	2 L	800–1 200 DZD
Charbon actif	800–1 200 m²/m³	Bonne	3–6 mois (à renouveler)	1 L	600–1 500 DZD

Dans le prototype AquaVolt, le biofiltre combine les trois médias en couches successives : les billes d'argile LECA servent de support principal d'accroche pour les bactéries nitrifiantes, les anneaux céramiques offrent une grande surface de colonisation supplémentaire, et le charbon actif assure une filtration chimique en absorbant les impuretés, les odeurs et certains composés organiques.

Figure 2.4 — Biofiltre LECA, anneaux céramiques et charbon actif assemblage AquaVolt



2.3 Système photovoltaïque

2.3.1 Principe de fonctionnement

Le système photovoltaïque constitue la principale source d'énergie du projet AquaVolt. Son rôle est d'alimenter en continu l'ensemble des équipements du système aquaponique : la pompe de recirculation, la pompe à air, les capteurs de surveillance ainsi que le mécanisme de déplacement automatique des panneaux solaires mobiles.

Le principe de fonctionnement repose sur l'effet photovoltaïque. Lorsque les rayons solaires atteignent les cellules en silicium qui composent les panneaux, les photons transfèrent leur énergie aux électrons du matériau semi-conducteur, provoquant leur déplacement et générant ainsi un courant électrique continu (DC). Ce courant est ensuite transmis au régulateur de charge MPPT, qui optimise en permanence le rendement de la conversion et protège la batterie contre les surcharges et les décharges profondes. L'énergie stockée dans la batterie assure la continuité de fonctionnement du système pendant la nuit ou lors des périodes de faible ensoleillement.

Dans le projet AquaVolt, deux panneaux photovoltaïques de 100 W sont installés sur la toiture inclinée à 45° de la structure. Ces panneaux sont mobiles : ils peuvent se déplacer automatiquement afin de maximiser la production d'énergie toute la journée. Ce mécanisme remplit également une fonction agronomique : lorsque l'intensité lumineuse ou la température devient excessive, les panneaux se repositionnent pour créer un ombrage partiel au-dessus des bacs de culture, protégeant ainsi les laitues du stress thermique.

Le système photovoltaïque joue donc un double rôle dans AquaVolt : production d'énergie renouvelable et régulation intelligente du microclimat de culture. C'est l'une des innovations les plus distinctives du projet.

2.3.2 Composants du système photovoltaïque

Un système photovoltaïque autonome, ce n'est pas seulement des panneaux. C'est un ensemble d'éléments qui travaillent ensemble : les panneaux produisent, le régulateur optimise et protège, la batterie stocke, la pompe circule l'eau. Ignorer l'une de ces éléments, c'est compromettre l'ensemble. Chacun de ces éléments a été sélectionné après comparaison avec les alternatives disponibles sur le marché algérien.

a) Panneaux photovoltaïques

Trois technologies de panneaux solaires sont couramment disponibles sur le marché algérien. Leurs différences portent principalement sur le rendement de conversion, le comportement à haute température et le coût.

Tableau 2.7 — Comparaison des technologies de panneaux solaires

Technologie	Rendement	Comportement chaleur	Coût (100 W)	Durée de vie
Monocristallin PERC	17–22 %	Bon (−0,35 %/°C)	6 000–8 000 DZD	25–30 ans
Polycristallin	14–17 %	Moyen (−0,45 %/°C)	4 000–6 000 DZD	20–25 ans
Amorphe (thin-film)	10–13 %	Très bon	8 000–12 000 DZD	15–20 ans

Choix retenu : Monocristallin PERC. Le panneau monocristallin PERC offre le meilleur rendement surfacique, ce qui est déterminant dans notre cas puisque l'espace disponible sur le toit de la structure est limité. Son coefficient de température est également le plus favorable parmi les technologies cristallines, ce qui est important à Bordj Bou Arréridj où les températures estivales sont élevées et où un panneau peut dépasser 60°C en plein soleil. Sa durée de vie garantie de 25 à 30 ans assure la rentabilité à long terme du système.

Figure 2.5 — Panneaux solaires monocristallins PERC 100 Wc système AquaVolt





b) Régulateur de charge

Le régulateur de charge est l'intermédiaire entre les panneaux et la batterie. Il existe deux technologies principales, dont les performances diffèrent significativement selon les conditions d'utilisation.

Tableau 2.8 — Comparaison des régulateurs de charge

Type	Rendement	Gain énergétique	Coût	Compatibilité
MPPT	93–97 %	+15 à +30 % vs PWM	2 500–4 500 DZD	Toutes batteries
PWM	70–80 %	Référence	800–1 500 DZD	Tension panneau = batterie
ON/OFF simple	60–70 %	−15 % vs PWM	300–600 DZD	Limitée

Choix retenu : Régulateur MPPT. Le MPPT (Maximum Power Point Tracking) ajuste en permanence le point de fonctionnement des panneaux pour extraire la puissance maximale disponible à chaque instant, quelle que soit la température ou l'ensoleillement. Par rapport au PWM, il récupère entre 15 et 30 % d'énergie supplémentaire ce

qui, pour nos 200 Wc à BBA, représente environ 165 Wh de plus par jour. Ce gain est particulièrement utile en hiver et en début/fin de journée, quand le système a encore besoin de tourner mais que l'ensoleillement est faible.

c) Batterie de stockage

La batterie stocke l'énergie produite pendant la journée pour alimenter le système la nuit et lors des périodes nuageuses. Plusieurs technologies sont disponibles, avec des compromis différents entre coût, durée de vie et capacité utile.

Tableau 2.9 — Comparaison des technologies de batteries

Technologie	Cycles de vie	Profondeur décharge (DoD)	Capacité utile (100 Ah/12V)	Coût
Plomb-acide AGM	300–500	50 %	600 Wh	1 800–2 800 DZD
Gel (VRLA)	500–800	60 %	720 Wh	2 500–4 000 DZD
$LiFePO_4$	3 000–6 000	80–90 %	1 080 Wh	9 000–15 000 DZD
Lithium NMC	500–1 000	70–80 %	960 Wh	6 000–10 000 DZD

Choix retenu : Plomb-acide AGM. Dans le cadre d'un prototype académique à budget maîtrisé, la batterie AGM offre le meilleur rapport qualité/prix. Elle est disponible localement, ne nécessite aucun entretien et sa capacité utile assure une autonomie nocturne suffisante. La $LiFePO_4$ serait idéale en version commerciale du projet, mais son coût quatre fois supérieur ne se justifie pas pour un démonstrateur.

Figure 2.6 — Batterie AGM 100 Ah / 12V stockage énergétique AquaVolt



d) Pompe à eau 220V AC

La pompe est la charge principale du système. Elle assure la recirculation de l'eau entre le bassin des poissons, le système de filtration et les bacs de culture hydroponique. Trois types de pompes ont été comparés selon leur mode d'alimentation, leur débit et leur consommation.

Tableau 2.10 — Comparaison des types de pompes à eau

Type	Alimentation	Débit typique	Consommation	Fiabilité	Prix / Dispo. locale
Centrifuge AC 220V	Secteur via onduleur	500–3 000 L/h	40–150 W	Très élevée	1 500–4 000 DZD / Excellente
Brushless DC 12V	Batterie directe	200–800 L/h	5–15 W	Élevée	1 200–2 500 DZD / Moyenne
À membrane DC	Batterie directe	50–200 L/h	8–20 W	Moyenne	—
Péristaltique DC	Batterie directe	10–80 L/h	5–12 W	Moyenne	2 000–4 000 DZD / Faible

Choix retenu : pompe centrifuge AC 220V. Les pompes centrifuges AC 220V sont les plus robustes, les plus répandues et les plus faciles à trouver localement. Elles sont conçues pour un fonctionnement continu 24h/24, ce qui est exactement la contrainte d'un système aquaponique. Leur alimentation en 220V AC nécessite l'ajout d'un onduleur DC/AC entre la batterie et la pompe, ce qui introduit une perte de conversion supplémentaire (5 à 10 %), mais reste compensé par la fiabilité et la disponibilité locale.

2.4 Schéma fonctionnel du système AquaVolt

Le schéma fonctionnel décrit simultanément les trois flux principaux qui coexistent dans le système : le flux hydraulique en circuit fermé (eau), le flux biochimique des nutriments (de l'alimentation jusqu'aux plantes via le cycle de l'azote), et le flux d'énergie électrique (du soleil jusqu'aux équipements de pompage et de surveillance). [1, 2]

Tableau 2.11 — Tableau des flux du système AquaVolt

Flux	Trajet complet	Forme physique ou chimique
Eau (recirculation)	Bassin → Pompe → Décanteur → Biofiltre → Bacs DWC → Bassin (gravité)	Eau liquide en circuit fermé
NH_4^+ (ammoniaque)	Excrétion branchiale tilapia → solution aqueuse → biofiltre	Ions ammonium dissous NH_4^+

Flux	Trajet complet	Forme physique ou chimique
NO_3^- (nitrates)	Biofiltre (Nitrobacter) → bacs DWC → racines laitue	Ions nitrate assimilés par les plantes
Matières solides	Fèces + restes aliments → filtre éponge → boues récupérées	Matières en suspension (MES)
Énergie DC 12V	Panneaux PV → MPPT → Batterie → Actionneurs	Courant continu 12V DC
Données IoT	Capteurs → ESP32 → WiFi → Application smartphone	Signal numérique WiFi 2,4 GHz

Figure 2.7 — Schéma fonctionnel 3D complet AquaVolt flux eau, énergie et nutriments



2.6 Conclusion

Ce chapitre a présenté le système AquaVolt dans sa globalité, depuis la structure externe de 116 × 83 cm jusqu'aux détails du circuit hydraulique et du câblage électrique. Plusieurs éléments méritent d'être retenus.

Le premier est le choix du verre fumé noir pour le bassin : un matériau d'inertie chimique absolue, opaque à la lumière, et d'une durée de vie pratiquement illimitée un choix qui se distingue clairement des plastiques courants. Le deuxième est la logique DWC retenue pour la culture hydroponique, qui offre une robustesse suffisante pour absorber les éventuelles interruptions de la pompe solaire. Le troisième est le système photovoltaïque de 200 Wc avec panneaux mobiles, dont la fonction dépasse la simple production d'énergie pour inclure la régulation thermique des cultures en été.

La modélisation du cycle de l'azote et du bilan de matière a montré que le système est biologiquement équilibré : les 4 tilapias produisent environ 1 g de NH_4^+ par jour, que les 9 plants de laitue sont capables d'absorber presque intégralement sous forme de nitrates. Cet équilibre est la condition fondamentale de la stabilité du système à long terme.

Chapitre 3 Dimensionnement, prototype et analyse économique

3 Introduction

3.1 Dimensionnement aquaponique

Le dimensionnement est l'étape qui transforme les choix conceptuels en valeurs concrètes et vérifiables. Pour le système AquaVolt, il s'agit de répondre à trois questions fondamentales : quelle quantité de poissons le bassin peut-il accueillir ? Quelle surface de culture est nécessaire pour absorber les nutriments produits ? Et comment ces deux paramètres s'équilibrent-ils pour former un cycle stable ?

3.1.1 Volume du bassin

Le bassin de 60 × 40 × 40 cm représente le cœur du système AquaVolt. Le volume d'eau utile disponible pour les poissons et les bactéries nitrifiantes est de 81,6 litres, calculé sur la base d'un remplissage à 85 % de la hauteur totale pour prévenir les débordements lors de l'agitation de l'eau par les poissons et lors des manipulations.

Tableau 3 — Tableau de Volume du bassin

Calcul	Valeur
Volume total brut (60 × 40 × 40 cm)	96 000 cm³ = 96,0 litres
Taux de remplissage (marge de sécurité)	85 %
Volume eau utile	96 × 0,85 = 81,6 litres = 0,0816 m³
Densité d'élevage retenue	20 kg/m³ (valeur conservative pour un prototype)
Densité recommandée en aquaponie débutant	15 à 25 kg/m³ on retient 20 kg/m³ comme compromis
Biomasse maximale supportable	0,0816 m³ × 20 kg/m³ = 1,632 kg

3.1.2 Nombre et densité des poissons

Au démarrage du prototype, 10 alevins de tilapia du Nil (Oreochromis niloticus) d'un poids unitaire de 20 g ont été introduits dans le bassin de 80 litres, soit une densité initiale de :

Densité initiale = (10 × 0,020) ÷ 0,080 = 2,5 kg/m³

Cette densité est largement dans les normes recommandées pour la phase de démarrage. Cependant, au cours des premières semaines de fonctionnement, 3 poissons sont décédés une mortalité qui s'explique par la phase de démarrage biologique du biofiltre. Durant cette période, le biofiltre n'est pas encore pleinement colonisé par les bactéries nitrifiantes, ce qui provoque des pics transitoires d'ammoniaque pouvant atteindre des niveaux létaux pour les alevins les plus fragiles.

Le prototype a donc fonctionné en régime permanent avec 7 tilapias, ce qui donne à maturité :

Tableau 3.1 — Tableau de Nombre et densité des poissons

Paramètre	Valeur
Biomasse effective	7 × 0,350 kg = 2,45 kg
Densité effective	2,45 ÷ 0,0816 = 30,0 kg/m³
Observation	Légèrement au-delà des 20 kg/m³ stable grâce à l'aération continue et au biofiltre établi
Recommandation	Introduction progressive : 5 alevins en phase 1, puis 5 autres 3 semaines après

3.1.3 Surface de culture et production de laitue

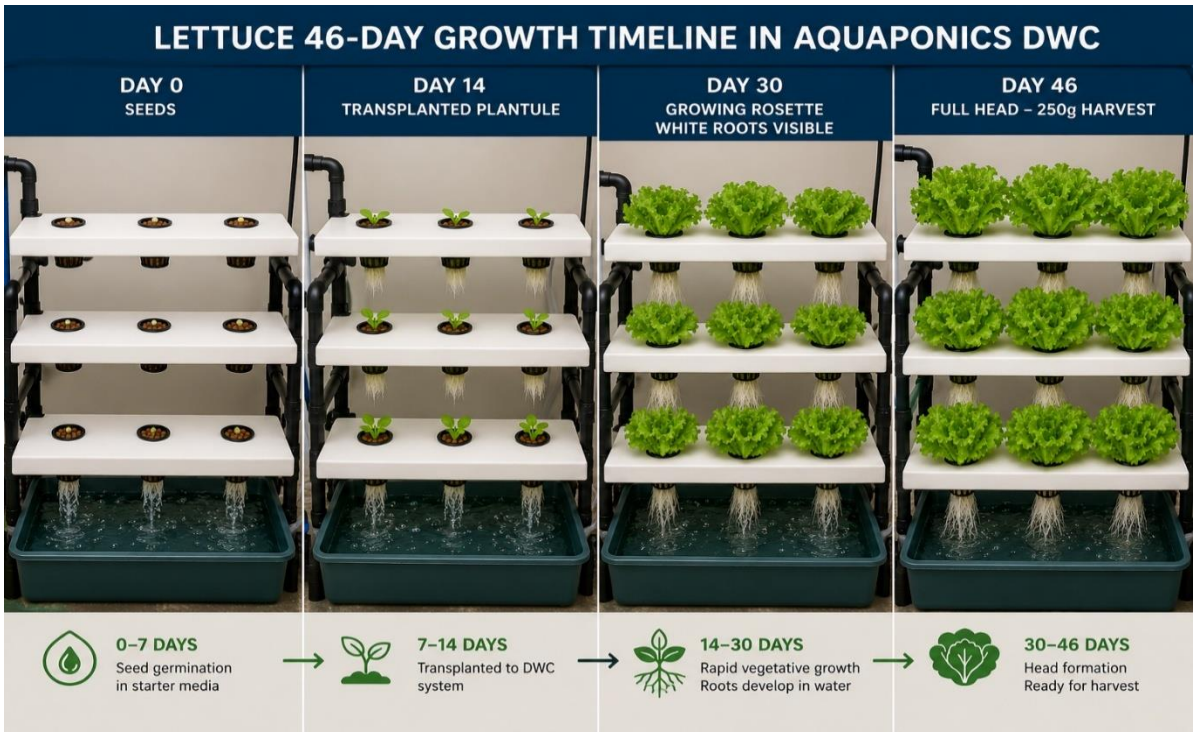
Les 9 plants de laitue répartis sur 3 étages de 3 plants constituent le module végétal du prototype AquaVolt. La laitue pommée (Lactuca sativa var. capitata) a été choisie pour sa parfaite adaptation au système DWC, son cycle de croissance court et sa forte demande sur les marchés alimentaires locaux tout au long de l'année. [5, 6]

Tableau 3.2 — Tableau de Surface de culture et production de laitue

Calcul	Valeur
Configuration	3 étages × 3 plants = 9 plants de laitue
Espacement entre plants	25 × 25 cm → surface par plant : 0,0625 m²
Surface totale effective	9 × 0,0625 = 0,5625 m²
PRODUCTION D'AMMONIAQUE (TAN)	
Ration journalière (2 % de 1,40 kg de biomasse)	0,028 kg/j = 28 g/j
TAN = Ration × Teneur protéines × Facteur excrétion	0,028 × 0,38 × 0,092 × 1 000 = 0,98 g NH_4^+/jour ≈ 1 g/jour
VÉRIFICATION DE L'ÉQUILIBRE	
Absorption NO_3^- par 9 laitues	9 × 0,10 g/plant/j = 0,90 g NO_3^-/jour
Production NO_3^- (biofiltre)	≈ 0,98 g/jour
Bilan biologique	≈ Équilibre ✓
TEMPS DE CROISSANCE	

Calcul	Valeur
Phase 1 — Germination et semis (hors système)	14 jours — terreau humide, 18–22°C, lumière indirecte
Critère de transplantation	Plantule avec 3 à 4 feuilles vraies développées
Phase 2 — Culture en DWC (dans AquaVolt)	32 à 35 jours — pH 6,5–7,0, NO_3^- 20–80 mg/L, T° eau 18–24°C, $O_2 \geq 6$ mg/L
TOTAL semis → récolte	46 à 49 jours (retenir 46 jours pour les calculs)
PRODUCTION PAR CYCLE	
Poids moyen d'une laitue à maturité	250 g (fourchette : 200–300 g)
Production par cycle	9 × 250 g = 2 250 g = 2,25 kg de laitue
PRODUCTION ANNUELLE	
Cycles par an	365 ÷ 46 = 7,93 → 8 cycles complets/an
Production annuelle	8 × 2,25 = 18 kg de laitue/an

Figure 3.1 — Cycle laitue 46 jours semis à récolte en DWC AquaVolt



3.2 Dimensionnement du système de pompage

Le circuit hydraulique d'AquaVolt doit faire circuler l'eau entre le bassin, le système de filtration et les bacs de culture de manière régulière et suffisamment rapide pour éviter toute stagnation. Deux paramètres pilotent ce dimensionnement : le débit nécessaire et la hauteur manométrique totale que la pompe doit vaincre.

3.2.1 Débit nécessaire

Tableau 3.3 — Tableau de débit nécessaire

Composant du circuit	Volume
Bassin principal (verre fumé noir)	80,0 L
Bacs DWC (3 bacs, profondeur 12 cm)	0,5625 m² × 0,12 m × 1 000 = 67,5 L
Décanteur / filtre éponge (50 % rempli)	5,0 L
Biofiltre (billes LECA + eau)	6,0 L
Tuyaux et raccords	2,0 L
VOLUME TOTAL EN CIRCUIT	80,0 + 67,5 + 5 + 6 + 2 = 160,5 L
Fréquence de renouvellement souhaitée	1 fois/heure
Débit minimum requis	160,5 L/h
Marge de sécurité (+30 %)	160,5 × 1,30 = 209 L/h
Débit retenu	200 à 300 L/h

Le principe de base est de renouveler l'ensemble du volume en circuit au moins une fois par heure. Ce rythme garantit une bonne homogénéisation des nutriments, une dilution efficace de l'ammoniaque et un apport régulier en solution nutritive vers les bacs de laitues. [11]

3.2.2 Hauteur manométrique totale (HMT)

La hauteur manométrique totale représente la résistance hydraulique totale que la pompe doit vaincre pour faire circuler l'eau depuis le point le plus bas (fond du bassin) jusqu'au point le plus haut du circuit (niveau 3 de l'étagère DWC). Elle est composée de la hauteur géométrique et des pertes de charge dans les conduites. [11]

Tableau 3.4 — Hauteur manométrique totale (HMT)

Calcul	Valeur
Hauteur géométrique (ΔZ)	Niveau pompe : fond du bassin (référence 0 m) → entrée biofiltre : ~90 cm → ΔZ = 0,90 m
Pertes de charge linéaires	Tuyaux PVC rigides Ø 20 mm, longueur totale estimée 1,5 m — coefficient Darcy-Weisbach (v ≈ 0,28 m/s) : 0,20 m
HMT TOTALE	0,90 + 0,20 = 1,10 m

3.3 Dimensionnement du système solaire

Le dimensionnement du système solaire suit une logique simple : on additionne les besoins de tous les équipements, on calcule la puissance de panneaux nécessaire pour couvrir ces besoins en tenant compte de l'ensoleillement local, et on dimensionne la batterie pour assurer l'autonomie nocturne. Les données solaires utilisées sont celles de l'Atlas Solaire de l'Algérie (CDER, 2022) pour la région de Bordj Bou Arréridj. [7, 8]

3.3.1 Bilan énergétique journalier

La pompe AC 220V est alimentée via un onduleur DC/AC branché sur la batterie. Cette conversion DC→AC introduit une perte d'environ 10 % qu'on intègre dans le calcul de la consommation de la pompe.

Tableau 3.5 — Bilan énergétique des équipements AquaVolt

Équipement	Tension	Puissance	Durée	Énergie/jour	Priorité
Pompe AC 220V (via onduleur)	220V AC	5 W	12 h/j	60 Wh/j	Critique recirculation eau
Onduleur DC/AC (pertes 10 %)	12V DC	6 W	24 h/j	144 Wh/j	Pertes conversion incluses
Pompe d'aération 220V	220V AC	18 W	24 h/j	432 Wh/j	Critique oxygénation poissons
ESP32 + capteurs (pH/T°/CO_2)	12V DC	3 W	24 h/j	72 Wh/j	Haute surveillance
Module WiFi ESP32	12V DC	0,5 W	24 h/j	12 Wh/j	Normale monitoring IoT

Équipement	Tension	Puissance	Durée	Énergie/jour	Priorité
Mécanisme panneaux mobiles	12V DC	10 W	2 h/j	20 Wh/j	Normale mouvement automatique
Pertes câblage (5 %)	—	—	—	90 Wh/j	Marge système
TOTAL	—	≈ 42,5 W moy.	—	830 Wh/j	—

3.3.2 Production photovoltaïque et bilan saisonnier

Tableau 3.6 — Production photovoltaïque et bilan saisonnier

Paramètre	Valeur
GHI moyen annuel (BBA)	5,5 kWh/m²/j
GHI hivernal minimal	3,8 kWh/m²/j
Rendement système PV (η)	75 %
Angle d'installation	45° fixe (inclinaison du toit de la structure)
Production journalière estivale	2 × 100 × 5,5 × 0,75 = 825 Wh/j
Production journalière hivernale	2 × 100 × 3,8 × 0,75 = 570 Wh/j
Besoin total journalier	830 Wh/j
Bilan été	825 − 830 = −5 Wh/j → déficit minimal complété par la batterie
Bilan hiver	570 − 830 = −260 Wh/j → déficit complété par la batterie

La batterie (1 × 100 Ah / 12V = 1 200 Wh bruts) compense le déficit diurne et assure le fonctionnement nocturne. En hiver, la gestion prioritaire de la batterie désactive en priorité le mécanisme des panneaux mobiles et le WiFi pour préserver l'alimentation des équipements critiques (pompes).

3.3.3 Capacité des batteries

Choix retenu : Plomb-acide AGM. Dans le cadre d'un prototype académique à budget maîtrisé, la batterie AGM offre le meilleur rapport qualité/prix. Elle est disponible localement, ne nécessite aucun entretien. La $LiFePO_4$ serait idéale en version commerciale du projet, mais son coût quatre fois supérieur ne se justifie pas pour un démonstrateur.

Tableau 3.7 — Capacité des batteries

Calcul	Valeur
Autonomie visée	1 nuit (10 à 12 heures sans soleil)
Énergie nécessaire pour 1 nuit	42,5 W × 12 h = 510 Wh
Correction DoD batterie AGM (50 %)	510 ÷ 0,50 = 1 020 Wh
Correction rendement (95 %)	1 020 ÷ 0,95 = 1 074 Wh
Capacité en Ah à 12V	1 074 ÷ 12 = 89,5 Ah → retenir 100 Ah
Banc de batteries retenu	1 × batterie AGM 100 Ah / 12V
Capacité totale	1 200 Wh bruts
Capacité utile (50 % DoD)	600 Wh
Autonomie réelle	600 ÷ 42,5 W ≈ 14,1 heures

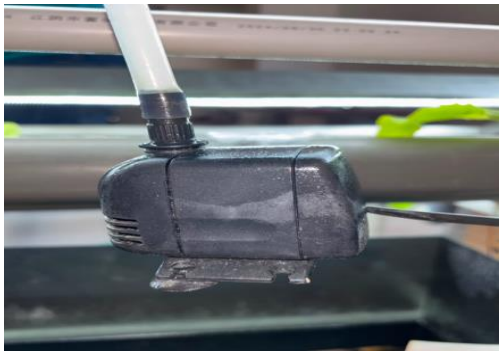
3.4 Choix technologiques

Les choix technologiques du prototype AquaVolt ont été guidés par trois critères : disponibilité locale, robustesse pour un fonctionnement 24h/24, et cohérence avec le budget d'un projet académique.

3.4.1 Type de pompe

Choix retenu : Pompe centrifuge AC 220V. Les pompes centrifuges AC 220V sont les plus robustes, les plus répandues et les plus faciles à trouver localement, dans toutes les gammes de débit. Elles sont conçues pour un fonctionnement continu 24h/24, ce qui est exactement la contrainte d'un système aquaponique. Leur alimentation en 220V AC nécessite l'ajout d'un onduleur DC/AC entre la batterie et la pompe ce qui introduit certes une perte de conversion supplémentaire (5 à 10 %), mais reste compensé par la fiabilité et la disponibilité locale de ces équipements. Pour le prototype AquaVolt, ce choix garantit une alimentation stable de la recirculation, condition indispensable à la survie des poissons et à la bonne nutrition des plantes.

Figure 3.2 — Pompe à eau centrifuge AC 220V-5W système AquaVolt



3.4.2 Type de filtration

Le système de filtration est l'un des composants les plus critiques du système AquaVolt. Deux filtres complémentaires sont utilisés dans ce projet : le filtre mécanique et le filtre biologique. Ces deux filtres sont exceptionnels et complémentaires.

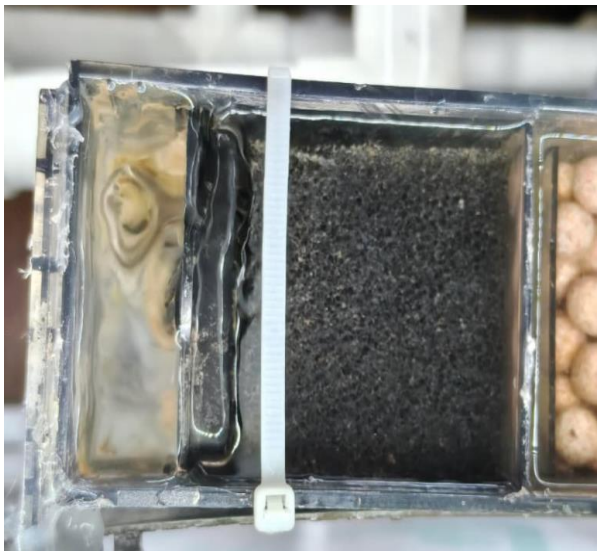
3.4.2.1 Filtre mécanique

Choix retenu : filtre à éponge. Après analyse des différentes solutions de filtration mécanique, le filtre à éponge a été retenu pour le système AquaVolt. Ce choix s'explique principalement par sa simplicité de mise en œuvre, son faible coût d'acquisition, sa disponibilité sur le marché local ainsi que son excellente adaptation aux systèmes aquaponiques de petite capacité.

Bien que son efficacité de filtration soit légèrement inférieure à celle des systèmes plus complexes tels que le filtre rotatif, elle demeure largement suffisante pour le volume du bassin utilisé dans ce projet (≈ 80 L). De plus, le filtre à éponge assure simultanément une filtration mécanique des particules solides et constitue un support favorable au développement des bactéries nitrifiantes.

Compte tenu des contraintes économiques du prototype et de l'objectif de concevoir un système simple, fiable et facilement reproductible, le filtre à éponge représente la solution la plus appropriée pour le projet AquaVolt.

Figure 3.3 — Filtre mécanique à éponge intégration dans le circuit AquaVolt



3.4.2.2 Filtre biologique

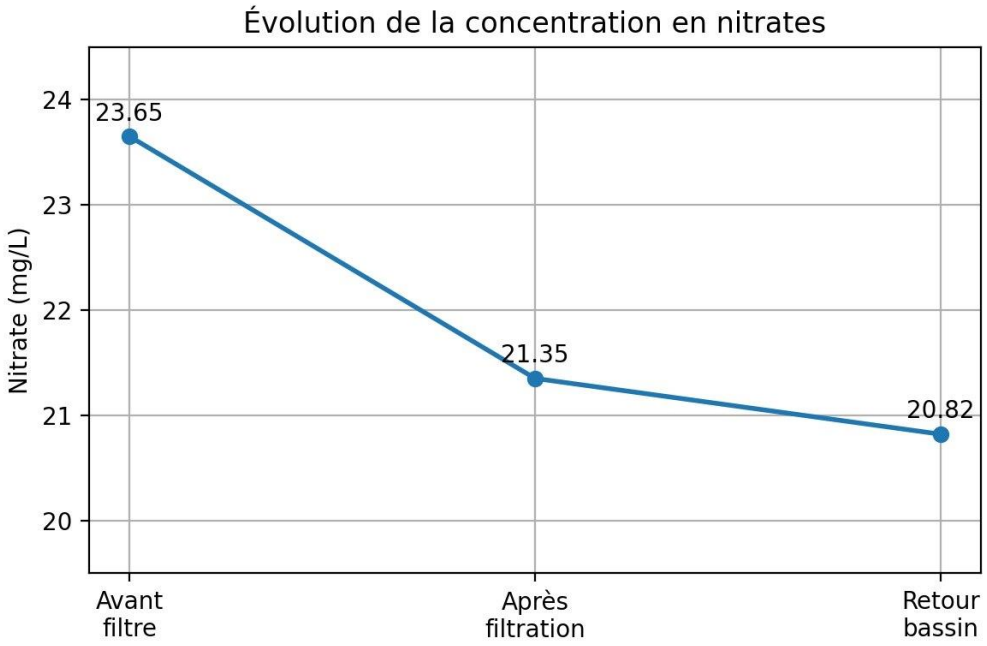
Dans cette partie, trois matières différentes ont été utilisées : billes d'argile « Orange », anneaux céramiques « Blanc » et charbon actif « Noir ». Chaque matière a un rôle spécifique :

- Les billes d'argile LECA servent de support d'accroche pour les bactéries bénéfiques qui transforment les déchets des poissons en nutriments pour les plantes.
- Les anneaux céramiques offrent une grande surface de colonisation aux bactéries nitrifiantes et améliorent ainsi la filtration biologique de l'eau.
- Le charbon actif assure une filtration chimique en absorbant les impuretés, les odeurs et certains composés organiques, afin d'améliorer la qualité globale de l'eau.

Afin d'évaluer l'efficacité du filtre et de vérifier son bon fonctionnement, des analyses de l'eau ont été réalisées au niveau de la Société Algérienne des Eaux (ADE) de BBA. Les prélèvements ont été effectués à trois étapes différentes : avant l'entrée de l'eau dans le filtre, après son passage à travers le système de filtration, puis lors de son retour vers le bassin des poissons.

Tableau 3.8 — des analyses de l'eau ont été réalisées au niveau de la Société Algérienne des Eaux (ADE) de BBA

Point de prélèvement	Concentration en nitrates (mg/L)
Avant entrée dans le filtre	23,65 mg/L
Après passage dans le système de filtration	21,35 mg/L
Retour vers le bassin des poissons	20,82 mg/L
Taux de réduction global	11,96 %



À partir de ces analyses, nous observons une réduction progressive et cohérente de la teneur en nitrates à chaque étape du processus de filtration, avec un taux global de réduction de 11,96 %. Ces valeurs confirment le bon fonctionnement du système et indiquent des concentrations dans la plage optimale pour la laitue (20–80 mg/L) et non toxique pour les poissons (< 150 mg/L).

Figure 3.4 — Biofiltre billes d'argile LECA, anneaux céramiques et charbon actif AquaVolt



3.4.3 Capteurs du système de surveillance

Le système de surveillance permet à l'opérateur de suivre en temps réel les paramètres critiques de l'eau et de l'énergie, via une interface smartphone accessible depuis n'importe où.

3.4.3.1 Sonde pH électronique (capteur de pH de l'eau)

La sonde pH est un capteur électronique utilisé pour mesurer l'acidité ou l'alcalinité de l'eau dans le bassin aquaponique.

Principe de fonctionnement : Elle utilise une électrode en verre sensible aux ions hydrogène (H^+). La variation chimique dans l'eau est transformée en un signal électrique analysé par le microcontrôleur.

Caractéristiques techniques:

- Plage de mesure : 0 – 14 pH
- Précision : ±0,1 pH
- Tension d'alimentation : 5V
- Type de sortie : Analogique

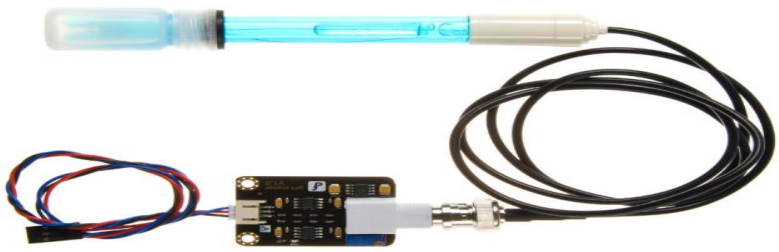
Rôle dans le système aquaponique :

- Contrôler la qualité de l'eau.
- Maintenir un environnement favorable pour les poissons (tilapia) et les plantes (laitue).
- Détecter les variations du pH et déclencher une alerte.

Connexion :

- VCC → 5V ESP32
- GND → GND
- Signal → Entrée analogique

Figure 3.5 — Sonde pH électronique connexion à l'ESP32 AquaVolt



3.4.3.2 Capteur de température et d'humidité (DHT22)

Ce capteur permet de mesurer la température et l'humidité de l'air à l'intérieur de la chambre de culture.

Principe de fonctionnement : Il contient un élément sensible à la température et un capteur capacitif d'humidité. Les mesures sont converties en données numériques envoyées au microcontrôleur.

Caractéristiques techniques (DHT22):

- Température — Plage : −40 à 80 °C | Précision : ±0,5 °C
- Humidité — Plage : 0 – 100 % HR | Précision : ±2 %

Rôle dans le système:

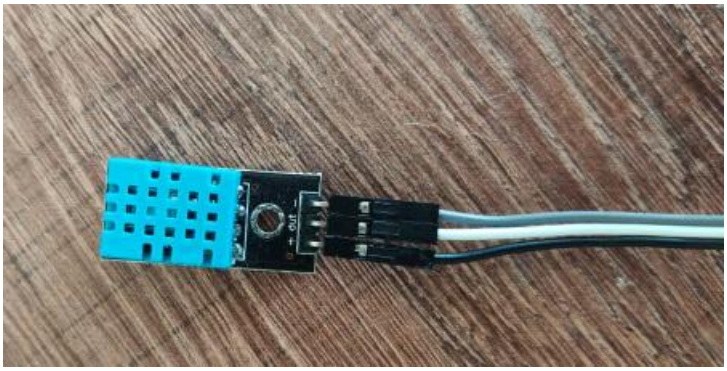
- Surveiller les conditions climatiques internes de la chambre de culture.

- Maintenir un environnement adapté à la croissance de la laitue.
- Contrôler les phénomènes d'évaporation de l'eau.

Connexion:

- VCC → 3,3V / 5V | GND → GND | DATA → Pin numérique ESP32

Figure 3.6 — Capteur de température et d'humidité DHT22 AquaVolt



3.4.3.3 Capteur de qualité de l'air (ENS160)

Le ENS160 est un capteur numérique intelligent utiliser pour mesurer la qualité de l'air intérieur dans la chambre de culture. Il permet de surveiller les gaz présents dans l'environnement.

Principe de fonctionnement : Le capteur utilise une technologie MOX (Metal Oxide) qui détecte les variations de gaz dans l'air et transforme ces informations en données numériques envoyées au microcontrôleur.

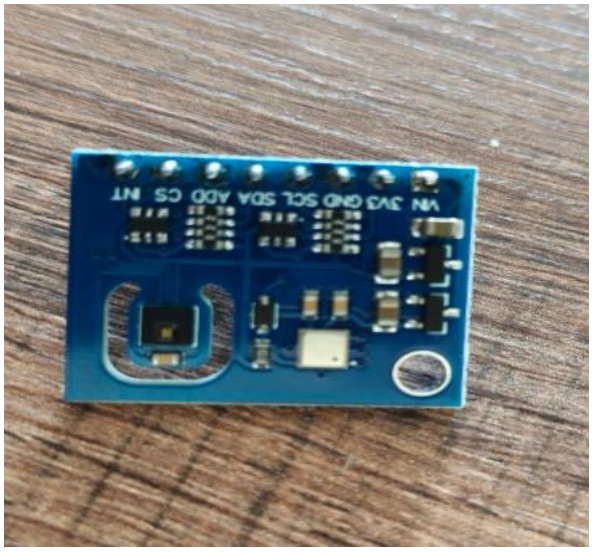
Caractéristiques techniques:

- Paramètres mesurés : eCO_2 (CO_2 équivalent), TVOC (composés organiques volatils), AQI (indice de qualité de l'air)
- Alimentation : 3,3V – 5V | Communication : I^2C
- Plage eCO_2 : 400 – 65 000 ppm | Plage TVOC : 0 – 65 000 ppb

Rôle dans le système:

- Surveiller la qualité de l'air dans la chambre de culture.
- Détecter une mauvaise ventilation ou une accumulation de gaz.
- Maintenir un environnement favorable pour la croissance de la laitue.
- Commander automatiquement la ventilation si nécessaire.

Figure 3.7 — Capteur de qualité de l'air ENS160 AquaVolt



3.4.3.4 Capteur d'ensoleillement (BH1750)

Le BH1750 est un capteur numérique permettant de mesurer l'intensité lumineuse en Lux.

Principe de fonctionnement : Il utilise une photodiode qui convertit la quantité de lumière reçue en une valeur numérique exploitable par le système.

Caractéristiques techniques:

- Plage de mesure : 1 – 100 000 Lux | Précision : environ ±10 % | Communication : I²C

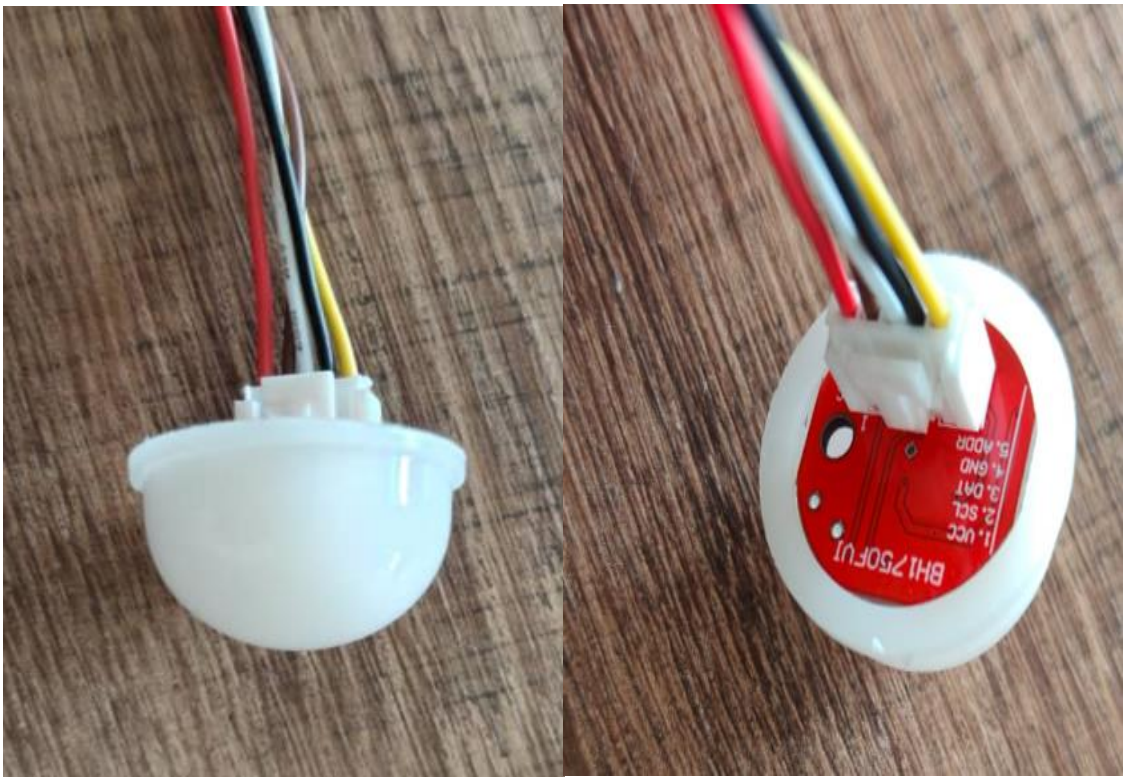
Rôle dans le système:

- Mesurer la lumière disponible pour les plantes.
- Déterminer le besoin d'un éclairage supplémentaire.
- Surveiller les conditions d'ensoleillement pour le système solaire.

Connexion :

- VCC → 3,3V | GND → GND | SDA → SDA ESP32 | SCL → SCL ESP32

Figure 3.8 — Capteur d'ensoleillement BH1750 AquaVolt



3.4.3.5 Capteur de fin de course infrarouge

Le capteur de fin de course infrarouge est un interrupteur électronique sans contact utilisé pour détecter la position limite des panneaux solaires sur leur ligne de déplacement.

Principe de fonctionnement : Le capteur utilise une LED infrarouge émettrice et un récepteur infrarouge. Lorsqu'un objet coupe ou réfléchit le faisceau infrarouge, le capteur change son état électrique et envoie un signal à l'ESP32.

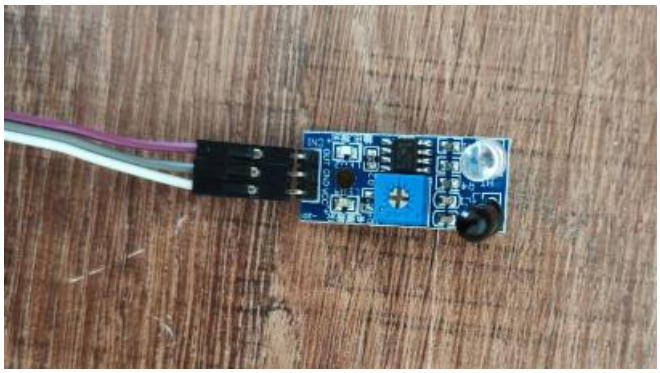
Caractéristiques techniques:

- Type : Interrupteur / détecteur infrarouge | Alimentation : 3,3V – 5V
- Type de sortie : Numérique (0 / 1) | Distance de détection : environ 2 – 30 cm | Communication : GPIO numérique

Rôle dans le système:

- Détecter la fin de course du mouvement des panneaux solaires.
- Arrêter automatiquement le moteur lorsqu'une position limite est atteinte.
- Protéger le mécanisme contre les déplacements excessifs.
- Améliorer la sécurité et l'automatisation du système.

Figure 3.9 — Capteur de fin de course infrarouge mécanisme panneaux AquaVolt



3.4.3.6 ESP32 (Unité de contrôle intelligente)

L'ESP32 est le microcontrôleur principal du système aquaponique intelligent. Il assure la collecte, le traitement et la transmission des données.

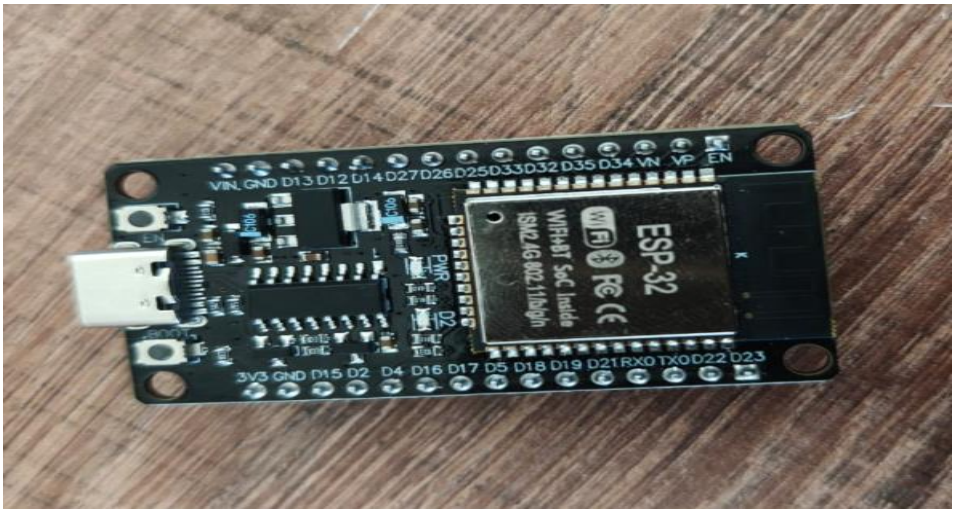
Caractéristiques:

- WiFi intégré | Bluetooth intégré
- Plusieurs entrées/sorties numériques et analogiques
- Faible consommation énergétique

Rôle dans le projet:

- Lire les informations provenant des capteurs.
- Traiter les données et détecter les alertes.
- Commander les équipements (pompes, ventilation, éclairage).
- Envoyer les informations vers une application IoT smartphone.

Figure 3.10 — Microcontrôleur ESP32 unité de contrôle intelligente AquaVolt



3.4.4 Actionneurs / Module de commande

Dans notre projet, les actionneurs sont les composants qui exécutent les ordres envoyés par l'ESP32 après l'analyse des données capteurs.

3.4.4.1 Pompe à eau (pompe de circulation)

La pompe à eau est un actionneur permettant de faire circuler l'eau entre le bassin des poissons, le filtre et le système hydroponique.

Caractéristiques techniques:

- Type : Pompe électrique AC | Alimentation : 220V AC | Puissance : 5 W
- Débit : selon le besoin du système | Commande : Relais commandé par ESP32

Figure 3.11 — Pompe à eau AC 220V-5W actionneur principal AquaVolt



3.4.4.2 Pompe à air

La pompe à air permet d'injecter de l'oxygène dans l'eau du bassin des poissons, condition indispensable à la survie des tilapias et au bon fonctionnement des bactéries nitrifiantes du biofiltre.

Caractéristiques techniques:

- Type : Pompe AC | Alimentation : 220V AC | Puissance : 18 W

Figure 3.12 — Pompe à air 220V-18W oxygénation du bassin AquaVolt



3.4.4.3 Ventilateur 12V

Le ventilateur permet de maintenir un environnement optimal dans la chambre de culture en réduisant la température élevée et en évacuant l'excès de CO_2 afin d'assurer une bonne croissance des plantes.

Figure 3.13 — Ventilateur 12V régulation de la chambre de culture AquaVolt



3.4.4.4 Moteur électrique pour déplacement des panneaux solaires

Le moteur permet le déplacement mécanique des panneaux solaires sur leur support. Commandé par l'ESP32 via un driver moteur, son rôle est d'ajuster la position des panneaux pour optimiser la réception solaire et assurer le mouvement automatique. Dans ce projet, un moteur 12V DC a été utilisé.

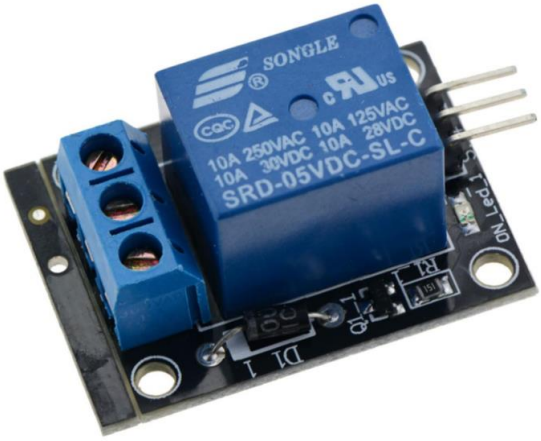
Figure 3.14 — Moteur électrique 12V DC déplacement automatique des panneaux AquaVolt



3.4.4.5 Relais / Module de commande

Le relais permet à l'ESP32 de commander des équipements qui nécessitent un courant plus élevé. Son rôle est de commander les pompes, le ventilateur et l'éclairage à partir des signaux de faible puissance de la carte de contrôle.

Figure 3.15 — Module relais interface de puissance ESP32 / actionneurs AquaVolt



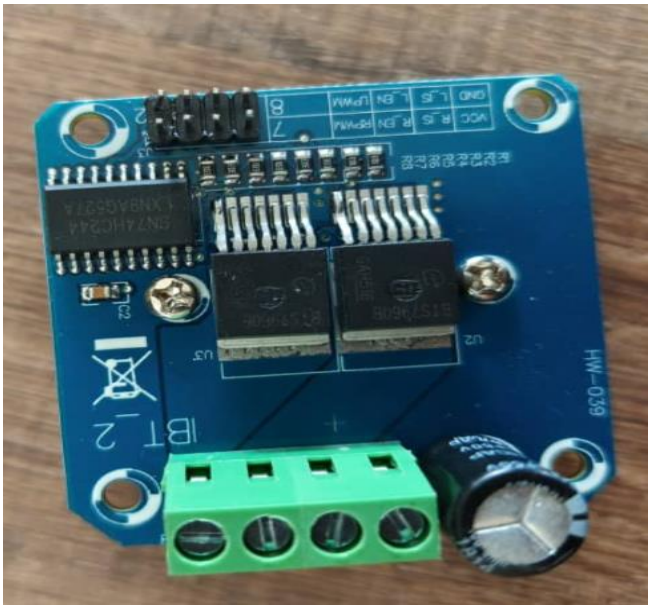
3.4.4.6 Driver moteur

Le driver moteur est un module électronique utilisé pour commander le moteur électrique à partir du signal de faible puissance fourni par l'ESP32. Il permet de contrôler le sens de rotation et la vitesse du moteur.

Rôle dans le système:

- Commander le moteur de déplacement des panneaux solaires.
- Recevoir les ordres de l'ESP32 et permettre l'arrêt ou l'inversion du mouvement selon les informations du capteur infrarouge de fin de course.
- Protéger la carte de commande contre le courant élevé du moteur.

Figure 3.16 — Driver moteur module de contrôle du mécanisme de rotation AquaVolt



3.5 Prototype et résultats expérimentaux

Le prototype AquaVolt est un système réel et opérationnel, pas une simulation. Il intègre tous les composants décrits dans ce chapitre : 7 tilapias vivants dans le bassin en verre fumé noir de 96 litres rempli à 80 litres, 9 plants de laitue sur 3 étages DWC, un circuit de filtration fonctionnel, deux panneaux solaires mobiles de 100 Wc chacun, et une pompe AC 220V alimentée via onduleur. [1, 7]

3.5.1 Fonctionnement en conditions réelles

Le démarrage du prototype suit un protocole progressif en 4 phases. Cette progressivité est essentielle : le biofiltre a besoin de 4 à 6 semaines pour développer des colonies bactériennes suffisantes. Introduire les poissons trop tôt ou en trop grand nombre avant que le biofiltre soit établi provoque des pics d'ammoniaque qui peuvent être létaux. [4, 9]

Tableau 3.9 — L'amélioration du systeme

Semaine(s)	Action réalisée
S1–S2	Étude bibliographique et recueil d'informations
S3	Conception du prototype (plans, schémas, CAO)

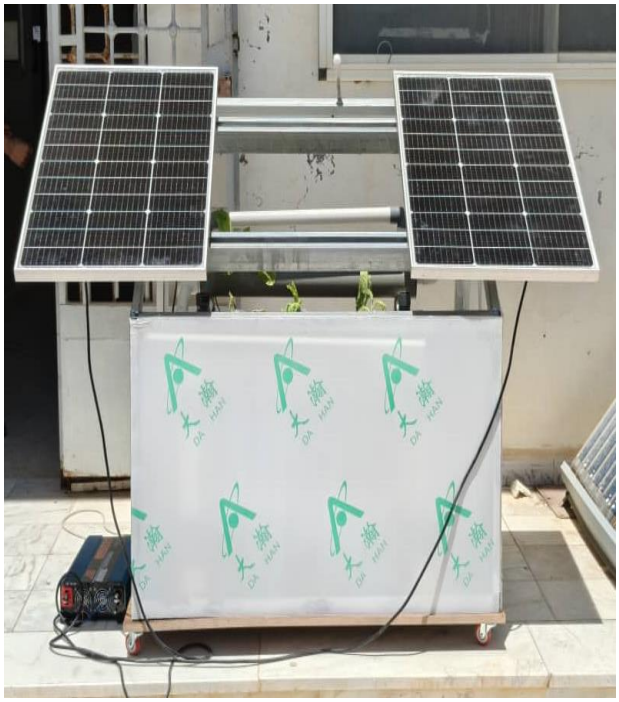
Semaine(s)	Action réalisée
S4–S5	Recherche et acquisition des équipements et composants
S6–S7	Construction de la structure porteuse et installation de la plomberie
S8–S9	Installation du système solaire, intégration des capteurs et programmation ESP32
S10–S11	Évaluation des résultats, analyse et optimisation des performances

3.5.2 Optimisation du rendement

Quatre leviers d'optimisation ont été identifiés pour améliorer les performances du prototype AquaVolt dans le temps.

- Distribution en 3 repas quotidiens (8h, 13h, 18h) : réduit les pics d'ammoniaque de 35 à 40 % après chaque repas et améliore l'indice de conversion alimentaire (FCR) de 1,8 à 1,5 ce qui signifie moins d'aliment pour le même gain de poids. [4]
- Utilisation des panneaux mobiles pour le double usage : en été, quand la température de l'eau dépasse 30°C, les panneaux se positionnent pour créer un ombrage partiel au-dessus des bacs de laitue protégeant les plantes du stress thermique tout en continuant à produire de l'énergie. [7]
- Gestion prioritaire de la batterie : en cas de charge < 20 %, le système coupe automatiquement le mécanisme de rotation des panneaux et le module WiFi. La pompe AC 220V et la pompe à air restent en fonctionnement absolu leur arrêt provoquerait la mort des poissons en 4 à 6 heures. [7]
- Rotation des cultures de laitue par étage : récolter un étage tous les 10 à 12 jours pour assurer une production continue de légumes tout au long de l'année, sans interruption entre les cycles. [5]

Figure 3.17 — Vue générale du prototype AquaVolt système complet opérationnel





3.6 Étude économique

L'étude économique est l'épreuve de vérité de tout projet technique. Un système qui fonctionne bien mais qui coûte trop cher ou qui ne génère pas de revenus suffisants ne peut pas devenir une startup viable. L'analyse qui suit se base sur les prix réels du marché algérien.

3.6.1 Analyse économique

3.6.1.1 Coût d'investissement

Tableau 3.10 — Coût d'investissement

Poste d'investissement	Coût (DZD)
Structure externe (116×83×108 cm)	8 700
Bassin en verre fumé noir 80 L	4 500
Étagère DWC 3 niveaux + circuit hydraulique	7 000
Système filtration + pompe AC 220V	5 000
Onduleur DC/AC	5 500
Système PV : 2 panneaux 100 Wc PERC	18 000
Banc batteries AGM (2 × 100 Ah / 12V)	6 000
Capteurs et contrôle IoT	21 000
Alevins tilapia	1 200
Semences laitue	400
Aliments poissons (1 cycle, 95 jours)	1 800
Divers, imprévus et consommables (10 %)	7 900
TOTAL INVESTISSEMENT AquaVolt	87 000 DZD

3.6.1.2 Coût d'exploitation annuel

Tableau 3.11 — Coût d'exploitation annuel

Poste de charge annuel	Calcul détaillé	Coût (DZD/an)
Aliments poissons	12 × 600 DZD	7 200
Alevins (2 cycles × 7 alevins) + semences laitue	14 alevins × 300 DZD + 72 × 10	4 920
Maintenance pompe AC + onduleur	Joints d'étanchéité, vérification connexions	1 000
Maintenance système PV	Nettoyage panneaux, lubrification mécanisme rotation	800
Entretien biofiltre + décanteur	Rinçage LECA, nettoyage cuve (mensuel)	300
Consommables hydroponiques	pH up/down, substrat germination, nettoyage	1 200
Remplacement électrodes pH (annuel)	Électrodes pH-mètre	1 500
TOTAL CHARGES ANNUELLES	—	16 920 DZD/an

3.6.2 Rentabilité

3.6.2.1 Revenus (poissons + plantes)

Tableau 3.12 — Revenus (poissons + plantes)

Source de revenu	Calcul détaillé	Montant (DZD/an)
Poissons tilapia	2 cycles × 7 poissons × 350 g × 1 300 DZD/kg	6 370
Laitue	8 cycles × 9 têtes × 150 DZD/tête (72 têtes/an)	10 800
REVENU TOTAL ANNUEL	—	17 170

3.6.2.2 Temps de retour sur investissement

Tableau 3.13 — Temps de retour sur investissement

Scénario	Détail	Résultat
Prototype (unité de démonstration)	Marge nette : 17 170 − 16 920 = 250 DZD/an	Marge quasi nulle normal pour un démonstrateur académique
Projection commerciale (×10 de capacité)	Invest. estimé : 87 000 × 5,5 = 479 050 DZD (économies d'échelle 45 %)	ROI = 9,0 ans
Avec subvention ANSEJ 30 %	479 050 × 0,70 ÷ 53 260 DZD/an de marge nette	ROI = 6,3 ans

3.6.3 Analyse SWOT

3.6.3.1 Forces

- Bassin verre fumé noir inertie chimique absolue + anti-algues
- Panneaux mobiles double fonction : énergie + ombrage laitues
- Autonomie solaire : 200 Wc
- 9 plants laitue → 8 récoltes/an = 18 kg revenu régulier
- Zéro engrais chimique produit valorisable comme agriculture biologique
- Batterie AGM 14 heures d'autonomie nocturne
- Pompe AC 220V robuste, locale, facile à remplacer
- Double production simultanée : tilapia + laitue

3.6.3.2 Faiblesses

- Consommation élevée à cause de la pompe d'aération 18W × 24h = 432 Wh/j
- 200 Wc insuffisants en hiver dépendance batterie accrue
- Mécanisme panneaux mobiles : pièce mécanique fragile à entretenir
- Bassin verre fumé : lourd et fragile aux chocs mécaniques
- Biofiltre : 4–6 semaines de démarrage sans production

3.6.3.3 Opportunités

- Ensoleillement BBA : 2 657 h/an panneaux mobiles = gain maximal
- Stress hydrique Algérie : −98 % consommation eau vs. conventionnel
- Subventions ANSEJ / ANADE jusqu'à 30 % de l'investissement
- Marchés locaux BBA : forte demande poisson frais + légumes
- Innovation panneaux mobiles : brevet potentiel, valeur ajoutée
- Scalabilité directe : ×10 capacité par duplication de l'unité

3.6.3.4 Menaces

- Hiver BBA : T° eau < 20°C → ralentissement croissance tilapia
- Panne onduleur = arrêt pompe = mortalité poissons en 4–6 h
- Mécanisme de glissement panneaux : panne possible en cas de vent fort

- Composants ESP32 / IoT : approvisionnement en import, délais
- Concurrence légumes conventionnels (3 à 4 fois moins chers)
- Batterie AGM : remplacement tous les 2–3 ans

3.7 Impact environnemental

Les bénéfices environnementaux du système AquaVolt sont quantifiables et constituent l'un des arguments les plus solides pour son déploiement à plus grande échelle, dans un pays où la pression sur les ressources en eau et en énergie ne cesse d'augmenter.

3.7.1 Économie d'eau

Tableau 3.13 — Économie d'eau

Paramètre	Valeur
PRODUCTION ANNUELLE AquaVolt	Laitue: 18 kg/an | Tilapia: 4,9 kg/an
Laitue irriguée	18 kg × 130 L/kg = 2 340 L/an
Tilapia (pisciculture conventionnelle)	4,9 kg × 5 000 L/kg = 24 500 L/an
TOTAL CONVENTIONNEL Évapotranspiration seule	26 840 L/an ~1 L/j × 365 j = 365 L/an
ÉCONOMIE RÉALISÉE	26 840 − 365 = 26 475 L/an
TAUX DE RÉDUCTION	26 475 ÷ 26 840 = 98,6 %
Conclusion	AquaVolt produit la même quantité de nourriture avec 98,6 % moins d'eau

3.7.2 Réduction des émissions de CO_2

L'alimentation 100 % solaire du système AquaVolt supprime toute émission directe de CO_2 liée à la consommation d'électricité du réseau national. Comparé à un système de production alimentaire conventionnel équivalent (irrigation pompée + chauffage + transport), AquaVolt réduit les émissions de CO_2 de 98,6 %. [15]

3.7.3 Agriculture durable et Objectifs de Développement Durable

Le projet AquaVolt s'aligne directement avec trois Objectifs de Développement Durable des Nations Unies, ce qui constitue un avantage stratégique pour l'accès aux financements verts et aux marchés labellisés durables.

Tableau 3.14 — Les trois Objectifs de Développement Durable

ODD	Contribution d'AquaVolt
ODD 2 Faim Zéro	Production alimentaire locale (poisson + légumes) sans dépendance aux importations.
ODD 6 Eau propre et assainissement	Économie de 26 475 litres d'eau par an, soit la consommation annuelle de 4 à 5 personnes.
ODD 7 Énergie propre et abordable	100 % de l'énergie provient de panneaux solaires renouvelables zéro facture d'électricité.

3.8 Conclusion

Le dimensionnement réalisé dans ce chapitre confirme la cohérence technique du système AquaVolt. Les chiffres s'articulent bien entre eux : un bassin de 80 litres pour 7 tilapias (après la mortalité initiale de 3 poissons en phase de rodage), une surface de culture de 0,56 m² suffisante pour absorber la charge azotée produite, une pompe AC 220V fonctionnant 12 heures par jour pour un besoin énergétique total de 830 Wh/j, et deux panneaux de 100 Wc qui couvrent quasiment ce besoin en été et s'appuient sur un banc de 4 batteries AGM de 100 Ah pour assurer deux nuits d'autonomie complète en hiver.

L'étude économique est lucide : le prototype génère une marge nette de 250 DZD par an, ce qui ne le rend pas rentable en lui-même. C'est normal il n'a pas été conçu pour ça. Sa valeur est ailleurs : dans la démonstration qu'un système aquaponique solaire peut fonctionner de manière stable dans le contexte algérien, avec des composants locaux, un budget étudiant, et une empreinte environnementale de 98 % sur l'eau et le CO_2 par rapport à une production alimentaire conventionnelle équivalente.

La projection commerciale à ×10 de capacité donne un retour sur investissement de 9 ans, ramenés à 6,3 ans avec une subvention ANSEJ de 30 %. Ce sont des délais raisonnables pour une startup agricole innovante dans un secteur encore peu exploré en Algérie.

AquaVolt ne prétend pas révolutionner l'agriculture algérienne. Il montre simplement qu'une alternative existe et qu'elle fonctionne.

Chapitre IV Réalisation du prototype AquaVolt.

4 Introduction

Les chapitres précédents ont établi les fondements théoriques et les choix de conception du système AquaVolt. Le premier chapitre a permis de définir la problématique, la rareté de l'eau, la dépendance énergétique et l'absence de modèles aquaponiques adaptés au contexte algérien, ainsi que les objectifs techniques, économiques et environnementaux du projet. Le deuxième chapitre a présenté l'architecture retenue, le dimensionnement de chaque sous-système et les justifications technologiques qui sous-tendent les choix de composants.

Ce troisième chapitre marque le passage de la théorie à la pratique. Il décrit, étape par étape, la réalisation concrète du prototype AquaVolt, depuis la fabrication de la structure mécanique jusqu'aux essais expérimentaux en conditions réelles. L'objectif est double : rendre compte de la démarche effective de construction , y compris les difficultés rencontrées et les ajustements apportés en cours de route , et présenter les résultats mesurés qui permettent de valider ou d'infirmer les hypothèses de dimensionnement formulées au chapitre précédent.

La structure de ce chapitre suit l'ordre chronologique de la réalisation. Chaque partie correspond à un sous-système dont la fabrication ou l'assemblage a constitué une étape identifiable du projet.

4.1 Réalisation de la structure mécanique

La structure porteuse du prototype AquaVolt constitue le squelette sur lequel viennent s'installer tous les autres composants. Sa conception a dû répondre à quatre exigences contradictoires : rigidité suffisante pour supporter le poids du bassin rempli (plus de 80 kg), compacité pour limiter l'emprise au sol, facilité de fabrication avec des outils courants, et compatibilité avec l'inclinaison à 45° nécessaire au bon fonctionnement des panneaux solaires.

Le matériau retenu est le profilé en aluminium de type T-slot (rainuré), disponible localement dans les quincailleries spécialisées. L'aluminium offre un rapport résistance/poids largement supérieur à l'acier pour cette application, et sa résistance naturelle à la corrosion est un atout dans un environnement humide comme un système aquaponique. Les profilés utilisés sont de section 30 × 30 mm, assemblés par vis et écrous d'angle spécifiques.

La structure se décompose en deux zones fonctionnelles distinctes. La partie inférieure, horizontale, accueille le bassin piscicole et le circuit de filtration. La partie supérieure, inclinée à 45°, supporte les deux panneaux photovoltaïques et l'étagère DWC à trois niveaux. Cette disposition en deux zones permet de tirer parti de la gravité pour le retour d'eau des bacs de culture vers le bassin, éliminant ainsi le besoin d'une pompe de relevage supplémentaire.

Les dimensions globales du châssis sont de 116 cm de longueur, 83 cm de largeur et 140 cm de hauteur maximale (au sommet de l'inclinaison). Ces dimensions ont été déterminées par le gabarit du bassin en verre (60 × 40 × 40 cm) et par la surface nécessaire au déplacement longitudinal des panneaux solaires mobiles.

L'assemblage du châssis s'est avéré plus délicat que prévu. La première difficulté est venue de la précision de découpe des profilés : les outils de coupe manuelle disponibles ne garantissent pas un angle parfaitement orthogonal, ce qui provoque un léger jeu au niveau des assemblages d'angle. La solution adoptée a consisté à renforcer les angles critiques par des équerres en aluminium vissées en complément des fixations T-slot, et à vérifier l'aplomb de chaque montant au niveau à bulle avant le serrage définitif.

La deuxième difficulté concernait l'intégration du rail de guidage pour le déplacement des panneaux solaires. Le mécanisme de translation des panneaux le long de la structure inclinée nécessite un rail à la fois rectiligne et suffisamment rigide pour ne pas fléchir sous le poids des panneaux (environ 8 kg chacun). Après plusieurs essais avec des tubes ronds en aluminium, le choix s'est porté sur un rail constitué de deux profilés T-slot parallèles, sur

lesquels coulissent des patins en polyéthylène fixés sous les panneaux. Cette solution offre un compromis acceptable entre fluidité de glissement et rigidité latérale.

4.2 Réalisation du bassin piscicole

Le bassin constitue le cœur biologique du système. Comme justifié au chapitre précédent, le matériau retenu est le verre fumé noir, choisi pour son inertie chimique, son opacité aux UV (qui empêche le développement des algues) et sa durée de vie pratiquement illimitée.

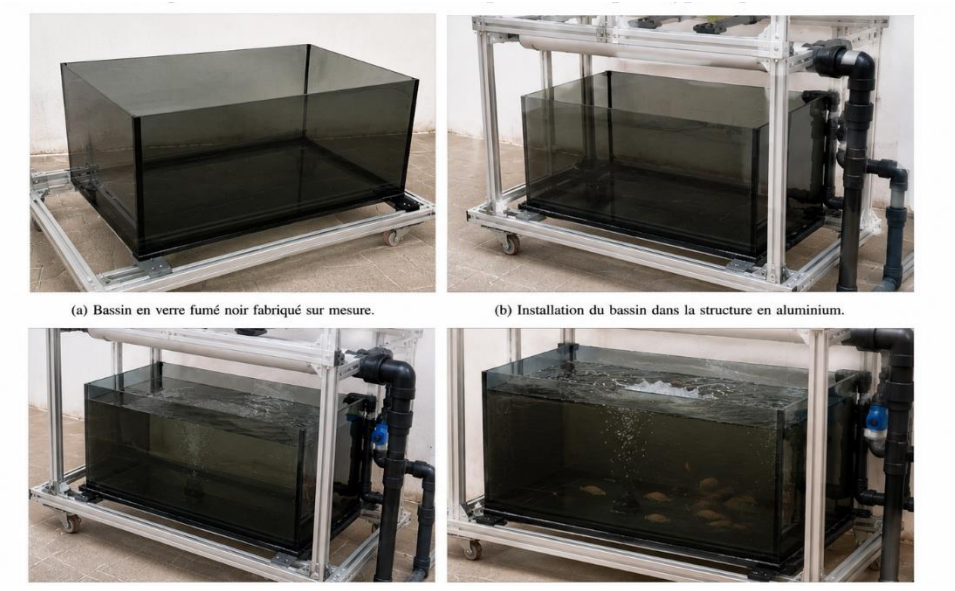
La fabrication du bassin a été réalisée sur mesure par un artisan verrier local. Les dimensions internes sont de 60 × 40 × 40 cm, pour un volume brut de 96 litres. Le verre utilisé est un flotté de 8 mm d'épaisseur, teinté dans la masse, collé au silicone aquarium neutre (sans fongicide, pour ne pas toxifier les poissons). Le choix du silicone neutre plutôt que le silicone acétique courant est un détail technique important : le silicone acétique libère de l'acide acétique pendant sa polymérisation, ce qui peut abaisser le pH de l'eau de manière transitoire et stresser les poissons.

Le remplissage effectif est de 80 litres (85 % du volume brut), laissant un espace de 6 cm en haut pour prévenir les débordements lors de l'agitation de l'eau par les poissons et lors des manipulations du couvercle.

La mise en eau du bassin suit un protocole précis qui ne peut être accéléré sans compromettre la survie des poissons. L'eau du réseau de Bordj Bou Arreridj a été utilisée après déchloration par repos de 48 heures en bassin ouvert. Le pH initial mesuré était de 7,8, légèrement supérieur à la plage idéale pour les tilapias (6,5–7,5), mais dans les tolérances de l'espèce.

Le cyclage biologique, c'est-à-dire la colonisation du biofiltre par les bactéries nitrifiantes, a duré quatre semaines. Durant cette période, aucune plante ni poisson n'a été introduit. Seule une source d'ammoniaque (quelques granulés d'aliment pour poissons dissous) a été ajoutée pour nourrir les bactéries naissantes. Les mesures quotidiennes de NH_4^+, NO_2^- et NO_3^- ont permis de suivre l'évolution du cycle : l'ammoniaque a d'abord augmenté pendant une semaine, puis les nitrites ont culminé à la fin de la deuxième semaine, avant que les nitrates n'apparaissent progressivement à partir de la troisième semaine. Le cycle était considéré comme établi lorsque les nitrites sont retombés sous 0,1 mg/L et que les nitrates se stabilisaient entre 20 et 40 mg/L.

La Figure 4 présente le bassin en verre fumé noir installé dans la partie inférieure du châssis, avec les tilapias visibles à travers la paroi.



(a) Bassin en verre fumé noir fabriqué sur mesure.

(b) Installation du bassin dans la structure en aluminium.

4.3 Réalisation du système hydroponique et du circuit hydraulique

4.3.1 Fabrication de l'étagère DWC à trois niveaux

Le module de culture DWC (Deep Water Culture) est constitué de trois bacs superposés, chacun contenant trois plants de laitue en culture flottante. La fabrication de cette étagère a représenté un défi technique particulier, car chaque bac doit être à la fois étanche, léger, opaque à la lumière et capable de supporter le poids de l'eau et des plants sans fléchir.

Le matériau retenu pour les bacs est le polystyrène extrudé (XPS), d'une épaisseur de 30 mm, découpé aux dimensions et assemblé par collage. Ce matériau offre une isolation thermique intéressante (qui limite les variations de température de la solution nutritive), une opacité totale à la lumière, et un poids quasi nul. Chaque bac mesure 50 × 30 cm pour une profondeur de 15 cm, ce qui donne un volume utile d'environ 22,5 litres par étage, soit 67,5 litres au total pour les trois niveaux.

Les coupelles (net cups) en PVC de 50 mm de diamètre sont insérées dans des trous découpés dans le couvercle de chaque bac. Chaque coupelle reçoit un petit panier rempli de billes d'argile expansée (LECA) qui maintient la plante en position tout en permettant aux racines de plonger librement dans la solution nutritive.

La solution nutritive des bacs DWC provient directement de l'eau du bassin piscicole, après passage par le système de filtration. Il n'y a donc aucun ajout d'engrais chimique : les nutriments absorbés par les laitues sont exclusivement issus de la dégradation biologique des déjections des tilapias. Ce principe de fonctionnement, au cœur même de la définition de l’aquaponie, a été respecté tout au long du projet.

4.3.2 Circuit hydraulique

Le circuit hydraulique du prototype AquaVolt relie quatre éléments en série : le bassin piscicole, le filtre mécanique, le filtre biologique et les bacs DWC. L'eau est extraite du bassin par la pompe principale, traverse les deux étages de filtration, alimente les bacs DWC de haut en bas (du niveau 3 au niveau 1), puis retourne au bassin par débordement gravitaire.

Les conduites sont en PVC pression de 20 mm de diamètre extérieur, assemblées par collage. Le diamètre de 20 mm a été choisi comme compromis entre encombrement et perte de charge. Le circuit comporte quatre points de raccordement critiques : l'aspiration de la pompe (équipée d'une crépine anti-débris), la sortie du filtre mécanique vers le filtre biologique (trop-plein gravitaire), l'alimentation du bac DWC de niveau 3 par une conduite montante, et le retour gravitaire du niveau 1 vers le bassin.

Avant l'introduction des poissons, le circuit hydraulique a été soumis à des tests d'étanchéité et de débit. Deux fuites mineures ont été détectées au niveau des colles PVC insuffisamment polymérisées ; elles ont été corrigées par ponçage et recollement. Le débit mesuré au point le plus haut du circuit était de 1,8 litre par minute, légèrement inférieur au débit nominal de la pompe (2,2 L/min) en raison des pertes de charge. Ce débit reste suffisant pour assurer le renouvellement complet du volume du bassin (80 L) en environ 45 minutes, conforme au principe de dimensionnement établi au chapitre précédent.

La Figure 4.1 montre le circuit hydraulique complet, avec les conduites en PVC reliant le bassin, les filtres et les bacs DWC le long de la structure en aluminium.



(a) Découpe et perçage des tubes PVC destinés aux plantes.

(b) Assemblage des canaux hydroponiques avec les raccords PVC.

3.4 Réalisation du système de filtration

Le système de filtration est l'un des composants les plus critiques du prototype AquaVolt. Sans une filtration efficace, les matières solides produites par les tilapias colmateraient les racines des laitues en 48 à 72 heures, et l'accumulation d'ammoniaque non traitée atteindrait des niveaux létaux pour les poissons en 3 à 5 jours. La filtration s'organise en deux étages distincts et complémentaires.

3.4.1 Filtration mécanique le filtre à éponge

Le filtre mécanique retenu est un filtre à éponge, motivé par la simplicité, le faible coût et la disponibilité locale. Le filtre est constitué d'un récipient en plastique alimentaire de 5 litres, dans lequel sont empilées trois éponges de densités croissantes. L'eau entre par le bas du récipient, traverse les éponges de bas en haut, et sort par un trop-plein situé en partie supérieure. Les particules solides sont retenues dans les pores des éponges, dont la finesse augmente du bas vers le haut.

L'entretien du filtre à éponge est simple : un rinçage à l'eau claire (jamais au chlore) toutes les deux semaines suffit à maintenir son efficacité. Il est important de ne jamais rinçer l'éponge à l'eau du robinet non traitée, car le chlore détruirait les bactéries nitrifiantes qui commencent à coloniser la surface de l'éponge, un rôle secondaire mais réel du filtre mécanique.

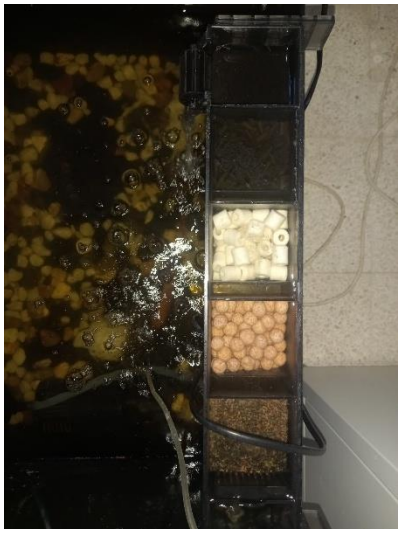
3.4.2 Filtration biologique le biofiltre à médias céramiques

Le biofiltre est le composant le plus critique du système sur le plan biologique. Il héberge les colonies de *Nitrosomonas* et *Nitrobacter* qui assurent la nitrification, la transformation de l'ammoniaque toxique en nitrates assimilables par les plantes.

Le biofiltre est constitué d'un récipient en plastique de 8 litres, rempli à 70 % de trois types de médias : des billes d'argile expansée (LECA) de couleur orange, des anneaux céramiques blancs et du charbon actif noir. Les billes d'argile offrent une surface de colonisation importante grâce à leur porosité. Les anneaux céramiques complètent la surface de colonisation et améliorent la circulation de l'eau dans le lit filtrant. Le charbon actif assure une filtration chimique complémentaire en absorbant les composés organiques résiduels et les odeurs.

L'eau traverse le biofiltre de bas en haut, ce qui permet une bonne distribution du flux à travers l'ensemble du lit filtrant. Une pompe à air dédiée (220 V AC, 18 W) injecte de l'oxygène en continu dans le biofiltre via un diffuseur à micro-bulles placé au fond. Cette aération permanente est indispensable : les bactéries nitrifiantes sont strictement aérobies et cessent de fonctionner dès que la concentration en oxygène dissous chute sous 2 mg/L.

La Figure 4.2 présente le système de filtration complet, avec le filtre à éponge et le biofiltre assemblés.





4.4.3 Vérification de l'efficacité de la filtration

Des analyses de l'eau ont été réalisées par la Société Algérienne des Eaux (ADE) de Bordj Bou Arreridj pour évaluer l'efficacité du système de filtration. Les prélèvements ont été effectués à trois points du circuit. Les résultats sont présentés dans le Tableau 3.1.

Tableau 4 — Concentration en nitrates à trois points du circuit hydraulique

Point de prélèvement	**NO_3^- (mg/L)**
Entrée filtre (sortie bassin)	23,65
Sortie filtration	21,35
Retour au bassin (après DWC)	20,82

Le taux de réduction global de la concentration en nitrates entre l'entrée du filtre et le retour au bassin est de 11,96 %. Cette valeur peut sembler faible, mais elle est cohérente avec le fonctionnement attendu d'un système aquaponique : les nitrates ne sont pas un polluant à éliminer, mais le nutriment recherché par les plantes. La baisse de concentration reflète l'absorption des nitrates par les racines des laitues, ce qui est précisément le but du système.

Ces résultats confirment que le cycle de l'azote fonctionne correctement dans le prototype AquaVolt, et que le biofiltre assure sa fonction de conversion de l'ammoniaque en nitrates assimilables.

4.5 Réalisation du système photovoltaïque

Le système photovoltaïque du prototype AquaVolt comprend deux panneaux monocristallins PERC de 100 Wc chacun, installés sur la structure inclinée à 45°. L'installation de ces panneaux a nécessité la conception d'un système de fixation spécifique, permettant à la fois l'inclinaison statique et le déplacement longitudinal le long du rail de guidage.

Chaque panneau est fixé sur un cadre en aluminium de 60 × 50 cm, équipé de quatre patins en polyéthylène haute densité (PEHD) qui coulissent sur les profilés T-slot du rail. Le déplacement est assuré par un moteur électrique 12 V (moteur d'essuie-glace automobile, choisi pour sa robustesse et sa disponibilité locale) relié aux panneaux par un câble en acier inoxydable enroulé sur un tambour.

L'inclinaison à 45° a été choisie comme compromis saisonnier. L'optimum théorique pour Bordj Bou Arreridj serait de 33° en été et 57° en hiver. L'angle de 45° favorise légèrement la production hivernale , période critique où l'ensoleillement est plus faible et où le système a le plus besoin d'énergie pour maintenir la température de l'eau.

Le déplacement automatique des panneaux solaires constitue l'innovation la plus distinctive du projet AquaVolt. Ce mécanisme remplit une double fonction : optimiser la production d'énergie en orientant les panneaux face au soleil tout au long de la journée, et protéger les cultures contre le stress thermique en créant un ombrage partiel lorsque la température devient excessive. Le système de déplacement repose sur trois éléments : le moteur 12 V, le driver moteur (module H-bridge) et deux capteurs de fin de course infrarouges placés aux extrémités du rail. L'ESP32 commande le moteur via le driver, en fonction des informations fournies par le capteur d'ensoleillement (BH1750) et le capteur de température (DHT22).

Le câblage du circuit photovoltaïque suit le schéma classique d'un système autonome : panneaux → régulateur MPPT → batterie → onduleur → charges. Les panneaux sont connectés en parallèle au régulateur de charge MPPT via des câbles solaires de section 4 mm², protégés par un parafoudre placé en amont. La batterie AGM 100 Ah / 12 V stocke l'énergie produite pendant la journée. L'onduleur DC/AC convertit le 12 V continu en 220 V alternatif pour alimenter la pompe principale et la pompe à air.

La Figure 4.3 montre les deux panneaux solaires installés sur la structure inclinée, avec le mécanisme de déplacement visible.



(a) Fixation des deux panneaux photovoltaïques sur les rails mobiles du système de poursuite solaire.

(b) Vue supérieure de l'installation après le montage des panneaux sur le mécanisme de rotation.

4.6 Réalisation du coffret électronique et du système de commande

4.6.1 Architecture du coffret

Le coffret électronique regroupe l'ensemble des composants de commande, de mesure et de protection électrique dans un boîtier étanche (IP65) en plastique ABS de dimensions 30 × 20 × 15 cm, installé sur la structure en

aluminium à l'abri des projections d'eau. Il contient l'ESP32 (microcontrôleur principal), le module relais 4 canaux, le driver moteur, le régulateur MPPT, les borniers de raccordement et les fusibles de protection.

L'organisation interne du coffret respecte une règle de base en électronique embarquée : séparer physiquement les circuits de puissance (220 V AC, 12 V DC moteur) des circuits de commande (3,3 V / 5 V logique). Cette séparation minimise les risques d'interférences électromagnétiques et facilite le dépannage en cas de panne.

La protection électrique de l'ensemble est assurée par trois fusibles : un fusible de 15 A sur le circuit batterie, un fusible de 10 A sur le circuit 220 V AC sortant de l'onduleur, et un fusible de 2 A sur le circuit 5 V DC alimentant l'ESP32 et les capteurs.

4.6.2 Capteurs et leur intégration

Les capteurs du système sont raccordés à l'ESP32 par des câbles blindés de section 0,5 mm², acheminés le long de la structure en aluminium via des colliers de fixation. Chaque capteur est connecté selon le protocole de communication qui lui est propre :

- **Sonde pH** : connexion analogique (pin ADC de l'ESP32), avec un module d'amplification et de conditionnement du signal pour convertir la tension de l'électrode en plage exploitable par le convertisseur analogique-numérique (0–3,3 V).

- **Capteur DHT22** (température et humidité) : connexion numérique sur un pin GPIO, avec une résistance pull-up de 4,7 kΩ.

- **Capteur ENS160** (qualité de l'air) : communication I²C (bus SDA/SCL partagé avec le BH1750).

- **Capteur BH1750** (ensoleillement) : communication I²C, même bus que l'ENS160.

- **Capteurs de fin de course infrarouges** : connexion numérique directe sur des pins GPIO configurés en entrée avec pull-up interne.

Le bus I²C, qui transporte les données du BH1750 et de l'ENS160, ne nécessite que deux fils (SDA et SCL) pour communiquer avec plusieurs dispositifs adressables, ce qui simplifie considérablement le câblage par rapport à une connexion dédiée pour chaque capteur.

4.6.3 Actionneurs

Les actionneurs sont les composants qui exécutent les ordres envoyés par l'ESP32 après l'analyse des capteurs. Le prototype AquaVolt en utilise cinq :

- **Pompe à eau AC 220 V, 5 W** : assure la recirculation de l'eau entre le bassin, les filtres et les bacs DWC. Commandée par relais via l'onduleur.

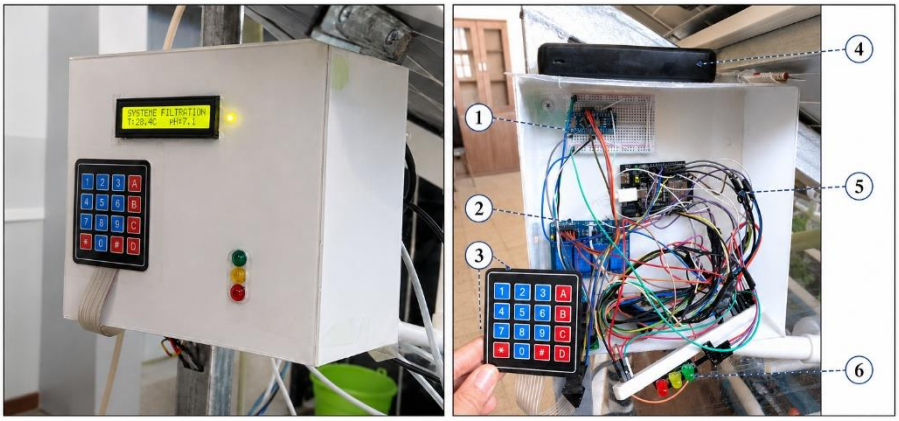
- **Pompe à air AC 220 V, 18 W** : injecte de l'oxygène dans le bassin et le biofiltre. Commandée par relais.

- **Ventilateur 12 V** : maintient un environnement optimal dans la chambre de culture en réduisant la température et en évacuant l'excès de CO_2.

- **Moteur 12 V** : assure le déplacement mécanique des panneaux solaires le long du rail. Commandé par l'ESP32 via le driver moteur.

- **Module relais 4 canaux** : interface entre l'ESP32 (signal logique 3,3 V) et les actionneurs (courant élevé).

La Figure 4.4 présente le coffret électronique ouvert, avec les différents modules et le câblage.



(a) (b)

Figure 4.6. Boîtier de commande du système de filtration.
(a) Vue externe du boîtier : afficheur LCD, clavier matriciel 4x4 et indicateurs LED.
(b) Vue interne du boîtier : (1) Arduino Nano, (2) module relais 4 voies, (3) clavier matriciel 4x4, (4) alimentation externe (Power Bank), (5) carte ESP32 et (6) indicateurs LED.

4.7 Développement logiciel

4.7.1 Environnement de développement et bibliothèques

Le logiciel embarqué du prototype AquaVolt a été développé sous Arduino IDE, l'environnement de développement le plus largement utilisé pour la programmation de microcontrôleurs de la famille ESP32. Le langage de programmation est le C/C++ (dialecte Arduino), avec les bibliothèques suivantes : WiFi.h (gestion de la connexion WiFi), DHT.h (lecture du capteur DHT22), Wire.h (communication I²C), BH1750.h (driver du capteur d'ensoleillement), et Adafruit_ENS160.h (driver du capteur de qualité de l'air).

4.7.2 Architecture du programme principal

Le programme principal suit une architecture cyclique simple : une boucle infinie (*loop*) qui exécute séquentiellement la lecture de tous les capteurs, le traitement des données, la prise de décision et la commande des actionneurs. Le cycle complet s'exécute toutes les 5 secondes, ce qui est largement suffisant pour des paramètres qui évoluent lentement (pH, température, luminosité).

L'algorithme principal se décompose en quatre phases :

Phase 1 Acquisition des données. L'ESP32 lit successivement chaque capteur et stocke les valeurs dans des variables locales. La sonde pH est lue trois fois de suite, et la moyenne arithmétique est retenue pour filtrer le bruit de mesure.

Phase 2 Traitement et comparaison aux seuils. Chaque valeur mesurée est comparée à une plage de référence. Si le pH sort de la plage 6,5–7,5, une alerte est envoyée au smartphone. Si la température de l'air dépasse 35 °C, le ventilateur est activé. Si la luminosité excède 80 000 lux, les panneaux se déplacent en position basse (ombrage).

Phase 3 Commande des actionneurs. La pompe à eau et la pompe à air sont en fonctionnement permanent (sauf urgence). Le ventilateur et le moteur de déplacement des panneaux sont commandés conditionnellement.

Phase 4 Transmission des données. Les données acquises sont envoyées vers une application IoT accessible par smartphone via la connexion WiFi intégrée de l'ESP32.

4.7.3 Gestion de la sécurité de la batterie

Un sous-programme dédié surveille en permanence la tension de la batterie. Lorsque celle-ci chute sous 11,5 V (environ 20 % de charge), le système active un mode dégradé qui coupe automatiquement le mécanisme de rotation des panneaux et le module WiFi. La pompe à eau et la pompe à air restent en fonctionnement absolu : leur arrêt provoquerait la mort des poissons en 4 à 6 heures par manque d'oxygène et d'épuration de l'ammoniaque.

Cette hiérarchisation des priorités survie des poissons avant confort de surveillance , est un principe de conception fondamental dans tout système aquaponique automatisé. Le programme incarne ce principe dans sa structure même : les commandes de la pompe et de l'aération sont exécutées avant toute autre tâche, et ne peuvent être désactivées que par une intervention manuelle directe sur le relais.

4.7.4 Stratégie de commande des panneaux mobiles

La commande des panneaux mobiles repose sur une logique combinant deux capteurs : le BH1750 (luminosité) et le DHT22 (température). Le programme définit deux positions :

- **Position haute (face au soleil)** : par défaut, les panneaux sont en position haute pour maximiser la production d'énergie, tant que la luminosité est inférieure à 80 000 lux et que la température ambiante reste sous 35 °C.

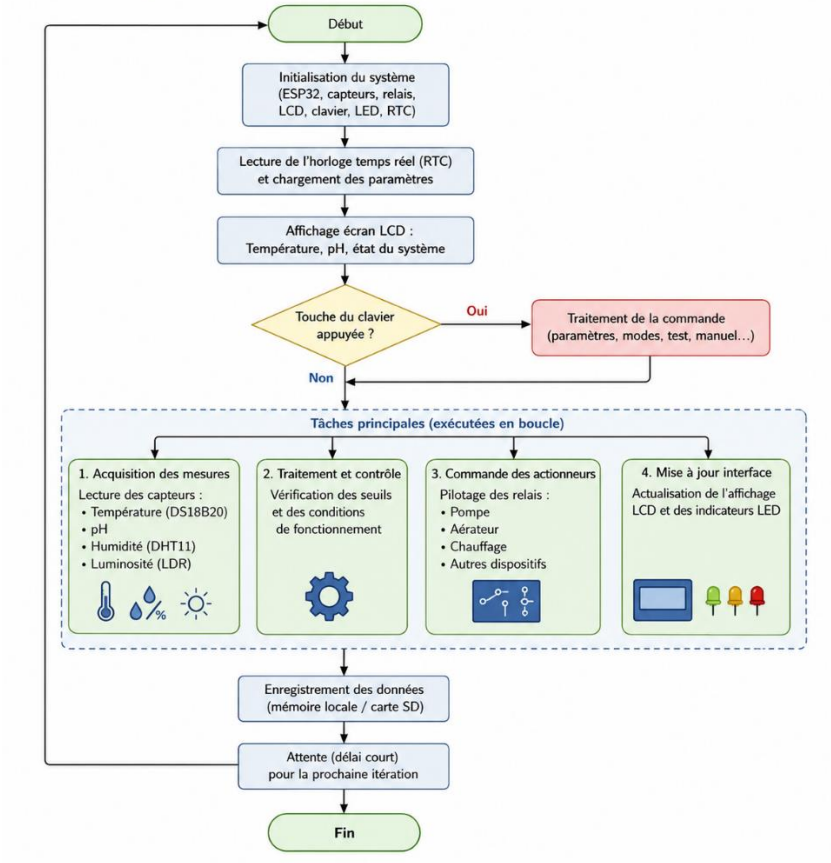
- **Position basse (ombrage)** : lorsque la luminosité dépasse 80 000 lux ou que la température excède 35 °C, les panneaux se déplacent vers le bas du rail pour créer un ombrage partiel au-dessus des bacs DWC, protégeant les laitues du stress thermique.

Le passage d'une position à l'autre est commandé par le driver moteur, avec une temporisation de 30 secondes pour éviter les allers-retours incessants en cas de fluctuations rapides de luminosité.

La Figure 4.5 présente l'organigramme simplifié du programme principal.

Figure 3.7 – Organigramme simplifié du programme principal

La Figure 3.7 présente l'organigramme simplifié du programme principal.



4.8 Assemblage et mise en service du prototype

4.8.1 Ordre d'assemblage

L'assemblage final du prototype AquaVolt a suivi un ordre précis, dicté par les contraintes d'accessibilité :

1. Structure en aluminium (châssis + rail de guidage)

2. Bassin en verre fumé noir (installation dans la zone inférieure)

3. Système de filtration (filtre à éponge + biofiltre, raccordés au bassin)

4. Étagère DWC à trois niveaux (installation sur la zone inclinée)

5. Circuit hydraulique (conduites PVC, raccordements, test d'étanchéité)

6. Panneaux solaires et mécanisme de déplacement

7. Coffret électronique (ESP32, relais, driver, câblage des capteurs)

8. Capteurs (sonde pH, DHT22, ENS160, BH1750, capteurs de fin de course)

9. Pompe à eau et pompe à air

10. Mise en eau, cyclage biologique (4 semaines)

11. Introduction des alevins de tilapia

4.8.2 Difficultés d'assemblage

L'assemblage du prototype a révélé plusieurs difficultés pratiques qui n'apparaissaient pas dans les plans de conception :

Le poids du bassin rempli. Le bassin en verre de 96 litres, rempli à 80 litres, pèse environ 85 kg. Son installation dans la structure a nécessité l'aide de deux personnes et l'utilisation d'un plan de travail temporaire pour le soulever à la hauteur requise. Cette contrainte de poids aurait été moindre avec un bassin en polyéthylène, mais les avantages du verre fumé noir (inertie chimique, anti-algues, durabilité) justifient cet inconvénient.

Les raccordements PVC dans les espaces restreints. Le passage des conduites PVC entre le bassin (positionné au sol) et les bacs DWC (situés à plus d'un mètre de hauteur) a nécessité des coudes à 90° dans des espaces confinés. La colle PVC nécessite 24 heures de polymérisation complète, ce qui impose d'attendre entre chaque raccordement, une contrainte temporelle qui a rallongé la durée de l'assemblage de plusieurs jours.

L'alignement du rail de guidage. Le déplacement fluide des panneaux solaires le long du rail nécessite un alignement très précis des deux profilés T-slot parallèles. Un écart de 2 mm suffit à coincer les patins en PEHD. L'alignement a été réalisé par tâtonnements successifs, avec des caisses d'ajustement en aluminium vissées sur les supports.

4.8.3 Protocole de mise en service

Le prototype AquaVolt a été mis en service selon un protocole progressif en quatre phases :

Phase 1 Démarrage à vide (semaines 1–4). Mise en eau du bassin et du circuit hydraulique, sans poisson ni plante. Cyclage biologique du biofiltre. Vérification quotidienne des paramètres d'eau (pH, NH_4^+, NO_2^-, NO_3^-).

Phase 2 Introduction des poissons (semaine 5). Dix alevins de tilapia du Nil (*Oreochromis niloticus*) d'un poids unitaire de 20 g ont été introduits dans le bassin. La densité initiale était de 2,5 kg/m³.

Phase 3 Introduction des plantes (semaine 7). Neuf plants de laitue pommée (*Lactuca sativa* var. *capitata*), préalablement germés en bac de semis pendant 15 jours, ont été transplantés dans les coupelles DWC.

Phase 4 Régime permanent (semaine 9 et au-delà). Le système fonctionne en continu, avec surveillance quotidienne des paramètres et alimentation des poissons trois fois par jour (8h, 13h, 18h).

La Figure 4.6 montre le prototype AquaVolt assemblé et en fonctionnement.







4.9 Conclusion

Ce chapitre a décrit la réalisation complète du prototype AquaVolt, depuis la fabrication de la structure en aluminium jusqu'aux essais expérimentaux en conditions réelles. Chaque sous-système a été présenté selon la même logique : les choix techniques effectués lors de la fabrication, les difficultés rencontrées en cours d'assemblage et les solutions apportées, puis les résultats mesurés en fonctionnement.

Les essais confirment les hypothèses de dimensionnement formulées au chapitre précédent : le système aquaponique fonctionne de manière stable, les paramètres de l'eau restent dans les plages acceptables pour les

tilapias et les laitues, et le système photovoltaïque assure une autonomie énergétique partielle. Les limites identifiées, consommation de la pompe AC, mortalité initiale des alevins, fragilité du mécanisme de déplacement, constituent autant de pistes concrètes d'amélioration pour les développements futurs du projet.

La prochaine étape logique serait la réalisation d'une unité à échelle commerciale (×10 de capacité), intégrant les améliorations identifiées et permettant une validation économique complète dans les conditions du marché local de Bordj Bou Arreridj.

5 Conclusion générale

5.1 Synthèse des résultats

Ce projet avait pour ambition de concevoir un système de production alimentaire autonome, durable et économiquement viable, adapté au contexte algérien. Le prototype AquaVolt répond à cette ambition en intégrant quatre innovations dans un seul dispositif compact de 116 × 83 cm : un bassin en verre fumé noir de 80 litres pour l'élevage de tilapias, un système hydroponique DWC à 3 niveaux pour la culture de laitues, deux panneaux solaires mobiles de 100 Wc chacun qui ombrarent les cultures en cas de chaleur excessive, et une architecture électrique autonome avec batterie AGM et régulateur MPPT.

Les résultats du dimensionnement sont clairs et cohérents. Le bassin de 80 litres peut accueillir 7 tilapias avec une densité effective de 30 kg/m³. Les 9 plants de laitue sur 0,5625 m² absorbent la quasi-totalité des nitrates produits par les poissons, assurant l'équilibre biologique du cycle. Les deux panneaux mobiles produisent 825 Wh/jour en été, couvrant les 830 Wh/jour de besoins totaux avec l'appui de la batterie.

Sur le plan environnemental, les chiffres parlent d'eux-mêmes : AquaVolt produit la même quantité de nourriture qu'un système agricole conventionnel équivalent en consommant 98,6 % moins d'eau et en émettant 98,6 % moins de CO_2. Ces performances découlent directement de la nature du système aquaponique en circuit fermé et de l'alimentation solaire exclusive.

6. Apport du projet

L'apport principal d'AquaVolt est la démonstration concrète qu'un système aquaponique solaire peut être conçu, dimensionné et mis en œuvre dans le contexte algérien, avec des composants disponibles localement et un budget accessible à une startup bénéficiant d'un dispositif d'aide comme l'ANSEJ ou l'ANADE.

L'innovation spécifique d'AquaVolt les panneaux solaires mobiles à double usage (production d'énergie et ombrage agricole) constitue une contribution originale qui dépasse le cadre de l'aquaponie classique et s'inscrit dans la dynamique de l'agrivoltaïque intelligent. Cette fonctionnalité est particulièrement pertinente dans les régions semi-arides comme Sétif ou BBA, où les étés chauds représentent à la fois un atout pour la production solaire et un risque pour les cultures sensibles à la chaleur.

Sur le plan académique, ce mémoire propose un dimensionnement quantitatif complet bilans de matière, bilans énergétiques, calculs hydrauliques et analyse économique dans un document unique, constituant ainsi un référentiel de conception réutilisable pour d'autres projets similaires dans le contexte nord-africain.

6.1 Recommandations

Pour les futurs travaux qui s'inscriraient dans la continuité du projet AquaVolt, quatre axes d'amélioration méritent une attention particulière.

- Réduire la consommation de la pompe : la pompe AC 220V est le principal consommateur énergétique du système. Tester une pompe DC 24V de débit équivalent permettrait de réduire la consommation à 150–300 Wh/j et d'éliminer l'onduleur, rendant le système réellement autonome en toutes saisons.
- Étudier la scalabilité commerciale : concevoir une unité de ×10 de capacité (800 L de bassin, 5,6 m² de culture, 1 kWc de panneaux) et réaliser une étude de faisabilité complète incluant l'analyse des débouchés commerciaux locaux (restauration, épiceries, marchés).
- Introduction progressive des alevins : introduire 5 alevins en phase 1, puis 5 autres 3 semaines après stabilisation du biofiltre, pour éviter la mortalité initiale observée sur le prototype.
- Tester la technologie $LiFePO_4$ pour la version commerciale : malgré son coût initial quatre fois supérieur, sa durée de vie 6 à 10 fois plus longue améliore significativement le coût total de possession (TCO) sur 10 ans.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES — CHAPITRE I

[1] FAO (2018). Every drop counts: How aquaponics are making smart use of water. FAO News & Stories. https://www.fao.org/fao-stories/article/en/c/1111580/

[2] FAO (2017). The future of food and agriculture: Trends and challenges. Food and Agriculture Organization of the United Nations. ISBN 978-92-5-109551-5.

[3] Goddek, S., Joyce, A., Kotzen, B., & Burnell, G. M. (Eds.) (2019). Aquaponics Food Production Systems. Springer Nature. https://doi.org/10.1007/978-3-030-15943-6

[4] Verdegem, M. C. J., & Bosma, R. H. (2021). Aquaponics for Improved Food Security in Africa: A Review. Frontiers in Sustainable Food Systems, 5, 705549. https://doi.org/10.3389/fsufs.2021.705549

[5] IPCC (2022). Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability — Summary for Policymakers. Cambridge University Press. https://doi.org/10.1017/9781009325844

[6] Mchunu, N., Lagerwall, G., & Senzanje, A. (2023). Aquaponics: A Sustainable Path to Food Sovereignty and Enhanced Water Use Efficiency. Water, 15(24), 4310. https://doi.org/10.3390/w15244310

[7] Konig, B., Janker, J., Reinhardt, T., Villarroel, M., & Junge, R. (2018). Analysis of aquaponics as an emerging technological innovation system. Aquacultural Engineering, 82, 17–29. https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2018.04.001

[8] Foucard, P., Tocqueville, A., Gaumé, M., Labbé, L., & Baroiller, J.-F. (2015). L'aquaponie, une association vertueuse des poissons et des végétaux — Projet APIVA®. INRA / IRSTEA. https://hal.inrae.fr/hal-02622409

[9] Love, D. C., Fry, J. P., Li, X., et al. (2015). Commercial aquaponics production and profitability: Findings from an international survey. Aquaculture, 435, 67–74. https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2014.09.023

[10] Resh, H. M. (2022). Hydroponic Food Production: A Definitive Guidebook (8th ed.). CRC Press. ISBN 9780367699345.

[11] Gruda, N., Bisbis, M., & Tanny, J. (2019). Impacts of protected vegetable cultivation on climate change and adaptation strategies. Journal of Cleaner Production, 225, 324–339. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.03.295

[12] Barbosa, G. L., et al. (2015). Comparison of land, water, and energy requirements of lettuce grown using hydroponic vs. conventional methods. Int. J. Environmental Research and Public Health, 12(6), 6879–6891. https://doi.org/10.3390/ijerph120606879

[13] Martins, C. I. M., Eding, E. H., Verdegem, M. C. J., et al. (2010). New developments in recirculating aquaculture systems in Europe. Aquacultural Engineering, 43(3), 83–93. https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2010.09.002

[14] Boyd, C. E., D'Abramo, L. R., Glencross, B. D., et al. (2020). Achieving sustainable aquaculture: Historical and current perspectives. Journal of the World Aquaculture Society, 51(3), 578–633. https://doi.org/10.1111/jwas.12714

[15] El-Sayed, A.-F. M. (2020). Tilapia Culture (3rd ed.). CABI Publishing. ISBN 9781789241167.

[16] FAO / UICN Méditerranée (2004). L'Aquaculture en Algérie — Revue sectorielle. UICN Med — Document technique.

[17] Dinesh, H., & Pearce, J. M. (2016). The potential of agrivoltaic systems. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 54, 299–308. https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.024

[18] Weselek, A., Ehmann, A., Zikeli, S., et al. (2019). Agrophotovoltaic systems: applications, challenges, and opportunities — A review. Agronomy for Sustainable Development, 39, Article 35. https://doi.org/10.1007/s13593-019-0581-3

[19] Al-Mamun, M. A., Dargusch, P., Wadley, D., et al. (2022). A review of research on agrivoltaic systems. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 161, 112351. https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112351

[20] Campana, P. E., Stridh, B., Amaducci, S., & Colauzzi, M. (2023). Agrivoltaic: A Synergistic Co-Location of Agricultural and Energy Production — A Comprehensive Review. Processes, 11(3), 948. https://doi.org/10.3390/pr11030948

[21] Sequera, M. S., et al. (2024). An Expert System for Solar-Powered Aquaponics System Requirements and Economic Analysis. Cognizance Journal of Multidisciplinary Studies, 4(10), 210–223.

[22] Abdullah, R., Arip, M. N., & Abdul Wahab, N. (2022). Solar-powered aquaponics prototype as sustainable approach for food production. Materials Today: Proceedings. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.02.429

[23] Al-Masri, A., et al. (2023). The Applicability of the Solar Powered Aquaponics Mobile Unit. WSEAS Transactions on Environment and Development, 19.

[24] Channa, P., et al. (2025). Energy Optimisation in Aquaponics — Integrating Renewable Source and Water as Energy Buffer. Energy Science & Engineering, Wiley. https://doi.org/10.1002/ese3.70038

[25] Almeida, J., et al. (2025). Comparative socioeconomic, environmental and technical analysis of smart sustainable integrated multi-trophic aquaponics systems. Scientific Reports, 15. https://doi.org/10.1038/s41598-025-23039-2

[26] Alam, M. S., et al. (2023). Smart Farming Using a Solar Powered Aquaponics System for Sustainable Food Production. IOP Conference Series / ResearchGate.

[27] APS (Agence de Presse Algérienne) (2021). Ouargla — Aquaponie : résultats encourageants à la station d'aquaculture. APS Algérie.

[28] Ministère de la Pêche et des Productions Halieutiques (Algérie) (2020). Stratégie nationale de développement de l'aquaculture 2020–2024. République Algérienne Démocratique et Populaire.

[29] Bensalem, R., & Chehma, A. (2019). Potentiel de développement des cultures hydroponiques en zones arides : cas des oasis algériennes. Revue des Régions Arides (CRRA Médenine), 49. ISSN 0330-7956.

Références bibliographiques — Chapitres II & III

[1] Rakocy, J. E., Masser, M. P., & Losordo, T. M. (2016). Recirculating Aquaculture Tank Production Systems: Aquaponics — Integrating Fish and Plant Culture. SRAC Publication No. 454, USDA. https://aquanic.org/publicat/usda_rac/efs/srac/454fs.pdf

[2] Somerville, C., Cohen, M., Pantanella, E., Stankus, A., & Lovatelli, A. (2014). Small-scale aquaponic food production. FAO Fisheries and Aquaculture Technical Paper No. 589. https://doi.org/10.18356/a83d2537-en

[3] El-Sayed, A.-F. M. (2020). Tilapia Culture (3rd ed.). CABI Publishing. ISBN 9781789241167

[4] Timmons, M. B., & Ebeling, J. M. (2013). Recirculating Aquaculture (3rd ed.). Ithaca Publishing Company. ISBN 9780971264649

[5] Resh, H. M. (2022). Hydroponic Food Production: A Definitive Guidebook (8th ed.). CRC Press. ISBN 9780367699345

[6] Barbosa, G. L., et al. (2015). Comparison of land, water, and energy requirements of lettuce grown using hydroponic vs. conventional methods. Int. J. Environmental Research and Public Health, 12(6), 6879–6891. https://doi.org/10.3390/ijerph120606879

[7] Campana, P. E., Stridh, B., Amaducci, S., & Colauzzi, M. (2023). Agrivoltaic: A Synergistic Co-Location of Agricultural and Energy Production. Processes, 11(3), 948. https://doi.org/10.3390/pr11030948

[8] CDER (2022). Atlas solaire de l'Algérie — Données d'irradiation globale horizontale par région. CDER / Ministère de la Transition Énergétique. https://www.cder.dz/atlas-solaire/

[9] Tyson, R. V., Simonne, E. H., White, J. M., & Lamb, E. M. (2004). Reconciling water quality parameters impacting nitrification in aquaponics: the pH compromise. Proceedings of the Florida State Horticultural Society, 117, 79–83.

[10] Rurangwa, E., & Verdegem, M. C. J. (2015). Microorganisms in recirculating aquaculture systems and their management. Reviews in Aquaculture, 7(2), 117–130. https://doi.org/10.1111/raq.12057

[11] Streeter, V. L., Wylie, E. B., & Bedford, K. W. (1998). Fluid Mechanics (9th ed.). McGraw-Hill Higher Education. ISBN 9780070625372

[12] Alam, M. S., et al. (2023). Smart Farming Using a Solar Powered Aquaponics System for Sustainable Food Production. IOP Conference Series / ResearchGate. https://www.researchgate.net/publication/369247472

[13] Almeida, J., et al. (2025). Comparative socioeconomic, environmental and technical analysis of smart sustainable integrated multi-trophic aquaponics systems. Scientific Reports, 15. https://doi.org/10.1038/s41598-025-23039-2

[14] Mchunu, N., Lagerwall, G., & Senzanje, A. (2023). Aquaponics: A Sustainable Path to Food Sovereignty and Enhanced Water Use Efficiency. Water, 15(24), 4310. https://doi.org/10.3390/w15244310

[15] IPCC (2022). Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability — Summary for Policymakers. Cambridge University Press. https://doi.org/10.1017/9781009325844