

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

MINISTRY OF HIGHER EDUCATION
AND SCIENTIFIC RESEARCH

HIGHER SCHOOL IN APPLIED SCIENCES
--T L E M C E N--



المدرسة العليا في العلوم التطبيقية
École Supérieure en
Sciences Appliquées

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

المدرسة العليا في العلوم التطبيقية
-تلمسان-

Mémoire de fin d'étude

Pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur

Filière : Génie Industriel

Spécialité : Management Industriel et Logistique

Présenté par :

MOSTEFA KARA
YAHIA MAMOUNE

Nadir
Ahmed Youcef

Thème

**Conception et Réalisation d'un
prototype d'une smart aquaponie**

Soutenu publiquement, le 02/07/2024, devant le jury composé de :

M. F. MALIKI	MCA	ESSA. Tlemcen	Président
Mme. A. OUHOUD	MCB	ESSA. Tlemcen	Encadrante 1
M. H. MEGNAFI	MCA	ESSA. Tlemcen	Encadrant 2
M. M.A. BRAHAMI	MCA	ESSA. Tlemcen	Co-Encadrant
M. M. BENNEKROUF	MCA	ESSA. Tlemcen	Examineur 1/ Directeur d'incubateur CDI
M. G. ABDELLAOUI	MCA	ESSA. Tlemcen	Examineur 2
Mme. F. MIMOUNI	MCA	ESSA. Tlemcen	Responsable du CATI
M. I. BOUDIAF		Gérant de SARL	Invité 1

Année universitaire : 2023 / 2024

Remerciements

Nous tenons d'abord à exprimer notre profonde gratitude envers nos encadrants Mme. OUHOD Amina, M. BRAHAMI Mustapha Anwar et M. MEGNAFI Hichem pour nous avoir dirigé tout au long de notre travail. Vos efforts, vos conseils et votre soutien nous ont grandement enrichis et ont été essentiels à la réalisation de ce projet.

Nous souhaitons également remercier M. ADJIM Ramzedinne, responsable du FABLAB, qui nous a énormément aidés à la réalisation du projet à travers ses conseils et ses interventions techniques, qui ont été cruciales pour la concrétisation du prototype.

Nous souhaitons exprimer ma profonde reconnaissance aux éminents membres du jury pour leur dévouement et d'avoir accepté de faire l'expertise de ce mémoire : au Président, M. MALIKI Fouad; à M. BENNEKROUF Mohammed, Premier Examineur et Représentant du CDE; à M. ABDELLAOUI, Deuxième Examineur; et à Mme. MIMOUNI Faiza, Représentante du CATI.

Nos remerciements vont également à tout le personnel de l'école qui a contribué à la réussite du projet : Abdellatif, le magasinier des composantes électroniques; Akacha, le soudeur; Djelloul, l'électricien; ainsi que les gardes de sécurité.

Nous voudrions aussi remercier Mme. KARA, cadre au sein de la direction de la pêche, ainsi que M. BOUDIAF Smail, gérant de SARL BANI AYYADH LIL FILAHAH. Vos conseils dans le domaine de l'aquaponie et de l'aquaculture ainsi que la formation que vous nous avez proposée ont été d'une grande valeur et nous ont pleinement enrichis.

Nous voulons réitérer nos remerciements à M. Fouad MALIKI pour tout le travail qu'il fait pour rendre la filière de Génie Industriel encore meilleure d'année, ce simple paragraphe de remerciements n'égale rien toute la reconnaissance que nous avons à votre égard.

Nous exprimons aussi nos remerciements à M. ROUISSAT Boucherit, directeur de l'ESSAT, ainsi que M. KHEFIF Sidi-Mohamed pour l'opportunité qu'ils nous ont offerte de travailler au FabLab.

Et enfin nous voudrions remercier toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réussite de ce projet

Dédicace

Je dédie ce travail à tous ceux qui liront cette page

À nos chers parents, dont l'amour et le soutien inconditionnels nous ont toujours inspirés à donner le meilleur de nous-mêmes, et plus particulièrement à ma mère « أمي الله يفتح عليك ».

À nos familles, dont le soutien et les sacrifices ont rendu ce travail possible

À nos amis, pour leurs encouragements constants et leur confiance en nos capacités.

À nos professeurs, qui ont partagé leur savoir et nous ont guidés tout au long de cette aventure académique.

À tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce mémoire. Merci pour votre soutien indéfectible.



Hommage

Nous souhaitons rendre un hommage particulier aux Martyrs de Palestine, dont le courage et le sacrifice sont une source d'inspiration inépuisable. Leur lutte pour la liberté et la justice ne sera jamais oubliée, et leur mémoire vivra à jamais dans nos cœurs et nos esprits.

Ahmed-Youcef YAHIA-MAMOUNE

Dédicace

Je dédie ce travail à tous ceux qui liront cette page

Nadir MOSTEFA-KARA

Résumé

Ce mémoire traite de la conception et de la mise en œuvre d'un prototype fonctionnel de système de smart aquaponie, une technique de production alimentaire intégrée combinant l'aquaculture (élevage de poissons) et l'hydroponie (culture de plantes sans sol). Le projet vise à créer un prototype fonctionnel capable d'être contrôlé et géré via une plateforme d'intégration des technologies IoT. Le système utilise des kits IoT pour surveiller et contrôler divers paramètres environnementaux en temps réel, optimisant ainsi l'efficacité et la gestion du système. Le document est structuré en trois chapitres principaux : les généralités sur l'aquaponie, les composants et technologies utilisés, et le développement et l'implémentation du prototype. L'objectif est de créer un prototype fonctionnel avec la possibilité de le contrôler et de le gérer à travers une plateforme d'intégration des technologies IoT.

Mots clé : Aquaponie, MQTT, kit plante, kit aqua, IoT, Prototype fonctionnel, Production alimentaire durable, Aquaculture et Hydroponie, Contrôle en temps réel

Abstract

This thesis addresses the design and implementation of a functional prototype smart aquaponics system, an integrated food production technique combining aquaculture (fish farming) and hydroponics (soil-less plant cultivation). The project aims to create a functional prototype that can be controlled and managed through an IoT integration platform. The system uses IoT kits to monitor and control various environmental parameters in real-time, thereby optimizing the efficiency and management of the system. The document is structured into three main chapters: the basics of aquaponics, the components and technologies used, and the development and implementation of the prototype. The aim is to create a functional prototype with the capability to be controlled and managed through an IoT integration platform.

Key Words: Aquaponics, MQTT, plant kit, aqua kit, IoT, Functional prototype, Sustainable food production, Aquaculture and Hydroponics, Real-time control

ملخص

تتناول هذه الأطروحة تصميم وتنفيذ نموذج أولي وظيفي لنظام أكوابونيك ذكي، وهي تقنية إنتاج غذائي متكاملة تجمع بين الاستزراع المائي (تربية الأسماك) والزراعة المائية (زراعة النباتات دون تربة). يهدف المشروع إلى إنشاء نموذج أولي وظيفي يمكن التحكم فيه وإدارته من خلال منصة تكامل تقنيات إنترنت الأشياء. يستخدم النظام مجموعات إنترنت الأشياء لمراقبة والتحكم في مختلف المعايير البيئية في الوقت الفعلي، مما يحسن من كفاءة النظام وإدارته. يتكون المستند من ثلاثة فصول رئيسية: الأساسيات حول الأكوابونيك، المكونات والتقنيات المستخدمة، وتطوير وتنفيذ النموذج الأولي. الهدف هو إنشاء نموذج أولي وظيفي مع إمكانية التحكم فيه وإدارته من خلال منصة تكامل تقنيات إنترنت الأشياء.

كلمات مفتاحية: للأكابونيك، MQTT، إنترنت الأشياء، النموذج الوظيفي، الإنتاج الغذائي المستدام، تربية الأحياء المائية والزراعة المائية، التحكم الآلي

Sommaire

Remerciements.....	
Dédicace.....	
Dédicace.....	
Sommaire	
Liste des abréviations.....	
Liste des figures	
Liste des Tableaux.....	
Introduction Générale.....	
Chapitre I. Généralités sur l'aquaponie.....	2
1 Introduction.....	1
2 Définition de l'aquaponie	2
3 Historique de la culture en Aquaponie.....	3
4 Aquaculture et Hydroponie.....	4
4.1 Aquaculture	4
4.1.1 Les systèmes d'élevage	4
1. Systèmes d'Étang	5
2. Systèmes de Bassins	6
3. Systèmes de Cages et de Parcs en Eau Libre.....	7
4. Systèmes de Recirculation Aquacole (RAS).....	7
4.1.2 Les Espèces de Poissons pour l'Aquaculture et la Pisciculture en Eau Douce en Algérie	8
1. Tilapia du Nil (<i>Oreochromis niloticus</i>) :.....	8
2. Carpe commune (<i>Cyprinus carpio</i>).....	10

Sommaire

3.	Poisson-chat africain (<i>Clarias gariepinus</i>)	11
4.	Truite arc-en-ciel (<i>Oncorhynchus mykiss</i>).....	11
5.	Loup de rivière (<i>Luciobarbus callensis</i>).....	12
6.	Goujon (<i>Gobio gobio</i>).....	13
4.2	Hydroponie et la culture hors sol	14
4.2.1	Types d'hydroponies	15
1.	Lit Média :.....	15
2.	Méthode d'eau profonde (DWC) :.....	16
3.	Technique du Film Nutritif (NFT) :.....	16
4.	En tour « verticale » :.....	17
4.2.2	Plantes Adaptées à la Culture en Système Aquaponique	17
1.	Légumes :.....	18
2.	Fruits :.....	18
4.2.3	Intégration Efficace dans un Système Aquaponique.....	19
1.	Choix des Plantes :.....	19
2.	Disposition :.....	20
3.	Équilibre Nutrientiel :.....	20
4.	Surveillance et Entretien :.....	20
5.	Gestion des Parasites et Maladies :.....	20
5	Principe de fonctionnement :	20
5.1	Élevage des poissons (Aquaculture).....	20
5.2	Filtration biologique (Biofiltre).....	20
5.3	Culture des plantes (Hydroponie)	21
5.4	Retour de l'eau	21
5.5	Équilibre écologique	21

Sommaire

6	Avantages	21
6.1	Conservation de l'eau.....	21
6.2	Taux de croissance et rendement améliorés	22
6.3	Sécurité alimentaire et efficacité de l'espace.....	22
6.4	Réduction de la pollution	23
6.5	Adaptabilité aux zones urbaines.....	23
7	État de l'art.....	24
7.1	Les travaux scientifiques.....	24
7.2	Projets réalisés.....	26
8	Conclusion	28
Chapitre II. Composants et Technologies Utilisées.....		30
1	Introduction.....	31
2	Hardware.....	31
2.1	Définition d'un microcontrôleur	31
2.1.1	Arduino Uno WiFi Rev2.....	32
2.1.2	ESP8266 et ESP32 :.....	33
1.	ESP8266.....	33
2.	ESP32.....	34
2.2	Les capteurs.....	35
2.2.1	Capteur de Température DS18B20	35
2.2.2	Sonde PH 4502C.....	36
1.	Principe de fonctionnement :.....	36
2.2.3	Capteur de Conductivité de l'eau TDS (Total Dissolved Solids) :	37
2.2.4	Capteur de Turbidité TS-300.....	38
2.2.5	Capteur Ultrasons HC-SR04.....	39

Sommaire

2.2.6	Photorésistance	40
2.2.7	Capteur de température et d'humidité DHT11	41
2.2.8	MQ135	42
2.3	Les actionneurs.....	43
2.3.1	Électrovanne	43
2.3.2	Servo-moteur SG90	44
2.3.3	Relais.....	44
2.3.4	Pompe 12V.....	45
2.3.5	LEDs	45
2.3.6	Buzzer	46
1.	Buzzers Actifs, représenté en Figure II-22.....	46
2.	Buzzers Passifs.....	47
2.3.7	Module I2C	47
2.3.8	Afficheur LCD 20*4	47
2.4	Autres Hardware utilisés	48
2.4.1	Plaque d'essai.....	48
2.4.2	Plaque d'essai en époxy perforée.....	49
2.4.3	Câbles électriques	49
2.4.4	Batteries LIPO	50
3	Software	51
3.1	Les plateformes de développement	51
3.1.1	IDE Arduino.....	52
3.2	L'Internet des objets	53
3.2.1	Généralité sur IoT	53
3.2.2	Domaines d'application de cette technologie.....	54

Sommaire

1.	Agriculture :	54
2.	Domotique :	54
3.	Santé :	54
4.	Industrie 4.0:	55
5.	Villes intelligentes :	55
3.2.3	Protocoles de Communication Utilisés dans IoT	56
3.2.4	Plateformes IOT	59
3.2.5	Définition d'un kit IoT	60
4	Conclusion	61
Chapitre III. Développement et Implémentation du Prototype de Smart Aquaponie.....		62
1	Introduction	63
2	Analyse des Besoins	63
1.	Conditions Environnementales	63
2.	Équipements Techniques.....	64
3	Conception Mécanique et Structurelle.....	64
3.1	Structure du Prototype.....	64
3.2	La sélection des espèces de plantes et de poissons	70
4	Création des Kits IoT	72
4.1	Prototypage et Assemblage des Kits IoT.....	73
4.1.1	Prototypage	73
1.	Dessin 2D des boîtiers :	73
2.	L'impression 3D des boîtiers :	74
4.1.2	Assemblage	74
1.	Kit_Aqua :	75
2.	Kit_Plante :	75

Sommaire

3. Kit_Actionneur :	76
4.1.3 Développement des Logiciels Embarqués	76
1. Kit_Aqua :	77
2. Kit_Plante :	77
3. Kit_Actionneur :	78
4. Connection locale :	78
5. Connection cloud :	78
4.1.4 Intégration des Kits dans notre prototype	79
4.2 Développement de l'Interface Utilisateur	81
4.2.1 Conception du tableau de bord.....	81
5 Conclusion	84
Conclusion Générale	
Bibliographie.....	
Annexes.....	

Liste des abréviations

ADC	Analog to Digital Converter
API	Application Programming Interface
BNC	Bayonet Neill Concelman
CAGR	Compound annual growth rate « taux de croissance annuel »
CPU	Central Processing Unit
DNN	Deep Neural Network
DWC	Deep Water Culture
EEPROM	Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory
EPROM	Erasable Programmable Read Only Memory
ESP	Electronic Stability Program
FCR	Food Conversion Rate « Taux de conversion alimentaire »
GND	Ground « la masse »
GPIO	General Purpose Input/Output « Entrée-sortie à usage général »
HTTP	HyperText Transfer Protocol
HTTPS	HyperText Transfer Protocol Secure
IA	Intelligence Artificielle
IDE	Integrated Development Environment
IDF	Iot Development Framework
IOT	Internet of Things
LCD	Liquid Crystal Display « affichage à cristaux liquides »
LDR	Light Dependent Resistor
LED	Light-Emitting Diode
LIPO	Lithium Polymère
MB	Mégabyte
MQTT	Message Queuing Telemetry Transport
NB	Nota Bene
NFT	
PH	Potentiel Hydrogène
PROM	Programmable Read Only Memory
PVC	PolyVinyl Chloride

Liste des Abréviations

PWM	Pulse Width Modulation
RAM	Random Access Memory
RAS	Systèmes de Recirculation Aquacole
SPI	Serial Peripheral Interface
SRAM	Statique Random Access Memory
SSID	Service Set Identifier
TCP	Transmission Control Protocol
TDS	Total Dissolved Solids
TS	Total Suspended Solids
UART	universal asynchronous receiver / transmitter
UDP	User Datagram Protocol
USB	Universal Serial Bus
USD	dollar américain
VCC	Tension continu en Volt
WEP	Wired Equivalent Privacy
WPA	Wi-Fi Protected Access

Liste des figures

Figure I-1 Schéma représentatif du processus de l'aquaponie [5].....	2
Figure I-2 illustration qui montre la combinaison entre Aquaculture et Hydroponie	2
Figure I-3 Dessin imaginaire de l'aquaponie appliqué par les Mayas	3
Figure I-4 Dr James Rakocy	3
Figure I-5 bassine d'élevage du Tilapia rouge	4
Figure I-6 Les systèmes d'étang de pisciculture à Deqing, Chine	5
Figure I-7 Les bassins en béton pour l'élevage de poissons d'eau douce au niveau de la wilaya de Bechar [6]	6
Figure I-8 Les bassins en matériau plastique	6
Figure I-9 Des cages ou des parcs submergés dans un lac.....	7
Figure I-10 Système simplifié d'aquaculture en recirculation.....	8
Figure I-11 Tilapia du Nil <i>Oreochromis niloticus</i>	9
Figure I-12 Le tilapia du Nil dans les dessins Hiéroglyphes [7].....	9
Figure I-13 La Carpe commune	10
Figure I-14 Poisson-chat africain	11
Figure I-15 Truite arc-en-ciel <i>Oncorhynchus mykiss</i>	11
Figure I-16 <i>Luciobarbus callensis</i>	12
Figure I-17 <i>Gobio gobio</i>	13
Figure I-18 Laitue cultivée en Hydroponie [8]	14
Figure I-19 La technique du média-lit [7].....	15
Figure I-20 Les substrats de culture les plus utilisés dans "media lite"	15
Figure I-21 La méthode d'eau profonde DWC [9].....	16
Figure I-22 La technique du film nutritif (NFT) [10]	16
Figure I-23 L'hydroponie verticale de la laitue [12]	17
Figure I-24 Jardin tour vertical	17
Figure II-1 : Architecture d'un microcontrôleur [2]	32
Figure II-2 : La carte Arduino Uno Rev2 [1].....	32
Figure II-3 ESP8266 12E module [4]	33
Figure II-4 ESP32	34

Liste des Figures

Figure II-5 Brochage d'une carte ESP32 [5]	35
Figure II-6: Le capteur de Température DS18B20 [6].....	35
Figure II-7 Sonde pH 4502C.....	36
Figure II-8 capteur de Conductivité de l'eau TDS.....	37
Figure II-9 Capteur de Turbidité TS-300 [10].....	38
Figure II-10 HC-SR04	39
Figure II-11 : La réflexion des ultrasons dans l'eau [13]	40
Figure II-12 un exemple de courbe caractéristique (résistivité / luminosité) [15].....	41
Figure II-13 Capteur du lumière LDR	41
Figure II-14 Capteur DHT11	41
Figure II-15 Capteur du gaz MQ135.....	42
Figure II-16 Électrovanne 12V	43
Figure II-17 Servo moteur SG90.....	44
Figure II-18 Module RELAIS monocanal 5V	44
Figure II-19 : Une pompe 12V.....	45
Figure II-20 Des LEDs indicatives	45
Figure II-21 Montages sur une plaque d'essai pour allumer une LED rouge [17].....	46
Figure II-22 Un buzzer Actif.....	46
Figure II-24 Module I2C [20]	47
Figure II-24 Les différents pins du module I2C [18].....	47
Figure II-25 Afficheur LCD 20X4	48
Figure II-26 Plaque d'essai	48
Figure II-27 Des plaque en époxy perforées	49
Figure II-28 Fils de connexion.....	49
Figure II-29 Câbles électriques	49
Figure II-30 Batteries LIPO 3.7V 700mAh	50
Figure II-31 Batteries LIPO 3.7V 1200mAh	50
Figure II-32 Module de Charge TP4056	51
Figure II-33 Icon de logiciel Arduino IDE.....	52
Figure II-34 Capture d'écran de l'interface Arduino IDE v2.3.2	52
Figure II-35 Kevin Ashton, 1999 — IoT	53

Liste des Figures

Figure II-36 Illustration des objets connectés	53
Figure II-37 Domaines d'application de la technologie IOT.....	56
Figure II-38 exemple de communication MQTT.....	58
Figure II-39 Icon de ThingSpeak	59
Figure II-40 Icon de Ubidots.....	59
Figure II-41 Icon de Firebase.....	60
Figure II-42 Icon de AdafruitIO.....	60
Figure II-43 exemple d'un Kit de maison intelligente IoT.....	60
Figure III-1 Modèle d'aquaponie à deux étages	65
Figure III-2 Modèle d'hydroponie de type NFT dans des tubes en PVC de Klotz, H	65
Figure III-3 Vegequarium, un mini système aquaponique qui fait pousser des poissons et des plantes ensemble.	65
Figure III-4 : Conception du premier prototype.....	65
Figure III-5 Modèles de conception générées par une IA.....	66
Figure III-6 Fabrication de la première structure du prototype à deux niveaux	66
Figure III-7 Montage du bac de plantation en Forex noir construit dans le fab-lab	67
Figure III-8 Prototype primaire avec un aquarium	67
Figure III-9 Modèle n°02	68
Figure III-10 Modèle n°01	68
Figure III-11 Soudage des supports métalliques.....	69
Figure III-12 La structure final du prototype	70
Figure III-13 Prototype d'un système d'aquaponie simple.....	71
Figure III-14 Dessin 2D du Kit_Actionneur	73
Figure III-15 Dessin 2D du Kit_Aqua	73
Figure III-16 Dessin 2D du Kit_Plante	73
Figure III-17 La modélisation 3D de la boîte Kit_Plante par le logiciel SolidWorks.....	74
Figure III-18 La modélisation 3D de la boîte Kit_Actionneur par le logiciel SolidWorks.....	74
Figure III-19 La modélisation 3D de la boîte Kit_Aqua par le logiciel SolidWorks.....	74
Figure III-20 Schéma de l'assemblage électronique du Kit_Aqua réalisé avec le logiciel Fritzing	75

Liste des Figures

Figure III-21 Schéma de l'assemblage électronique du Kit_Plante réalisé avec le logiciel Fritzing	75
Figure III-22 Schéma de l'assemblage électronique du Kit_Actionneur réalisé avec le logiciel Fritzing	76
Figure III-23 Schéma d'intégration de la technologie IoT au sein de notre prototype smart aquaponie	79
Figure III-24 Kit_Plante après l'assemblage	80
Figure III-25 Kit_Actionneur après l'assemblage	80
Figure III-26 Plusieurs vues de Kit_Aqua après l'assemblage.....	80
Figure III-27 Un schéma fonctionnel du prototype.....	80
Figure III-28 l'interface de Ubidots ongle devices	82
Figure III-29 l'interface de Ubidots ongle variable du devices Aqua control	82
Figure III-30 Econova-Dshe le tableau de bord du prototype.....	83
Figure III-31 La température actuelle de l'environnement	84
Figure III-32 Switches pour activer et désactiver les pompes	84
Figure III-33 niveau d'eau dans le système	84
Figure III-34 La valeur du TDS	84
Figure III-35 La valeur de la luminosité	84
Figure 103 : Conditions de vie du tilapia rouge en aquaponie.....	85
Figure 104 : Conditions de la culture de la tomate en aquaponie [39]	85
Figure 105 : Conditions de la culture de la laitue en aquaponie [39]	85
Figure 106 : Conditions de la culture du basilic en aquaponie [39]	85

Liste des Tableaux

Tableau I-1 Résumé des informations sur les réalisations antérieures.....	28
Tableau II-1 les caractéristiques clés de l'Arduino Uno Rev2 [46].....	33
Tableau II-2 caractéristiques clés de l'ESP8266 [50].....	34
Tableau II-3 caractéristiques clés de l'ESP32 [51].....	34
Tableau II-4 les caractéristiques clés du capteur de Température DS18B20 [52].....	36
Tableau II-5 les caractéristiques clés du Sonde PH [53].....	37
Tableau II-6 les caractéristiques du sonde TDS	38
Tableau II-7 Caractéristiques capteur de Turbidité TS-300	39
Tableau II-8 Résumé de la datasheet du HC-SR04	39
Tableau II-9 Caractéristiques clés de LDR	41
Tableau II-10 Résumé de la Fiche de données du DHT11 [62].....	42
Tableau II-11 caractéristiques Techniques du capteur MQ135	43
Tableau II-12 les caractéristiques des batteries LIPO 3.7V	50
Tableau III-1 Résumé des tâches de chaque kit avec ses propres composants	72

Introduction Générale

L'aquaponie est une technique de production alimentaire intégrée qui combine l'aquaculture (élevage de poissons) et l'hydroponie (culture de plantes hors sol).

Dans le cadre de notre projet de fin d'études, conformément à l'arrêté ministériel n° 1275 du 27 septembre 2022 portant sur le mécanisme « un diplôme...une startup » [1], nous avons entrepris la réalisation d'un prototype de système de smart aquaponie. Ce projet vise à intégrer des kits IoT (Internet des Objets) pour optimiser les systèmes aquaponiques en surveillant et en contrôlant divers paramètres environnementaux de l'aquaponie en temps réel, afin d'améliorer leur efficacité et de faciliter leur gestion.

Le document est structuré en trois chapitres, chacun abordant une facette essentielle de l'aquaponie et des technologies embarquées nécessaires pour améliorer son efficacité.

Le premier chapitre introduit le concept de l'aquaponie, en définissant ses principes et en détaillant ses composants principaux, l'aquaculture et l'hydroponie. Il présente également les avantages et les défis associés à cette méthode de production durable. En explorant l'historique de l'aquaponie et son évolution, nous comprenons mieux pourquoi cette technique est de plus en plus adoptée dans les contextes urbains et ruraux.

Le deuxième chapitre se concentre sur les aspects matériels et logiciels nécessaires à la création des kits IoT pour l'aquaponie. Il couvre les microcontrôleurs, les capteurs, les actionneurs, et les plateformes de développement. Ce chapitre met en lumière les technologies de l'Internet des Objets, les protocoles de communication, et les plateformes IoT utilisées pour la collecte et l'analyse des données.

Le troisième Ce chapitre détaille le processus de conception, de prototypage, et d'assemblage des kits IoT. Il inclut l'analyse des besoins, la conception mécanique, la sélection des espèces de plantes et de poissons, et le développement des programmes embarqués. L'intégration de ces kits dans un prototype fonctionnel de système aquaponique est également discutée, ainsi que le développement de l'interface utilisateur pour une gestion simplifiée et efficace.

En conclusion, on vise à démontrer comment l'intégration de technologies IoT dans les systèmes aquaponiques peut révolutionner la production alimentaire durable en offrant des solutions pratiques et innovantes pour la surveillance et la gestion des ressources.

Chapitre I.

Généralités sur l'aquaponie

1 Introduction

Le monde actuel est de plus en plus confronté à un manque d'alimentation conséquent. L'Organisation des Nations Unies (ONU) révèle qu'entre 691 millions et 783 millions de personnes ont souffert de la faim en 2022 [2]. De plus en plus de solutions sont proposées afin de lutter contre ce fléau.

L'aquaponie émerge comme une solution novatrice et durable dans le domaine de la production alimentaire. Mêlant les principes de l'aquaculture et de l'hydroponie, l'aquaponie offre un système intégré où poissons et plantes forment une cohabitation harmonieuse pour créer un écosystème productif et équilibré. Cette pratique ancestrale, remise au goût du jour par les progrès de la science et de la technologie, incarne une réponse contemporaine aux défis alimentaires et environnementaux auxquels notre monde est confronté.

Dans ce chapitre, nous explorerons en profondeur les tenants et les aboutissants de l'aquaponie. Nous commencerons par définir ce procédé, en mettant en lumière ses origines et son évolution à travers l'histoire. Ensuite, nous plongerons dans les mécanismes fonctionnels de l'aquaponie, décrivant comment les éléments biologiques et physiques s'entremêlent pour créer un équilibre écologique précieux.

Nous discuterons également des avantages substantiels qu'offre l'aquaponie, qu'il s'agisse de la réduction de la consommation d'eau, de l'utilisation efficace de l'espace ou de la production alimentaire durable.

Enfin, nous examinerons l'état actuel de la recherche et de l'application de l'aquaponie, en soulignant les avancées récentes afin de pouvoir guider notre chemin des recherches et bien orienter notre travail et de mettre en lumière ce qui a été fait auparavant.

2 Définition de l'aquaponie

L'aquaponie est un système de production alimentaire durable qui combine l'aquaculture (l'élevage de poissons) et l'hydroponie (la culture de plantes dans de l'eau sans sol) dans un environnement symbiotique [3]. Dans ce système, les déchets organiques produits par les poissons sont utilisés comme source de nutriments pour les plantes, tandis que les plantes filtrent et épurant l'eau, créant ainsi un cycle fermé et équilibré, comme illustré dans la Figure I-1 [4].

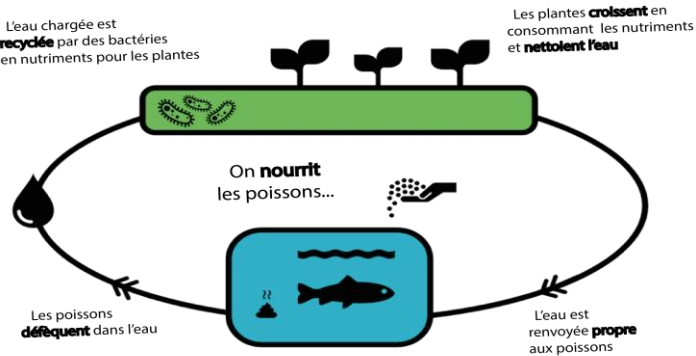


Figure I-1 Schéma représentatif du processus de l'aquaponie [5]

L'eau propre est ensuite réintroduite dans le réservoir des poissons. Ce processus crée un écosystème autonome où les poissons et les plantes bénéficient mutuellement l'un de l'autre[5].

Pour approfondir la compréhension des composants essentiels de l'aquaponie, il est crucial d'examiner ses deux piliers : l'aquaculture et l'hydroponie. Ces deux systèmes, bien qu'indépendants, présentent des caractéristiques uniques, des avantages spécifiques et des défis particuliers. Leur intégration harmonieuse est fondamentale pour assurer le succès de l'aquaponie. Les sections suivantes détailleront ces deux pratiques, explorant leurs rôles respectifs et leur contribution à l'efficacité globale du système aquaponique.

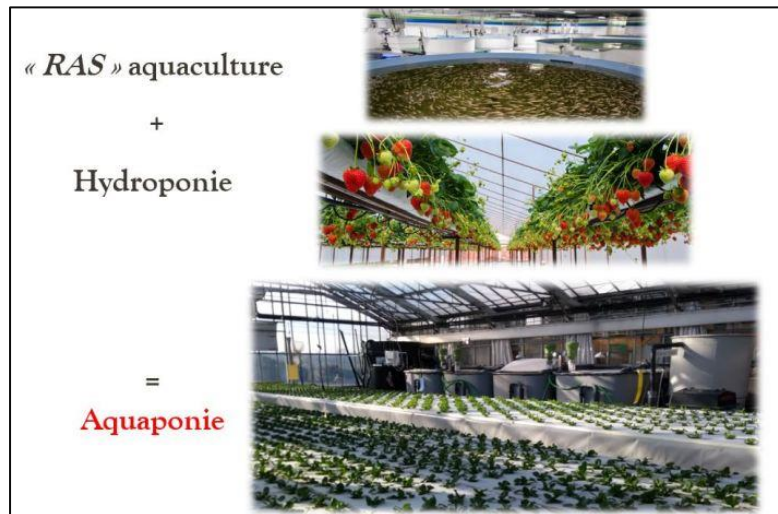


Figure I-2 illustration qui montre la combinaison entre Aquaculture et Hydroponie

3 Historique de la culture en Aquaponie

Les premières traces d'aquaponie domestique remontent toutefois à 1500 ans, en Asie et en Amérique du Sud. À cette époque, les asiatiques élevaient leurs canards dans des cages au-dessus de leurs élevages de poissons, afin que les déchets des uns nourrissent les autres. L'eau enrichie des bassins servait ensuite à irriguer les cultures de riz, c'est ce qu'on appelle la **rizipisciculture**. Par ailleurs au Pérou, les Incas créaient des étangs à poissons avec des îles cultivables. Dans les régions de hauts plateaux, le climat est froid avec des étés pluvieux et des hivers secs et gelés. Les îlots de culture, gorgés d'eau enrichie d'excréments d'oiseaux attirés par ce milieu artificiel, offraient des rendements impossibles à atteindre autrement dans cette région [6].



Figure I-3 Dessin imaginaire de l'aquaponie appliquée par les Mayas

Au cours du XXe siècle, des chercheurs ont commencé à explorer les concepts d'aquaponie de manière plus systématique. Des travaux de pionniers tels que les recherches menées par le Dr James Rakocy (présenté dans la Figure I-4) à l'Université de l'Hawaï dans les années 1970 ont jeté les bases de la modernisation de l'aquaponie.



Figure I-4 Dr James Rakocy

Dans les années 1990 et 2000, l'aquaponie a commencé à attirer davantage l'attention en tant que méthode durable de production alimentaire. Des projets pilotes et des installations commerciales ont émergé dans différents pays, démontrant les avantages de ce système intégré pour la culture de poissons et de plantes.

Au cours des dernières décennies, l'aquaponie est devenue de plus en plus populaire dans le monde entier, en particulier parmi les amateurs d'agriculture urbaine, les communautés désireuses de pratiques agricoles durables, et les entreprises cherchant des solutions innovantes de production alimentaire [4].

4 Aquaculture et Hydroponie

L'aquaculture et l'hydroponie sont deux techniques de production alimentaire qui, lorsqu'elles sont combinées, forment la base de l'aquaponie.

4.1 Aquaculture

L'aquaculture désigne l'élevage contrôlé de poissons ainsi que d'autres espèces animales et végétales aquatiques dans des conditions maîtrisées, afin d'augmenter, au-delà des capacités naturelles du milieu, la production des organismes en question. Les méthodes de production en aquaculture ont été développées dans différentes régions du monde, adaptées aux conditions environnementales et climatiques spécifiques de ces régions [7].



Figure I-5 bassine d'élevage du Tilapia rouge

Les poissons représentent le moteur du système aquaponique, si bien qu'ils fournissent les nutriments nécessaires pour la poussée des plantes.

4.1.1 Les systèmes d'élevage

En aquaculture, différents systèmes d'élevage sont utilisés pour cultiver des poissons en fonction des espèces, des objectifs de production, des ressources disponibles et des conditions environnementales. Voici une vue d'ensemble des principaux systèmes d'élevage utilisés dans l'aquaculture en eau douce :

1. Systèmes d'Étang

l'étang est un plan d'eau d'origine naturelle ou artificielle de faible profondeur sans stratification thermique stable [8]. Les systèmes d'étang sont les plus courants et impliquent l'élevage de poissons dans des étangs creusés dans le sol, la Figure I-6 présente un aperçu visuel du système d'étang de pisciculture à Deqing en Chine.

Caractéristiques :

- Utilisation de l'eau naturelle (rivière, pluie, etc.).
- Contrôle limité des paramètres de l'eau.
- Généralement utilisé pour l'élevage extensif et semi-intensif.

Les systèmes d'étang présentent plusieurs avantages, tels qu'un faible coût d'installation et d'entretien, ainsi qu'une adaptation à une large gamme d'espèces. Cependant, ils sont également soumis à des inconvénients significatifs, notamment une dépendance aux conditions climatiques et hydrologiques, ainsi que des risques accrus de pollution et de maladies.



Figure I-6 Les systèmes d'étang de pisciculture à Deqing, Chine

2. Systèmes de Bassins

Les bassins en béton ou en matériaux plastique, comme illustré dans la Figure I-7 et la Figure I-8 sont utilisés pour élever des poissons dans un environnement contrôlé.



Figure I-7 Les bassins en béton pour l'élevage de poissons d'eau douce au niveau de la wilaya de Bechar [6]



Figure I-8 Les bassins en matériau plastique

Caractéristiques :

- Permet un meilleur contrôle de la qualité de l'eau.
- Utilisé pour l'élevage intensif et semi-intensif.

Les systèmes de bassins offrent plusieurs avantages, notamment un meilleur contrôle des conditions de l'eau telles que la température et le niveau d'oxygène, ce qui favorise un environnement optimal pour la croissance des poissons. De plus, ils permettent une réduction significative des risques de fuite et de contamination, assurant ainsi la qualité de l'eau et la santé des poissons élevés. Cependant, ces avantages sont contrebalancés par un coût initial plus élevé par rapport à d'autres systèmes d'élevage, ainsi que par la nécessité d'une gestion plus intensive pour surveiller et maintenir les conditions optimales de l'eau, ce qui peut nécessiter des ressources humaines supplémentaires et des compétences techniques spécifiques.

3. Systèmes de Cages et de Parcs en Eau Libre

Ces systèmes utilisent des cages ou des parcs submergés dans des plans d'eau naturels comme les lacs (voir la Figure I-9), les réservoirs et les rivières.

Caractéristiques :

- Permet une grande capacité de production.
- Utilisation de l'eau courante naturelle pour l'aération et l'élimination des déchets.



Figure I-9 Des cages ou des parcs submergés dans un lac

Les systèmes de cages et de parcs en eau libre présentent des avantages significatifs, notamment un faible coût d'infrastructure et une utilisation efficace des grands plans d'eau disponibles. Cependant, ils sont également exposés aux conditions environnementales naturelles telles que les tempêtes et la pollution, ce qui peut entraîner des risques pour les poissons élevés. De plus, la difficulté à contrôler les paramètres de l'eau dans ces systèmes peut poser des défis en matière de gestion de la qualité de l'eau et de santé des poissons.

4. Systèmes de Recirculation Aquacole (RAS)

Les RAS sont des systèmes fermés où l'eau est réutilisée pour les poissons après un processus de nettoyage et de filtration, comme illustré dans la Figure I-10. Il est la méthode la plus adaptée pour le développement de systèmes d'aquaculture intégrée en raison de l'utilisation possible des sous-produits et des concentrations plus élevées de nutriments pour la production de cultures légumières. L'aquaponie donc a été développée à partir de l'accumulation bénéfique de nutriments dans les RAS.

Caractéristiques :

- Contrôle complet des paramètres de l'eau.
- Utilisé pour l'élevage intensif de haute densité.

Les systèmes de recirculation aquacole (RAS) présentent plusieurs avantages, notamment une utilisation efficace de l'eau, un faible impact environnemental et la possibilité de produire toute l'année, indépendamment des conditions climatiques. Cependant, ces avantages sont contrebalancés par des inconvénients significatifs tels qu'un coût initial et opérationnel élevé, ainsi que la nécessité d'une technologie avancée et d'une gestion technique pointue pour assurer le bon fonctionnement et la rentabilité du système[9].

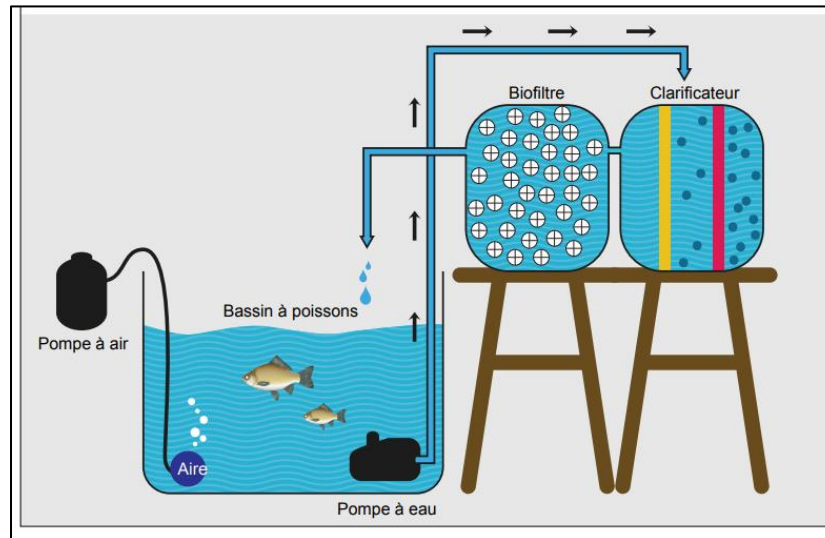


Figure I-10 Système simplifié d'aquaculture en recirculation

4.1.2 Les Espèces de Poissons pour l'Aquaculture et la Pisciculture en Eau Douce en Algérie

En Algérie, l'aquaculture en eau douce est en plein développement grâce à la diversité des écosystèmes et aux initiatives visant à renforcer la sécurité alimentaire et à diversifier l'économie. Voici quelques espèces de poissons couramment élevées en eau douce en Algérie :

1. Tilapia du Nil (*Oreochromis niloticus*) :

Le Tilapia du Nil, scientifiquement connu sous le nom d'*Oreochromis niloticus*, est originaire des rivières et des lacs d'Afrique. Il est l'une des plus anciennes espèces de poissons domestiquées pour l'aquaculture, avec des preuves de son élevage remontant à l'Égypte ancienne. En examinant la Figure I-12, on peut observer clairement Le tilapia du Nil dans les dessins Hiéroglyphes [10].



Figure I-12 Le tilapia du Nil dans les dessins Hiéroglyphes [7]

Le Tilapia du Nil, comme illustré dans la Figure I-11 est l'une des espèces les plus couramment élevées en aquaculture en raison de sa robustesse, de sa rapidité de croissance et de sa capacité d'adaptation à une large gamme de conditions environnementales. Il peut tolérer des variations de température de l'eau allant de 22 à 30°C, ainsi que divers niveaux de salinité, bien qu'il préfère les eaux douces ou légèrement saumâtres. En outre, sa capacité à survivre dans des conditions de faible teneur en oxygène et sa résistance à de nombreuses maladies aquatiques en font un choix idéal pour les systèmes d'aquaculture [11].

Ces caractéristiques permettent son élevage dans différentes régions d'Algérie, rendant le Tilapia du Nil particulièrement adapté à l'aquaculture locale. Sa chair blanche, ferme et savoureuse est très appréciée sur le marché, ce qui augmente sa demande et sa rentabilité pour les pisciculteurs.



Figure I-11 Tilapia du Nil *Oreochromis niloticus*

2. Carpe commune (*Cyprinus carpio*)

La carpe commune, ou *Cyprinus carpio* (voir la Figure I-13), est une autre espèce phare en aquaculture, appréciée pour sa robustesse et sa capacité d'adaptation à divers environnements. Originnaire d'Asie, des pays comme la Chine, l'Inde et le Vietnam qui sont parmi les principaux producteurs mondiaux de carpe commune. Elle a été introduite en Europe et en Afrique il y a plusieurs siècles et est désormais une espèce couramment élevée en Algérie. La carpe commune peut survivre dans une gamme de températures d'eau allant de 3 à 35°C, bien qu'elle préfère des



Figure I-13 La Carpe commune

températures modérées autour de 20 à 25°C. Sa tolérance aux faibles niveaux d'oxygène et à une qualité de l'eau variable la rend particulièrement résiliente.

Cette espèce possède une croissance rapide et peut atteindre des tailles importantes, ce qui en fait une source de protéine très productive [12]. La carpe commune est omnivore, se nourrissant d'une variété de matières végétales et animales, ce qui simplifie sa gestion en aquaculture.

3. Poisson-chat africain (*Clarias gariepinus*)

Le poisson-chat africain, ou *Clarias gariepinus*, comme illustré dans la Figure I-14 est largement reconnu en aquaculture pour sa robustesse et sa capacité d'adaptation exceptionnelle à divers environnements. Originnaire d'Afrique, cette espèce est particulièrement prisée en Algérie en raison de sa résistance aux conditions difficiles et de sa tolérance à de faibles niveaux d'oxygène. Le poisson-chat africain peut prospérer dans une large gamme de températures d'eau, généralement entre 20 et 30°C, et supporte bien les variations de qualité de l'eau, ce qui le rend idéal pour différents systèmes d'aquaculture [13].



Figure I-14 Poisson-chat africain

4. Truite arc-en-ciel (*Oncorhynchus mykiss*)

La truite arc-en-ciel, Comme illustré dans la Figure I-15 est une espèce prisée en aquaculture pour sa chair délicate et sa croissance rapide. Originnaire d'Amérique du Nord, elle s'adapte bien aux climats tempérés et est capable de prospérer dans des eaux fraîches et bien oxygénées, généralement entre 10 et 18°C. En Algérie, la truite arc-en-ciel est élevée principalement dans les régions montagneuses où les conditions d'eau froide et de haute qualité sont présentes. Cette espèce est connue pour sa résistance aux maladies et sa capacité à se développer dans des environnements contrôlés. En plus de ses qualités gustatives, la truite arc-en-ciel est également riche en protéines, en acides gras oméga-3



Figure I-15 Truite arc-en-ciel *Oncorhynchus mykiss*

et en vitamines, offrant ainsi des avantages nutritionnels importants aux consommateurs. Son élevage en Algérie contribue à diversifier l'aquaculture et à répondre à la demande croissante de poissons de haute qualité.

5. Loup de rivière (*Luciobarbus callensis*)

Le loup de rivière (voir la Figure I-16), ou *Luciobarbus callensis*, est une espèce de poisson originaire des cours d'eau et des lacs d'Algérie. Ce poisson, bien adapté aux eaux douces locales, tolère des environnements variés, y compris des eaux à faible oxygénation et des températures oscillant entre 15 et 25°C. Cette résilience le rend particulièrement adapté à l'aquaculture régionale. Le loup de rivière est recherché pour sa chair ferme et savoureuse, riche en protéines et en acides gras essentiels. Au-delà de ses qualités nutritionnelles, il contribue à l'équilibre des écosystèmes aquatiques. L'élevage de cette espèce en Algérie aide à diversifier les produits aquacoles disponibles tout en soutenant des pratiques d'aquaculture durables, essentielles pour la conservation des ressources naturelles locales.



Figure I-16 *Luciobarbus callensis*

6. Goujon (*Gobio gobio*)

Le goujon, ou *Gobio gobio*, est un petit poisson d'eau douce apprécié en aquaculture pour sa capacité à prospérer dans divers environnements aquatiques. Adapté aux cours d'eau et aux lacs de faible profondeur, il tolère des conditions de température variées, généralement entre 10 et 22°C, et peut survivre dans des eaux à faible oxygénation. Cette espèce est particulièrement résistante et facile à élever, ce qui en fait une option attrayante pour les aquaculteurs. En Algérie, le goujon est prisé non seulement pour sa chair délicate mais aussi pour son rôle dans les écosystèmes aquatiques, où il contribue à contrôler les populations d'invertébrés et à maintenir l'équilibre écologique. L'élevage de goujons soutient la diversification des produits aquacoles et permet de répondre à une demande croissante pour des poissons d'eau douce de haute qualité.



Figure I-17 *Gobio gobio*

L'aquaculture est une source de plus en plus importante de production mondiale de protéines. En fait, l'aquaculture représente près de la moitié du poisson consommé dans le monde. Elle a le potentiel de réduire la pression sur les pêcheries mondiales et de diminuer considérablement l'empreinte des systèmes d'élevage d'animaux terrestres moins durables dans la fourniture de protéines animales aux humains [2].

Un problème majeur pour la durabilité de l'aquaculture est le traitement des eaux usées riches en nutriments, qui est un sous-produit de toutes les méthodes d'aquaculture mentionnées ci-dessus. La croissance de plantes dans le flux d'effluent est une méthode pour éviter sa libération dans l'environnement et pour obtenir des avantages économiques supplémentaires à partir de cultures se développant avec des sous-produits gratuits, grâce à l'irrigation, aux zones humides artificielles et à d'autres techniques. [14]

4.2 Hydroponie et la culture hors sol

La culture hors-sol est une méthode agricole qui se base sur la non-utilisation du sol. Au lieu de cela, différents supports inertes, également appelés substrats, sont utilisés. Des systèmes d'irrigation sont intégrés dans ces supports, introduisant ainsi une solution nutritive dans les zones racinaires des plantes. Cette solution fournit les nutriments nécessaires à la croissance des plantes. La méthode la plus courante de culture sans sol est l'**hydroponie**, qui consiste à faire pousser des plantes soit sur un substrat (billes d'argiles, graviers, pouzzolane...), soit dans un milieu aqueux avec des racines nues. Il existe de nombreux modèles de systèmes hydroponiques, chacun répondant à un objectif différent, mais tous partagent ces caractéristiques de base.

L'hydroponie peut en fait contrôler les ravageurs et les maladies du sol en évitant le contact entre les plantes et le sol, et parce que les milieux sans sol peuvent être stérilisés et réutilisés entre les cultures. Cette réutilisation des substrats répond aux exigences particulières de la production intensive. Certains substrats sont bien meilleurs que le sol, notamment en termes de capacité de rétention d'eau et d'approvisionnement en oxygène dans la zone racinaire. [14]



Figure I-18 Laitue cultivée en Hydroponie [8]

4.2.1 Types d'hydroponies

1. Lit Média :

Les unités à lit média, Comme illustré dans la Figure I-19 parfois appelées lits de particules, sont des unités où les plantes poussent dans un substrat.

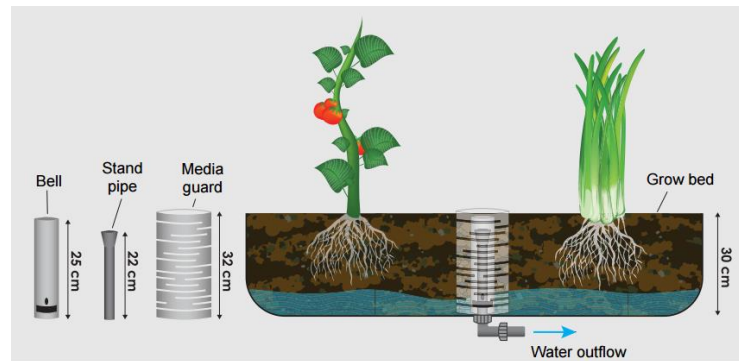


Figure I-19 La technique du média-lit [7]

Le substrat de culture "media lite" est un support de culture et il est composé de matériaux légers tels que la perlite, la vermiculite, la fibre de coco ou des billes d'argile expansée, comme illustré dans la Figure I-20. Ce substrat est utilisé pour soutenir les racines des plantes et fonctionne également comme un filtre, à la fois mécanique (offre une structure poreuse qui retient l'eau et les nutriments nécessaires aux plantes) et biologique (fonctionne en hébergeant **des colonies de bactéries** bénéfiques qui convertissent les déchets toxiques, principalement l'ammoniac, en nitrates moins nocifs, qui peuvent ensuite être absorbés par les plantes comme nutriments) [14].



Figure I-20 Les substrats de culture les plus utilisés dans "media lite"

2. Méthode d'eau profonde (DWC) :

Elle consiste à suspendre les plantes dans des feuilles de polystyrène, avec leurs racines qui pendent dans l'eau, comme illustré dans la Figure I-21. Cette méthode est la plus courante pour les grandes entreprises commerciales d'aquaponie cultivant une culture spécifique. À petite échelle, cette technique est plus compliquée que les lits médias et peut ne pas convenir à certains endroits, en particulier lorsque l'accès aux matériaux est limité. [14]

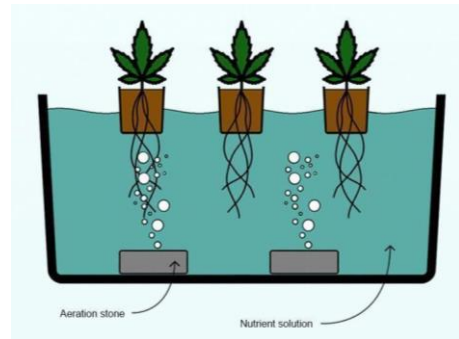


Figure I-21 La méthode d'eau profonde DWC [9]

3. Technique du Film Nutritif (NFT) :

C'est une méthode utilisant des tuyaux horizontaux dans lesquels circule un courant peu profond d'eau aquaponique riche en nutriments. Les plantes sont placées dans des trous au sommet des tuyaux et peuvent utiliser ce mince film d'eau riche en nutriments, comme illustré dans la Figure I-22. Le NFT et le DWC sont des méthodes populaires pour les opérations commerciales, car elles sont toutes deux financièrement plus viables que les unités de lit média lorsqu'elles sont mises à l'échelle. Cette technique présente une très faible évaporation, car l'eau est complètement protégée du soleil. [14]

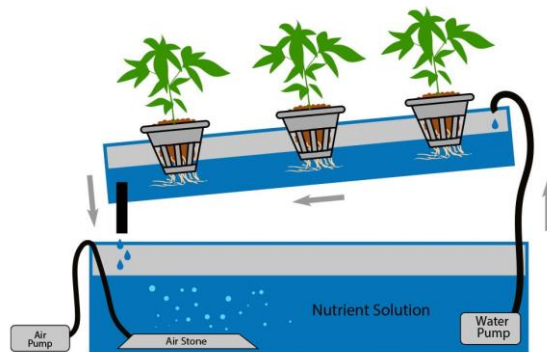


Figure I-22 La technique du film nutritif (NFT) [10]

4. En tour « verticale » :

La méthode de culture en tour verticale est une approche innovante en aquaponie où les plantes sont cultivées dans des structures verticales. Cette technique maximise l'utilisation de l'espace en empilant les plantes en colonnes ou en tours, ce qui permet d'augmenter la densité de plantation tout en minimisant l'empreinte au sol, comme illustré dans la Figure I-24. Les racines des plantes reçoivent directement les nutriments provenant de l'eau enrichie par les déchets des poissons, favorisant ainsi une croissance rapide et saine. Ce système est particulièrement adapté aux environnements urbains ou aux espaces restreints où l'optimisation de l'espace est cruciale. [15] [16]



Figure I-23 L'hydroponie verticale de la laitue [12]



Figure I-24 Jardin tour vertical

4.2.2 Plantes Adaptées à la Culture en Système Aquaponique

Les systèmes aquaponiques sont très polyvalents et peuvent être utilisés pour cultiver une grande variété de légumes et de fruits. Voici un aperçu des plantes les plus couramment cultivées en aquaponie et comment elles peuvent être intégrées dans ce système :

1. Légumes :

➤ Laitue :

Les laitues, caractérisées par une croissance rapide et une faible demande en nutriments, peuvent être intégrées avec succès dans les systèmes aquaponiques. Elles peuvent être cultivées en utilisant des systèmes NFT ou des systèmes de tour vertical (voir la Figure I-24). Cependant, elles nécessitent des températures modérées et une bonne circulation d'air pour un développement optimal.

➤ Épinards :

Les épinards, riches en nutriments et tolérants aux variations de conditions, sont bien adaptés aux systèmes DWC (Deep Water Culture), où leurs racines sont submergées dans l'eau riche en nutriments. Ils préfèrent des températures plus fraîches et un pH légèrement acide à neutre, ce qui les rend idéaux pour une culture aquaponique réussie.

➤ Basilic :

Le basilic, grâce à sa croissance rapide et à sa forte demande sur le marché, est un excellent choix pour les systèmes aquaponiques. Il convient particulièrement aux systèmes NFT et DWC, nécessitant beaucoup de lumière et une température ambiante chaude pour prospérer. Son intégration efficace dans ces systèmes garantit une production constante et de haute qualité.

2. Fruits :

➤ Fraises :

Les fraises, en raison de leur rentabilité et de leur attrait pour les consommateurs, sont bien adaptées aux systèmes NFT. Elles peuvent être cultivées verticalement pour économiser de l'espace et nécessitent des soins particuliers pour la prévention des maladies fongiques, assurant ainsi une production saine et abondante.

➤ Melons :

Les melons, en raison de leur forte demande et de leur croissance vigoureuse, sont bien adaptés aux systèmes aquaponiques. Ils nécessitent des systèmes de soutien robustes et sont souvent

cultivés en lits média ou sur des treillis pour supporter les fruits lourds, assurant ainsi une culture efficace et productive.

➤ **Poivrons :**

Les poivrons, grâce à leur diversité de variétés et leur tolérance à différentes conditions de croissance, s'intègrent efficacement dans les systèmes aquaponiques. Cultivés principalement en lits média, ils bénéficient d'un sol bien aéré et d'un apport régulier en nutriments pour une croissance optimale.

➤ **Tomates :**

Les tomates, grâce à leur haute valeur marchande et leur production abondante, sont particulièrement bien adaptées aux systèmes aquaponiques. Elles peuvent être cultivées en lits média, ce qui fournit le soutien nécessaire à leurs structures plus lourdes. De plus, elles nécessitent un bon drainage et un apport constant en nutriments pour une croissance optimale.

➤ **Concombres :**

Les concombres, connus pour leur haute productivité et grande adaptabilité, sont des plantes idéales pour les systèmes aquaponiques. Ils peuvent être cultivés en lits média ou en systèmes de treillis vertical, ce qui permet de maximiser l'espace disponible tout en offrant un soutien adéquat aux plantes.

NB : « *Le concombre, les poivrons et la tomate sont tous des fruits sur le plan botanique car ils se développent à partir de l'ovaire de la fleur de la plante et contiennent des graines. Cependant, dans les pratiques culinaires, ils sont couramment considérés et utilisés comme des légumes* ».

4.2.3 Intégration Efficace dans un Système Aquaponique

L'intégration efficace des plantes dans un système aquaponique nécessite une planification soigneuse des besoins spécifiques de chaque plante en termes de lumière, nutriments, et espace. Voici quelques points clés à considérer :

1. Choix des Plantes :

Sélectionner des plantes qui ont des besoins nutritionnels et environnementaux compatibles avec les conditions de l'aquaponie.

2. **Disposition :**

Utiliser des systèmes verticaux ou des lits surélevés pour maximiser l'utilisation de l'espace, en particulier dans des environnements urbains ou restreints.

3. **Équilibre Nutrientiel :**

Assurer un équilibre entre le nombre de poissons et les plantes pour maintenir des niveaux de nutriments adéquats (1 poisson de 150g pour 2 plantes). Trop de poissons peuvent entraîner une accumulation de déchets, tandis que trop de plantes peuvent épuiser les nutriments.

4. **Surveillance et Entretien :**

Surveiller régulièrement les niveaux de pH, la température de l'eau, et la concentration des nutriments pour assurer un environnement optimal pour les plantes et les poissons.

5. **Gestion des Parasites et Maladies :**

Pratiquer des méthodes de gestion intégrée des parasites pour minimiser l'utilisation de produits chimiques, en utilisant des solutions biologiques ou des pratiques de culture appropriées.

5 **Principe de fonctionnement :**

Le principe de fonctionnement de l'aquaponie repose sur un écosystème intégré où les poissons, les bactéries, les plantes et l'eau interagissent de manière symbiotique (voir la Figure I-1). Voici comment cela fonctionne :

5.1 **Élevage des poissons (Aquaculture)**

Les poissons sont élevés dans un réservoir où leurs déjections produisent de l'ammoniac, un déchet riche en azote. Les poissons sont choisis en fonction de leur capacité à tolérer les conditions aquacoles et leur compatibilité avec les exigences du système.

5.2 **Filtration biologique (Biofiltre)**

Les déchets des poissons sont ensuite dégradés par des bactéries nitrifiantes présentes dans le système. Ces bactéries transforment l'ammoniac en nitrites, puis en nitrates, qui sont moins toxiques pour les poissons mais constituent une excellente source de nutriments pour les plantes.

5.3 Culture des plantes (Hydroponie)

L'eau enrichie en nutriments est pompée depuis le réservoir des poissons vers les bacs de culture des plantes. Les plantes cultivées dans ces bacs absorbent les nutriments présents dans l'eau pour leur croissance et leur développement. Les plantes agissent comme un filtre biologique en purifiant l'eau des nitrates et autres contaminants.

5.4 Retour de l'eau

Une fois que l'eau a été filtrée par les plantes, elle retourne dans le réservoir des poissons, propre et oxygénée, prête à être réutilisée. Ce processus crée un cycle fermé d'eau et de nutriments, réduisant ainsi la consommation d'eau et la production de déchets.

5.5 Équilibre écologique

L'aquaponie crée un écosystème équilibré où les poissons et les plantes se soutiennent mutuellement. Les plantes fournissent de l'ombre et de l'oxygène aux poissons, tandis que les poissons fournissent des nutriments aux plantes. Les bactéries nitrifiantes jouent un rôle crucial dans la décomposition des déchets et dans la transformation des nutriments. [17]

6 Avantages

6.1 Conservation de l'eau

Le fait que l'eau circule en circuit fermé amène le concept de réutilisation et de conservation de l'eau plutôt que la nécessité de la remplacer constamment par de l'eau douce. Certains auteurs ont signalé une consommation d'eau inférieure à 90 % grâce à l'aquaponie par rapport aux systèmes conventionnels de production commerciale de poissons et de cultures[18]. Par conséquent, la production aquaponique permet une production efficace de produits alimentaires dans les zones où les ressources pour les productions agricoles telles que l'eau et les terres arables sont limitées ou ont un usage compétitif. [19]

6.2 Taux de croissance et rendement améliorés

Contrairement au système d'agriculture conventionnelle, le système de production aquaponique repose sur des pratiques durables de cycle de l'azote et d'arrosage continu des plantes avec des eaux usées riches en nutriments (c'est-à-dire des nitrates produits par les poissons et consommés par les plantes). En conséquence, la plante et les poissons grandissent plus rapidement avec moins d'intrants ou d'influences externes[20]. Cela a été démontré récemment par Oladimeji, Okomoda et al. (2020) qui ont rapporté que la production et le rendement de citrouilles dans le système aquaponique étaient environ 5 et 11 fois plus performants que les terres irriguées et les terres non irriguées, respectivement. Les auteurs ont également constaté que le rendement en poissons était de 29 % et 75 % plus élevé en utilisant le système aquaponique par rapport aux systèmes d'aquaculture en recirculation et statique, respectivement.[21]

Une étude finlandaise aussi a montré que le SGR (Taux de croissance spécifique) du poisson était significativement plus élevé en aquaponie ($1,95 \pm 0,12$) qu'en RAS ($1,67 \pm 0,08$). Le FCR (Taux de conversion alimentaire) qui est simplement la quantité d'aliments qu'il faut pour faire grandir un kilogramme de poisson, de sorte qu'en aquaponie, le taux était bien plus faible ($0,85 \pm 0,08$) que dans le RAS ($1,06 \pm 0,03$). Le gain de poids était significativement plus élevé pour les poissons élevés en aquaponie qu'en RAS. [22]

6.3 Sécurité alimentaire et efficacité de l'espace

D'ici la fin du XXI^e siècle, le changement climatique devrait à lui seul représenter jusqu'à 18 % des pertes de terres arables en Afrique [23], ce qui aura un impact négatif sur la situation déjà désastreuse de l'insécurité alimentaire du continent.

L'aquaponie représente une alternative efficace pour éviter les problèmes de sous-alimentation, il s'agit d'une technologie prometteuse pour produire à la fois des protéines de poisson et des légumes de haute qualité de manière à utiliser beaucoup moins de terres, moins d'énergie et moins d'eau, tout en minimisant les intrants chimiques et d'engrais utilisés dans la production alimentaire conventionnelle [24].

6.4 Réduction de la pollution

Un autre avantage du système de production aquaponique par rapport aux systèmes alimentaires conventionnels traditionnels est sa nature respectueuse de l'environnement. En effet, il n'est pas nécessaire d'utiliser des engins ou des équipements de terrassement lourds pour labourer le sol ; par conséquent, la destruction de la structure du sol et la pollution qui en découle sont éliminées d'un seul coup grâce au système aquaponique [19]

6.5 Adaptabilité aux zones urbaines

La demande de production alimentaire ne cesse d'émerger au cours de ces dernières années, ce qui laisse dire que l'aquaponie représente une technologie de production alimentaire qui a la capacité de condenser et de comprimer la production dans des espaces et des endroits non spécialement privilégiés pour la culture d'aliments, ce qui permet aux consommateurs recourir à des aliments frais locaux sur le marché. [25]

D'une autre part, le prix sur les terres arables peuvent diminuer en faisant l'usage de bâtiments abandonnées qui ont une valeur résidentielle inférieure, ce qui permettra de produire des aliments frais, sans avoir recours à de longs cycles de transport ni de stockage coûteux sur de longues distances. Cela se traduit par des circuits courts, avec des avantages économiques, environnementaux et sociaux, pour les producteurs, les consommateurs et les habitants en général. [26]

7 État de l'art

Dans le cadre de la préparation de notre projet d'aquaponie connectée, une recherche approfondie a été nécessaire pour situer notre travail par rapport aux réalisations antérieures. Cette section présente une revue des travaux scientifiques pertinents et des projets réalisés dans le domaine de l'aquaponie connectée, mettant en lumière les avancées technologiques et les innovations existantes.

7.1 Les travaux scientifiques

Dans des régions telles que l'Afrique du Nord et le Moyen-Orient, les systèmes agricoles consomment 90% de l'eau douce disponible. Les tendances récentes se sont concentrées sur des stratégies de développement durable basées sur l'économie circulaire, considérée comme une clé de la prospérité économique [27]. Dans ce contexte, l'aquaponie a été proposée comme une méthode agricole prometteuse et durable, imitant les systèmes naturels pour réduire les impacts environnementaux et rationaliser la consommation d'eau [28]. Cette méthode présente un potentiel significatif pour la durabilité socio-économique et environnementale, et promet de contribuer de manière substantielle à la sécurité alimentaire mondiale en augmentant considérablement la production alimentaire. La principale préoccupation de l'aquaponie a été de purifier les systèmes d'aquaculture de l'ammoniac toxique en utilisant les plantes comme biofiltres.

Actuellement, l'aquaponie est pratiquée comme passe-temps dans de nombreux pays [29] et elle est désormais considérée commercialement comme une solution viable à la crise alimentaire mondiale. Cependant, seulement 31% des exploitations commerciales d'aquaponie sont rapportées comme économiquement viables et rentables en raison d'un manque d'expérience et d'une gestion déficiente. De nombreux articles ont passé en revue divers aspects des systèmes d'aquaponie, y compris les espèces de poissons et de plantes, les pratiques de gestion, les nouveaux designs et les implémentations de systèmes [30]. Cependant, les revues récentes ont souvent omis de se concentrer sur la recherche liée aux techniques d'automatisation, aux plateformes de communication et aux unités de contrôle au sein de ces systèmes. Par conséquent, une revue de telles études est nécessaire pour mettre en évidence les récents progrès dans ce domaine.

Le bon design, l'implémentation et la gestion sont cruciaux pour le succès des systèmes d'aquaponie et pour atteindre la faisabilité économique [31]. Ces tâches sont difficiles à optimiser,

surtout lorsque l'on cherche une productivité élevée et une qualité élevée, en raison de la nature symbiotique du système et de la nécessité de surveiller et de contrôler plusieurs paramètres environnementaux. À un niveau commercial, gérer et optimiser ces paramètres manuellement représente un défi majeur. Récemment, les technologies d'automatisation intelligente et de communication moderne ont été introduites dans divers aspects de la vie, y compris l'agriculture. Cette intégration a ouvert de nouvelles perspectives pour le développement et l'amélioration des systèmes agricoles tels que l'aquaponie. L'automatisation offre plusieurs avantages, tels que la réduction du travail manuel, l'augmentation du contrôle des processus, la prévisibilité et la prise de décision proactive basée sur l'information [32]. L'application des technologies IoT, d'automatisation, de communication et de détection dans les systèmes d'aquaponie a suscité un intérêt de recherche significatif et récurrent ces dernières années.

Des recherches considérables ont été menées sur l'intégration de l'Internet des objets dans les systèmes aquaponiques. Dans une enquête antérieure [33], un système de surveillance a été décrit pour observer la température de l'eau, le pH, la concentration en oxygène dissous (DO) et divers autres paramètres pertinents pour l'aquaponie. Le système comprenait des capteurs pour recueillir des données, qui étaient ensuite transmises à un serveur cloud et rendues accessibles en temps réel via Internet. Ce système a efficacement maintenu la qualité et le flux de l'eau, assurant ainsi leur préservation. Abhay Dutta et al. [34] ont créé un système pour stocker des bases de données et ont établi une division de surveillance chargée de surveiller le pH, la température, l'humidité et le niveau d'eau des systèmes aquaponiques. Les informations collectées étaient ensuite transmises à un serveur web, où les utilisateurs pouvaient accéder aux données sous format JSON et sous format graphique. Daniela et al. [35] ont présenté un système d'aquaponie qui fonctionne automatiquement et comprend des fonctionnalités telles que l'ajustement continu du prélèvement d'eau et la surveillance de la température de l'eau, du pH et de la température de l'air. Adrian K. Pasha et al. [36] ont développé un système qui permet la visualisation de divers paramètres dans un système hydroponique, notamment la température de l'eau, le pH et le niveau d'eau. De plus, des informations sur la pompe à eau, la lampe, le ventilateur et la cloche sont également affichées. Ces informations sont présentées sous forme de tableau sur une page web, accessible à partir de différents navigateurs web et de différents types d'appareils. Cependant, il existe un potentiel de développement ultérieur pour étendre la surveillance de paramètres supplémentaires et le contrôle de plus de dispositifs.

Bien que diverses approches pour surveiller les systèmes aquaponiques à l'aide de l'Internet des objets aient été présentées, un opérateur expérimenté est toujours nécessaire pour observer les lectures du système et répondre rapidement à toute défaillance. De plus, les méthodes existantes ne facilitent pas le contrôle du système par l'opérateur via l'Internet des objets. Ce travail vise à concevoir un système aquaponique automatisé qui utilise l'IoT pour allumer et éteindre l'éclairage, la pompe à eau, ainsi que pour réguler le pH de l'eau, la température des plantes, etc.

7.2 Projets réalisés

Parmi les études préliminaires, plusieurs projets réalisés ont été identifiés.

Un exemple est celui du projet "Sustainable Smart Aquaponics Farming Using IoT and Data Analytics"[37]. Ce projet visait à développer une aquaponie capable de transmettre des données via l'IoT et de nourrir les poissons à l'aide d'un réseau neuronal profond. Les capteurs utilisés comprenaient ceux de température, d'humidité, de pH, d'humidité du sol et un kit d'alerte d'ammoniac. Les données collectées étaient traitées par un réseau neuronal, qui ajustait automatiquement l'alimentation des poissons en fonction des fluctuations du pH, assurant ainsi un environnement sain pour les poissons.

Un autre projet, "Smart Aquaponics with Disease Detection"[38], se concentrait sur l'utilisation du machine learning pour détecter les maladies sur les feuilles des plantes. Les capteurs comprenaient ceux de température, d'humidité, de pH, de niveau d'eau, ainsi que des caméras pour l'imagerie des feuilles. L'utilisation de l'intelligence artificielle permet d'analyser les données pour identifier les signes de maladies et de déclencher des actions telles que l'allumage de Light-Emitting Diode **LED** ou de buzzers pour alerter les exploitants.

Un troisième projet, "Smart Aquaponics System for a Small-Scale Farmer for Highly Urbanized Settler"[39], se distinguait par son intégration avec l'application Blynk pour des commandes à distance. Les capteurs incluaient ceux de pH, d'humidité du sol, de turbidité, de niveau d'eau, ainsi qu'une photorésistance. Des actionneurs comme un buzzer et une LED rouge étaient utilisés pour signaler des conditions anormales, tandis qu'un chauffe-eau maintenait la température optimale pour les poissons.

"Towards an improved internet of things sensors data quality for a smart aquaponics system yield prediction"[40] se concentrait sur l'utilisation de l'intelligence artificielle pour prédire le poids

et la longueur des poissons. Les capteurs comprenaient ceux de pH, de turbidité, de TDS, de température et d'humidité, ainsi que des détecteurs de gaz pour surveiller les niveaux d'ammoniac. Ce projet présentait des défis techniques liés à la qualité des données des capteurs, mais offrait des perspectives intéressantes pour la prédiction de rendement.

Enfin, le projet "Remotely operated vehicle (ROV) robot for monitoring quality of water based on IoT"[41] utilisait un véhicule robotisé pour évaluer la qualité de l'eau. Les capteurs mesuraient le pH, la turbidité et les TDS. Ce projet était novateur dans son approche, permettant une surveillance détaillée de la qualité de l'eau dans des environnements aquaponiques.

Les informations ci-dessus sont résumées dans le **Tableau I-1** ci-dessous :

Projet	Capteurs utilisés	Intelligence artificielle	Collecte de données	Application	Cartes électroniques utilisées
Sustainable Smart Aquaponics Farming Using IoT and Data Analytics	Capteur de Température et Humidité, Capteur PH, Capteur d'humidité du sol et un kit d'alerte d'ammoniac	Deep Neural Network	ThingSpeak	Réceptionner les données du système (PH et Température) et donner son état. Elle vérifie la santé du système qui est mise à jour après que le Raspberry Pi ait calculé le résultat en utilisant le modèle d'apprentissage (DNN).	Arduino Uno + Module Wifi ESP 8266 Raspberry PI3
Smart Aquaponics with Disease Detection	Capteurs de température et d'humidité, capteur d'humidité du sol, PH, niveau d'eau et des caméras pour avoir les images des feuilles.	Détection des maladies des feuilles grâce aux caméras.	ThingSpeak		02 Raspberry Pi3 et un Arduino Uno

Smart Aquaponics System for a Small-Scale Farmer for Highly Urbanized Settler	Capteur d'humidité du sol, Température, PH, Turbidité, un détecteur de niveau d'eau et une photorésistance			Blynk	NodeMCU V3 ESP8266 Esp32 Cam pour la surveillance
Towards an improved internet of things sensors data quality for a smart aquaponics system yield prediction"	PH, Turbidité, TDS, Température et humidité, MQ135 et MQ137 (un détecteur de gaz pour le nitrate dégagé dans l'eau)	Prédire le poids et la longueur d'un poisson Régression linéaire, régression ridge, régression Lasso, K plus proches voisins l'arbre de décision		Thingspeak	Arduino Mega 2560 + Wi-Fi microcontroller
Remotely operated vehicle (ROV) robot for monitoring quality of water based on IoT	PH, Turbidité, TDS			Thingspeak	Arduino nano ESP

Tableau I-1 Résumé des informations sur les réalisations antérieures

8 Conclusion

Ce premier chapitre nous a permis d'explorer en profondeur le concept de l'aquaponie, un système intégré de production alimentaire qui combine l'aquaculture et l'hydroponie pour créer un écosystème durable et efficace. Nous avons commencé par définir l'aquaponie et ses principes de base, avant de plonger dans les détails des composants individuels qui constituent ce système.

Nous avons étudié les systèmes d'élevage aquacole, en détaillant les différentes méthodes comme les systèmes d'étang, de bassins, de cages, de parcs en eau libre et les systèmes de recirculation aquacole (RAS). Chacune de ces méthodes présente des avantages et des inconvénients, en fonction des conditions spécifiques et des objectifs de production.

Ensuite, nous avons passé en revue les principales espèces de poissons adaptées à l'aquaculture en Algérie, telles que le Tilapia du Nil, la Carpe commune, le Poisson-chat africain, la Truite arc-en-ciel, le Loup de rivière et le Goujon. Chaque espèce a été examinée en termes de ses caractéristiques, de ses besoins environnementaux et de sa pertinence pour les systèmes aquaponiques.

Le chapitre a également abordé la culture hors sol via l'hydroponie, en présentant les différents types de systèmes hydroponiques comme le lit média, la méthode d'eau profonde (DWC), la technique du film nutritif (NFT) et les tours verticales. Nous avons identifié les plantes adaptées à un système aquaponique, notamment les légumes et les fruits, et comment elles peuvent être intégrées efficacement dans un système aquaponique.

Nous avons ensuite tracé l'histoire de la culture en aquaponie, expliquant son évolution et son adoption croissante dans diverses régions du monde. Les principes de fonctionnement de l'aquaponie ont été détaillés, mettant en lumière l'élevage des poissons, la filtration biologique, la culture des plantes et le retour de l'eau, pour maintenir un équilibre écologique optimal.

Les avantages de l'aquaponie ont été discutés, soulignant la conservation de l'eau, l'amélioration des taux de croissance et des rendements, la sécurité alimentaire, l'efficacité de l'espace, la réduction de la pollution et l'adaptabilité aux zones urbaines.

Enfin, nous avons abordé l'état de l'art, mettant en perspective les avancées récentes et les recherches en cours dans le domaine de l'aquaponie.

Ce chapitre a établi une base solide pour comprendre les composants et les principes de l'aquaponie, préparant ainsi le terrain pour les sections suivantes, où nous détaillerons les aspects pratiques de notre projet de création d'une installation de smart aquaponie.

Chapitre II.

Composants et Technologies Utilisées

1 Introduction

Dans le domaine de l'ingénierie électronique, les microcontrôleurs jouent un rôle essentiel en permettant le développement de solutions compactes et efficaces pour le contrôle de divers processus. Ces composants ont révolutionné le domaine en condensant l'ensemble du contrôleur sur une petite carte de circuit imprimé.

Ce projet vise à créer une parfaite harmonie entre l'agriculture et la technologie, en combinant les principes de l'aquaculture et de l'hydroponie avec les avancées des systèmes embarqués et des capteurs. Au cœur de cette intégration se trouve une gamme variée de capteurs et d'actionneurs, qui, ensemble, permettront de contrôler et de surveiller efficacement l'environnement aquatique et les cultures associées.

Dans ce chapitre, nous explorerons en détail les éléments techniques utilisés pour composer une installation d'aquaponie connectée. Le chapitre est divisé en deux parties principales :

1. **Hardware** : Nous porterons une attention particulière aux microcontrôleurs, aux capteurs et aux actionneurs.
2. **Software** : Nous aborderons les plateformes de développement, l'Internet des Objets (IoT) et les kits d'IoT.

Ces composants jouent un rôle crucial dans la création d'un écosystème équilibré et productif, permettant de surveiller et de réguler les paramètres environnementaux avec précision et diligence.

2 Hardware

Le système sera équipé de capteurs pour mesurer les paramètres clés et d'actionneurs pour les réguler, le tout piloté par des microcontrôleurs.

2.1 Définition d'un microcontrôleur

Un microcontrôleur est une puce hautement intégrée qui comprend, sur une seule puce, la totalité ou la plupart des parties nécessaires à un contrôleur. Le microcontrôleur pourrait être appelé une "solution à une puce".

Le concept de base du contrôleur se repose principalement sur la régulation d'un processus. À une époque, les contrôleurs étaient exclusivement construits à partir de composants logiques et

étaient généralement de grands boîtiers lourds. Grâce aux travaux de trois ingénieurs d'Intel : Stan Mazor, Marcian Hoff (que l'on surnomme Ted Hoff) et Federico Faggin [1], les microprocesseurs ont été introduits et utilisés afin de tenir l'ensemble du contrôleur sur une petite carte de circuit imprimé.

Il comprend généralement : un CPU (unité centrale de traitement), la RAM (mémoire vive), l'EPROM/PROM/ROM (mémoire morte programmable effaçable ou en lecture seule), des E/S (entrée/sortie) – série et parallèle, des timers, un contrôleur d'interruption. [42], [42], [43], [44], [45]

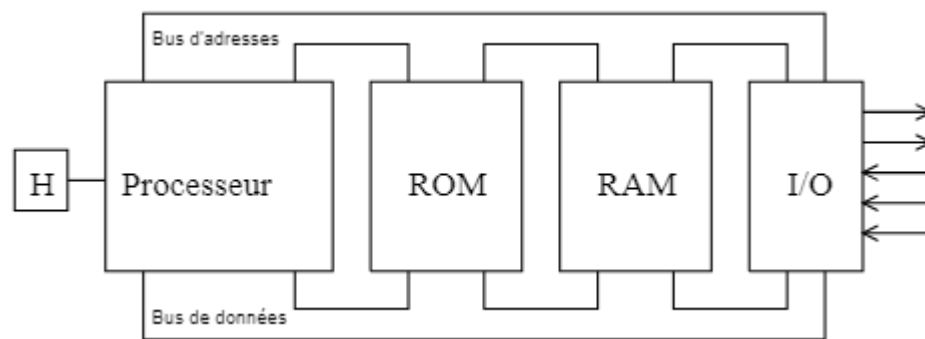


Figure II-1 : Architecture d'un microcontrôleur [2]

Dans notre projet, on a utilisé trois types de microcontrôleurs différents qui sont les suivants :

2.1.1 Arduino Uno WiFi Rev2

L'Arduino Uno WiFi Rev2 est une carte de développement open-source améliorée qui intègre la communication WiFi à la carte Arduino Uno classique [46] [43].

Le premier Arduino a été introduit en **2005** par une équipe italienne de l'Institut du Design d'Interaction d'Ivrea dans le but de permettre aux étudiants de s'initier à la programmation et à la conception de matériel grâce à une petite carte électronique [3]. Le microcontrôleur Arduino a été conçu à l'origine pour les professionnels et les étudiants afin de développer des dispositifs capables d'interagir avec l'environnement à l'aide de capteurs. Le logiciel Arduino pour le développement du code est connu sous le nom d'Arduino IDE (Integrated Development Environment)[47].



Figure II-2 : La carte Arduino Uno Rev2 [1]

Voici les caractéristiques clés de l'Arduino Uno Rev2 :

Caractéristique	Description
Microcontrôleur	Microcontrôleur ATmega328P, fonctionnant à une fréquence de 16 MHz.
Mémoire	32 Ko de mémoire flash pour le stockage du code, 2 Ko de SRAM et 1 Ko d'EEPROM.
Interfaces	14 broches d'E/S numériques (dont 6 peuvent être utilisées comme sorties PWM en anglais : Pulse Width Modulation), 6 entrées analogiques.
Connectivité	Interface USB pour la programmation et l'alimentation, connecteur d'alimentation externe.
Wi-Fi	Wi-Fi intégrés, offrant une connectivité sans fil pour les projets IoT.
Compatibilité	Compatible avec une grande variété de capteurs, actionneurs et modules grâce à ses interfaces.
Facilité d'utilisation	Facile à programmer et à utiliser grâce à l'IDE Arduino et à sa communauté de support active.

Tableau II-1 les caractéristiques clés de l'Arduino Uno Rev2 [46]

2.1.2 ESP8266 et ESP32 :

L'ESP8266 et l'ESP32 sont des microcontrôleurs de type système sur puce (system on a chip en anglais, en abrégé **SoC**) développés par **Espressif Systems**, spécialisés dans la connectivité WiFi et Bluetooth, ont révolutionné le domaine de l'IoT grâce à leur puissance de traitement et les module de connectivité intégrée[48] [49].

1. ESP8266

L'ESP8266, comme illustré dans la Figure II-3, est un SoC conçu pour se connecter à Internet. Sorti en 2014, il est très populaire pour les projets IoT grâce à son prix abordable et à sa petite taille, ce qui le rend plus efficace à utiliser dans des boîtiers ou des appareils compacts [48].



Figure II-3 ESP8266 12E module [4]

Le Tableau II-2 ci-dessous a été conçu d'après les données du site web suivant [50]

Caractéristique	Détail
Processeur	32-bit RISC CPU (Tensilica L106)
Fréquence d'horloge	80 MHz (extensible à 160 MHz)
Mémoire RAM	50 kB de SRAM
Mémoire Flash	512 kB à 4 MB (selon le modèle)
Wi-Fi	2,4 GHz 802.11 b/g/n
Tension d'alimentation	3,0 à 3,6 V
Consommation d'énergie	Mode actif : ~70 mA, veille profonde : ~10 μ A
Interface	UART, SPI, I ² C, I ² S, PWM, GPIO
Nombre de GPIO	Jusqu'à 17 (selon la configuration)
Cryptographie	WEP, WPA/WPA2
Dimensions	18 mm x 20 mm (ESP-12E module)
Température de fonctionnement	-40°C à +125°C (module interne)

Tableau II-2 caractéristiques clés de l'ESP8266 [50]

2. ESP32

L'ESP32, représenté en Figure II-4, est le successeur de l'ESP8266[49]. C'est un SoC plus puissant.

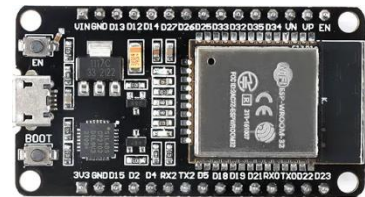


Figure II-4 ESP32

Le Tableau II-3 ci-dessous résume ses caractéristiques

Caractéristique	Description
Wi-Fi et Bluetooth	Wi-Fi et Bluetooth intégrés, offrant une connectivité sans fil pour les projets IoT.
Puissance de calcul	Processeur dual-core cadencé jusqu'à 240 MHz pour une puissance de calcul suffisante.
Interfaces	Large gamme d'interfaces : 36 GPIO (voir Figure II-5), ADC, SPI, I ² C, UART, etc., pour une connectivité flexible.
Faible consommation d'énergie	Conception économe en énergie, adaptée aux applications alimentées par batterie.
Support de développement	Compatible avec différentes plateformes : Arduino IDE, MicroPython, ESP-IDF, etc.

Tableau II-3 caractéristiques clés de l'ESP32 [51]

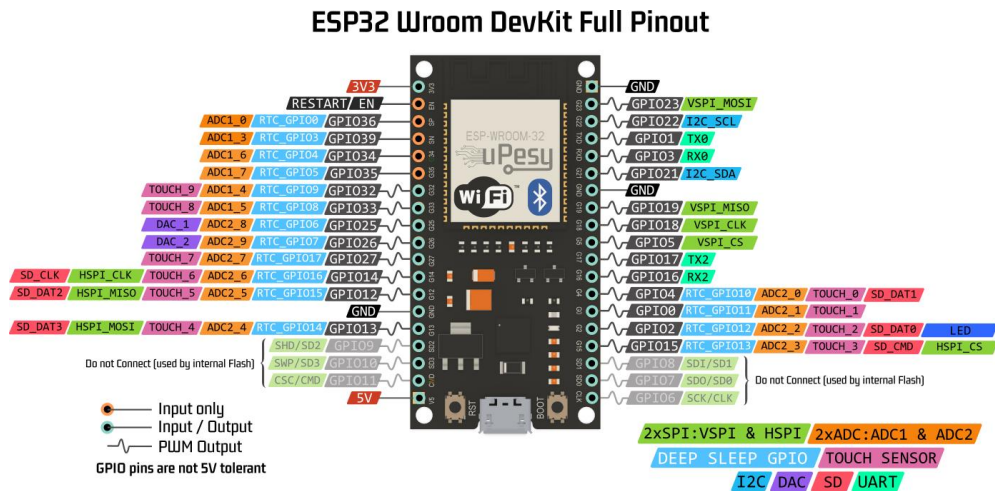


Figure II-5 Brochage d'une carte ESP32 [5]

L'ESP32 apporte plus de puissance et de fonctionnalités que l'ESP8266. Ces modules sont entièrement compatibles avec l'IDE Arduino « integrated development environment », ESP-IDF (ESP Iot Development Framework), MicroPython, Lua RTOS, etc. On va voir cela plus en détails dans Les plateformes de développement page 51.

2.2 Les capteurs

Les capteurs sont des dispositifs électroniques qui mesurent et détectent des grandeurs physiques ou des conditions de l'environnement, telles que la température, l'humidité, la pression, etc. Ils sont largement utilisés dans divers domaines tels que l'automatisation industrielle, la domotique, la météorologie et bien d'autres applications.

Dans notre projet, nous avons intégré plusieurs types de capteurs pour collecter des données essentielles, tels que :

2.2.1 Capteur de Température DS18B20

Le DS18B20, représenté en Figure II-6 est capteur de température digital qui suit le protocole One-Wire et peut mesurer la température de -55°C à +125°C avec une précision de +/-5%.

Le protocole de communication utilisé est le One-Wire. Les capteurs de température intégrant ce protocole sont devenus très prisés, car ils sont peu coûteux et faciles à utiliser, fournissant

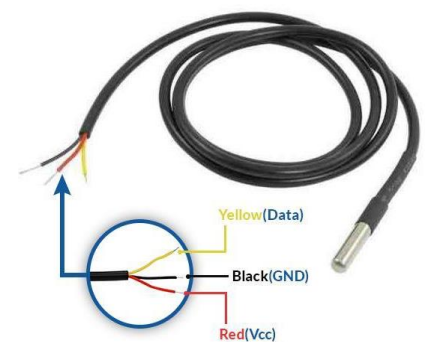


Figure II-6: Le capteur de Température DS18B20 [6]

directement des relevés de température numériques calibrés. Ils tolèrent mieux les longs fils entre le capteur et les microcontrôleurs [52].

Pour résumer les caractéristiques clés du capteur de Température voici le Tableau II-4 ci-dessous :

Caractéristique	Description
Type de capteur	Capteur de température numérique à une seule ligne, offrant une précision élevée et une sortie numérique.
Précision	Précision de $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ dans la plage de température de -55°C à $+125^{\circ}\text{C}$.
Résolution	Résolution configurable de 9 à 12 bits, permettant des mesures de température très précises.
Alimentation	Fonctionne sur une plage d'alimentation de 3,0V à 5,5V, ce qui le rend compatible avec une variété de systèmes.
Interface de communication	Interface à un seul fil (One-Wire), permettant une connexion simple à des microcontrôleurs.
Broches	Trois broches au total : Vcc (+5V), Broche de données (« communication » à partir duquel nous obtiendrons des relevés de température), GND (terre).
Étanchéité	Disponible dans un boîtier étanche
Applications	Utilisé dans une variété d'applications telles que la surveillance environnementale, le contrôle de la température, etc.

Tableau II-4 les caractéristiques clés du capteur de Température DS18B20 [52]

2.2.2 Sonde PH 4502C

La sonde **potentiel hydrogène pH**, comme illustré dans la Figure II-7 est un capteur utilisé pour mesurer le niveau d'acidité ou de basicité d'une substance ou d'une solution. Vous trouverez ci-dessous le Tableau II-5 résumant ses caractéristiques.

Le **pH normal** a une valeur de **7** tandis que la valeur du **pH > 7** indique que la substance a des propriétés **alcalines** tandis que la valeur du **pH <7** indique des propriétés **acides**. [53]



Figure II-7 Sonde pH 4502C

1. Principe de fonctionnement :

Lorsque la sonde est placée dans une solution pour mesurer le pH, les ions hydrogène s'accumulent autour de l'ampoule et remplacent les ions métalliques de l'ampoule. Cet échange d'ions génère un certain flux électrique qui est capté par le fil d'argent.

La tension de ce flux électrique est mesurée par le pH-mètre qui la convertit en valeur de pH en comparant la tension générée avec l'électrode de référence.

L'augmentation de l'acidité de la solution entraîne une plus grande concentration d'ions hydrogène, ce qui augmente la tension. Cette augmentation de la tension diminue la lecture du pH dans le pH-mètre. [53]

Caractéristique	Description
Type de sonde	Mesurant le pH d'une solution aqueuse.
Plage de mesure	Plage de mesure typique de 0 à 14 pH, couvrant une large gamme de valeurs de pH.
Précision	Précision typique de $\pm 0,1$ à $\pm 0,2$ pH, offrant des mesures précises du pH de la solution.
Température de fonctionnement	Plage de température de fonctionnement de 0°C à 60°C.
Temps de réponse	Rapide, généralement quelques secondes pour stabiliser la mesure.
Matériaux	Électrodes en verre et jonction de référence en céramique, offrant une bonne durabilité et une réponse rapide.
Entretien	Nécessite un entretien régulier, y compris le nettoyage et le stockage appropriés entre les utilisations.
Connectivité	Habituellement équipée d'une prise BNC pour la connexion à un dispositif de mesure de pH.
Utilisation	L'agriculture, l'aquaculture, les piscines, etc.

Tableau II-5 les caractéristiques clés du Sonde PH [53]

2.2.3 Capteur de Conductivité de l'eau TDS (Total Dissolved Solids) :

La TDS désigne la quantité totale de tous les solides dissous dans l'eau, y compris les minéraux, les sels, les ions métalliques, etc. Elle est exprimée en mg/L ou en ppm comme exprime le Tableau II-6.

Le capteur TDS, comme illustré dans la Figure II-8 utilise la méthode de conductivité électrique, où deux sondes sont immergées dans un liquide ou une solution, puis un circuit de traitement du signal produira une sortie qui montre la conductivité de la solution.[54]



Figure II-8 capteur de Conductivité de l'eau TDS

Caractéristique	Description
Plage de mesure	0 à 1000ppm, exprimée en microsiemens par centimètre ($\mu\text{S}/\text{cm}$) ou en parties par million (ppm).
Courant de travail	3 à 6mA
Temps de réponse	5 S
Pins	+ : VCC - : GND A+ : Sortie analogique du TDS
Alimentation	3,3V à 5V

Tableau II-6 les caractéristiques du sonde TDS

2.2.4 Capteur de Turbidité TS-300

La turbidité est la mesure de l'aspect plus ou moins trouble de l'eau ; c'est l'inverse de la limpidité. Techniquement, la turbidité correspond à la propriété optique de l'eau permettant à une lumière incidente d'être déviée (diffraction) ou absorbée par des particules plutôt que transmise en ligne droite. [55]

Le capteur de turbidité de l'eau, représenté en Figure II-9 est un capteur qui peut déterminer le niveau de turbidité de l'eau qui l'entoure. Il utilise la lumière pour détecter les particules en suspension dans l'eau en mesurant sa transmission et le taux de diffusion, qui change avec la quantité de matières en suspension totales (TTS : Total Suspended Solids) dans l'eau. Une augmentation sur TTS se traduit automatiquement par une augmentation de la turbidité du liquide ce qui veut dire que l'eau est trouble [56]. Ci-dessous, vous trouverez Tableau II-7 qui montre quelques caractéristiques de ce capteur.



Figure II-9 Capteur de Turbidité TS-300 [10]

Caractéristique	Description
Principe de mesure	Utilise la diffusion de la lumière infrarouge IR ou la transmission de lumière à travers le liquide pour mesurer la turbidité.
Plage de mesure	De 0 à 100 exprimée en NTU (unités de turbidité néphélogométrique).
Interface de communication	Une sortie analogique pour connecter à un microcontrôleur.
Alimentation	Une tension d'alimentation de 3,3V à 5V.
Température de fonctionnement	De 20 °c à 90 °c.

Tableau II-7 Caractéristiques capteur de Turbidité TS-300

2.2.5 Capteur Ultrasons HC-SR04

Le capteur à ultrasons HC-SR04, comme illustré dans la Figure II-10 est basé sur la technologie d'émission et de réception de sons ultrasoniques comme une chauve-souris. Le capteur émet une



Figure II-10 HC-SR04

impulsion sonore à une fréquence de 40 kHz et entend le son. On mesure le temps écoulé entre l'émission d'une impulsion ultrasonique par le capteur et la réception de son écho. La distance est ensuite calculée en utilisant la vitesse du son dans l'air, qui est d'environ 344 mètres par seconde (soit approximativement 1240 kilomètres par heure) [57]). Le Tableau II-8 résume des caractéristiques du HC-SR04.

Caractéristique	Description
Pins d'entrée/sortie	+ : VCC - : GND Echo : Module réception pin d'entrée Trig : Module d'émission pin de sortie
Technologie	Basé sur l'émission et la réception d'ondes sonores ultrasoniques.
Fréquence d'émission	Fréquence d'environ 40 kHz.
Précision	± 0.3 cm
Angle de détection	15 °

Tableau II-8 Résumé de la datasheet du HC-SR04

Le capteur ultrasonique détecte l'objet et mesure la distance. Dans ce système proposé, l'eau est également considérée comme un objet. Lorsqu'un rayon sonore frappe l'eau, cela entraîne la génération d'un écho qui est détecté par la partie écho du capteur ultrasonique. Le fonctionnement du capteur ultrasonique pour notre projet est donné dans la Figure II-11. [58] [59]

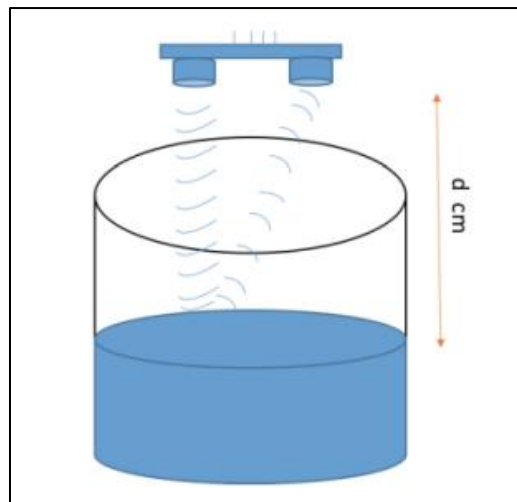


Figure II-11 : La réflexion des ultrasons dans l'eau [13]

2.2.6 Photorésistance

Une photorésistance (aussi appelée LDR, pour « Light Dependent Resistor »), représenté en Figure II-13, est un composant électronique dont la valeur ohmique varie en fonction de la luminosité auquel il est soumis [4].

La partie sensible du capteur est une piste de sulfure de cadmium en forme de serpent : l'énergie lumineuse reçue déclenche une augmentation de porteurs de charges libres dans ce matériau, de sorte que sa résistance électrique évolue.

En d'autres termes la valeur de cette résistance diminue lorsque la luminosité augmente et elle augmente lorsque la luminosité diminue comme montre l'exemple dans la Figure II-12.[60] [61]

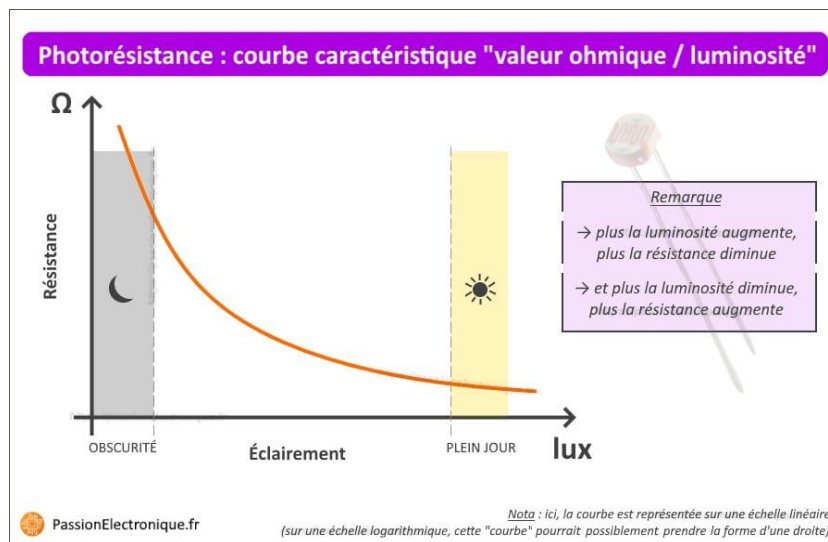


Figure II-13 Capteur du lumière LDR

Figure II-12 un exemple de courbe caractéristique (résistivité / luminosité) [15]

Caractéristique	Description
Principe de fonctionnement	La résistance de la photoresistance diminue lorsque la lumière incidente augmente, et vice versa.
Plage de mesure	0 à 100000 lux « est l'unité de mesure de l'éclairage lumineux »
Sensibilité	Sensible aux variations de lumière, il peut détecter les changements d'éclairage.
Connectivité	Équipée de deux broches (pins) pour se connecter à un circuit externe, avec une variation de résistance proportionnelle à la lumière.
Alimentation	De 3,3V à 5V.

Tableau II-9 Caractéristiques clés de LDR

2.2.7 Capteur de température et d'humidité DHT11

Le DHT11, comme illustré dans la Figure II-14, permet de mesurer la température et le taux d'humidité présents dans un environnement. Il comprend un composant de mesure d'humidité de type résistif et un composant de mesure de température NTC (signifie "Negative Temperature Coefficient", appelé CTN en français "coefficient de température négatif").



Figure II-14 Capteur DHT11

Il a une plage de mesure comprise entre 0°C et 50°C pour la température avec une précision de $\pm 2^\circ\text{C}$, et de 20% à 90% pour l'humidité relative avec une incertitude de $\pm 5\%$ pour plus de caractéristiques, le Tableau II-10 ci-dessous résume son datasheet [62].

Caractéristique	Description
Type de capteur	DHT11
Plage de mesure	La température de 0 à 50°C et l'humidité de 20% à 90%.
Précision	Précision de $\pm 2^\circ\text{C}$ pour la température et $\pm 5\%$ pour l'humidité.
Méthode de mesure	Utilise des résistances intégrées pour mesurer la température et l'humidité dans l'environnement.
Temps de réponse	500 ms
Interface de communication	Pin de sortie digitale Produit à la fois la température et l'humidité GND et VCC
Alimentation	Une tension électrique de 3,3V à 5V.

Tableau II-10 Résumé de la Fiche de données du DHT11 [62]

2.2.8 MQ135

Le MQ135, représenté en Figure II-15 est un capteur de qualité de l'air qui détecte divers polluants présents dans l'atmosphère, tels que le CO₂, l'alcool, le benzène, l'oxyde d'azote (NO_x), l'ammoniac (NH₃) et la fumée. Il est conçu pour être utilisé dans des applications de contrôle de la qualité de l'air et de détection de fuites de gaz.

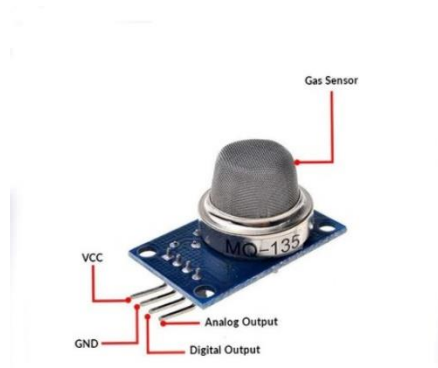


Figure II-15 Capteur du gaz MQ135

Ci-dessous le Tableau II-11 qui montre des caractéristiques Techniques du capteur MQ135

Caractéristique	Valeur
Tension nominale	5v
Sorties	Analogique et numérique (seuil réglable)
Indicateur LED	Oui
Détecte	NH ₃ , NO _x , alcool, benzène, fumée, CO ₂
Sensibilité	10-300 ppm NH ₃ , 10-1000 ppm Benzène, 10-300 ppm Alcool
Plage de mesure	10-1000 ppm
Précision	≥ 3%
Réaction après mise sous tension	≤ 300s
Tension chauffante	5.0V ± 0.2V / 1.5V ± 0.1V

Tableau II-11 caractéristiques Techniques du capteur MQ135

2.3 Les actionneurs

Les actionneurs jouent un rôle crucial dans la mise en œuvre des commandes à distance et des réponses physiques aux données collectées par les capteurs.

Parmi les actionneurs les plus couramment utilisés, on retrouve les relais, L'électrovanne, les moteurs électriques, Servo-moteur, pompe, etc. Ci-dessous, nous allons détailler chaque type d'actionneur.

2.3.1 Électrovanne

L'électrovanne 12V, comme illustré dans la Figure II-16, est un type de vanne conçu spécialement pour le contrôle des flux des liquides de manière fiable. Elle est de type TOR (Tout ou rien), c'est-à-dire qu'elle est soit normalement ouverte soit normalement fermée. Son principe de fonctionnement se repose sur l'électromagnétisme, c'est à dire qu'un courant électrique alimente une bobine qui crée un champ magnétique dans lequel se déplace le noyau, ce noyau pilote l'ouverture et la fermeture de l'entrée de l'électrovanne.



Figure II-16 Électrovanne 12V

2.3.2 Servo-moteur SG90

Le servo moteur SG90, représenté en Figure II-17, est un type de moteur à rotation continue contrôlé par un signal numérique. Lorsque le servo reçoit un signal numérique sur sa broche de commande, il analyse ce signal pour déterminer la position souhaitée pour l'arbre de sortie. Le circuit de rétroaction de position utilise alors un capteur pour mesurer la position actuelle de l'arbre de sortie, et un comparateur pour comparer la position demandée à la position actuelle. Il a la capacité de tourner son axe à un angle de 0 à 180 degrés. Le SG90 a des limites de vitesse et de couple ce qui laisse dire qu'il ne peut donc pas être utilisé pour des applications nécessitant des mouvements rapides ou des charges lourdes.



Figure II-17 Servo moteur SG90

2.3.3 Relais

Le relais, représenté en Figure II-18, est un composant électromécanique qui permet d'ouvrir ou fermer un contact. Il comporte deux parties :

- Une bobine qui induit un champ magnétique lorsqu'elle est parcourue par un courant électrique. C'est la partie commande.
- Un contact ou interrupteur mis en mouvement lorsque le champ magnétique est présent. C'est la partie puissance.

Le courant circulant à travers ce contact peut atteindre plusieurs Ampère.

Ces deux parties sont isolées électriquement (ce phénomène s'appelle l'isolation galvanique) et présente l'avantage de protéger le microcontrôleur contre les éventuels problèmes de surtension ou surintensité pouvant apparaître sur la partie commande.



Figure II-18 Module RELAIS monocanal 5V

2.3.4 Pompe 12V

Une pompe à eau est un appareil qui utilise un moteur électrique ou un moteur à essence pour pomper des liquides à travers un tuyau, comme illustré dans la Figure II-19. Il existe de nombreux types de pompes à eau, qui diffèrent par leur taille, leur puissance, leur débit et leur fonctionnement. Une pompe à eau de 12 V est une pompe électrique submersible qui utilise un moteur électrique alimenté par une tension de 12 V pour pomper des liquides à travers un tuyau. Elle est souvent utilisée dans les applications de refroidissement, de transfert de liquides et de systèmes de distribution d'eau.



Figure II-19 : Une pompe 12V

2.3.5 LEDs

Les LEDs (diodes électroluminescentes) sont des semi-conducteurs qui convertissent l'électricité en lumière lorsqu'ils sont traversés par un courant électrique. Elle est considérée comme une diode : elle ne laisse passer le courant électrique que dans un seul sens, le sens passant (l'inverse étant le sens bloquant) : pour que le courant puisse passer, la cathode (-) qui doit être connecté du côté de la masse (GND) et l'anode (+) qui doit être connecté du côté du port numérique. Pour que la courant qui la traverse ne soit pas trop important il faut toujours la brancher en série avec une résistance électrique afin qu'elle ne soit pas endommagée, comme montré dans l'exemple de la Figure II-21 [63].

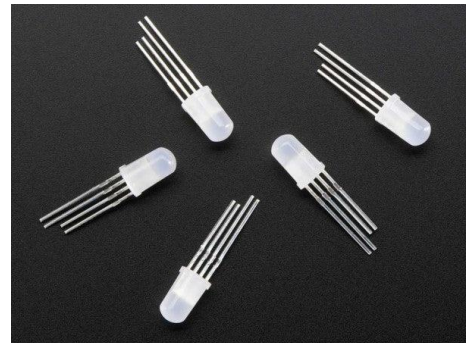


Figure II-20 Des LEDs indicatives

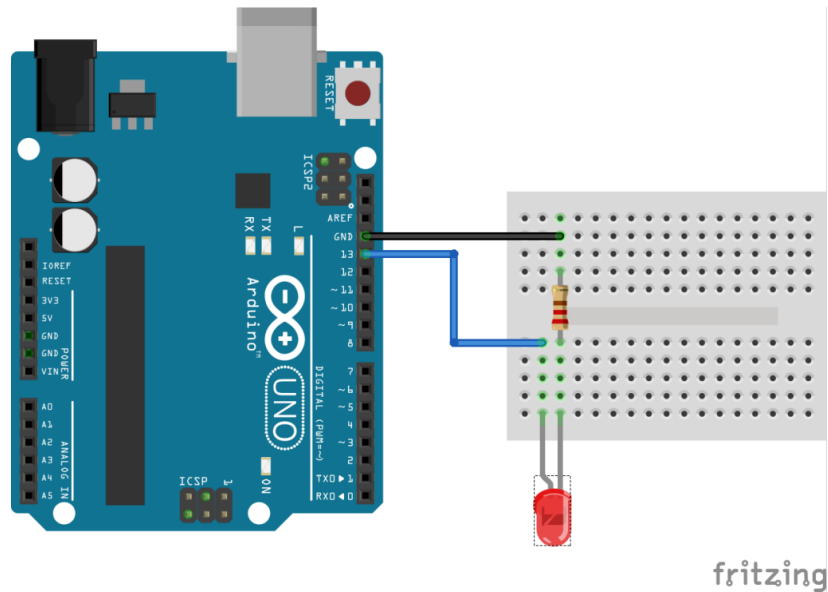


Figure II-21 Montages sur une plaque d'essai pour allumer une LED rouge [17]

2.3.6 Buzzer

Le buzzer est un composant numérique utilisé pour générer du son. Il peut être connecté à des sorties numériques et qui émet une tonalité lorsque la sortie est **High**. Alternativement, il peut être connecté à une sortie analogique de modulation de largeur d'impulsion pour générer diverses tonalités et effets.

Le buzzer est composé d'une lame qui bouge avec l'effet piézoélectrique. La piézoélectrique est la propriété que possède certains minéraux de se déformer quand ils sont soumis à un champ électrique. Il permet de transformer l'énergie électrique en vibration. Il permet de jouer des notes et des mélodies simples.

Il existe deux types de buzzers : les buzzers actifs et les buzzers passifs. Voici les principales différences entre les deux :

1. Buzzers Actifs, représenté en Figure II-22

- Ont une source d'oscillation interne
- Émettent un son dès qu'ils sont sous tension



Figure II-22 Un buzzer Actif

- Peuvent être contrôlés facilement par programme, un niveau haut ou bas sur la broche les fait sonner
- Nécessitent une tension de fonctionnement de 3,3V à 5V.

2. Buzzers Passifs

- N'ont pas de source d'oscillation interne
- Ne peuvent pas émettre de son avec un signal DC (direct current en anglais), il faut les alimenter avec un signal PWM carré entre 2 kHz et 5 kHz
- Permettent de contrôler la fréquence du son émis et de créer des mélodies

Dans notre cas, nous avons utilisé un buzzer pour déclencher une alarme, et nous avons donc choisi un buzzer actif (voir la Figure II-22) car il peut générer un son sans nécessiter de signal de fréquence externe.

2.3.7 Module I2C

Un module I2C (Inter Integrated Circuit) Figure II-24 est un circuit imprimé qui permet de simplifier la connexion entre un écran LCD (Liquid Crystal Display, soit « affichage à cristaux liquides ») et un microcontrôleur, en utilisant le protocole de communication I2C par les pins **SDA** (Serial Data) « utilise pour la communication entre le microcontrôleur et les périphériques I2C » et **SCL** (Serial Clock) « utilise pour synchroniser la communication entre les dispositifs I2C » la Figure II-24 montre les différents pins de I2C. [20] [18]

Le module I2C intègre un circuit intégré PCF8574, qui est un extenseur d'entrées/sorties à 8 bits contrôlé par I2C. [64], [65], [66]

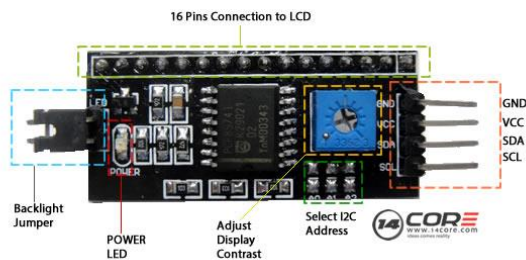


Figure II-24 Module I2C [20]

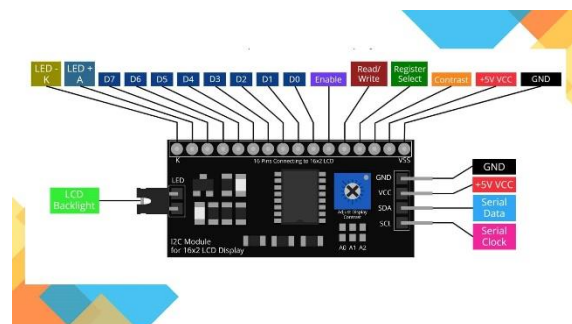


Figure II-24 Les différents pins du module I2C [18]

2.3.8 Afficheur LCD 20*4

L'Afficheur LCD 20*4 est un module d'affichage LCD qui peut afficher 4 lignes avec 20 caractères par ligne comme il est représenté dans la Figure II-25.

Il est contrôlé via le bus I2C, comme déjà expliquer dans le titre précédent Module I2C, et offre un rétro-éclairage bleu pour une meilleure visibilité.



Figure II-25 Afficheur LCD 20X4

2.4 Autres Hardware utilisés

2.4.1 Plaque d'essai

Une plaque d'essai, aussi appelée breadboard ou protoboard, est un outil très pratique pour réaliser des montages électroniques sans soudure de manière temporaire avant de les transposer sur un circuit imprimé définitif. Cette plaque est généralement utilisée pour le prototypage et les tests. Elle est composée d'une surface plane percée de trous connectés électriquement entre eux selon un schéma interne Figure II-26.

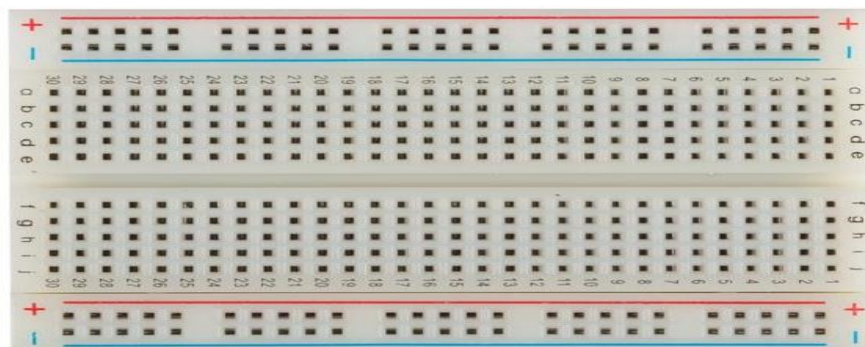


Figure II-26 Plaque d'essai

2.4.2 Plaque d'essai en époxy perforée

La plaque en époxy perforée, comme illustré dans la Figure II-27 est un outil électronique qui permet de réaliser des montages électroniques de manière permanente où les composants seront soudés directement sur la plaque

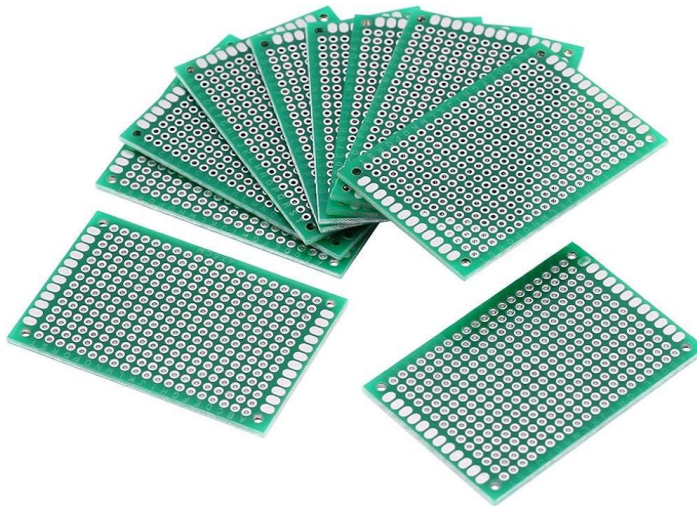


Figure II-27 Des plaque en époxy perforées

2.4.3 Câbles électriques

Des câbles électriques Figure II-29 sont utilisés pour établir des connexions entre différents composants électroniques sur la plaque d'essai. Ces câbles, souvent appelés fils de connexion ou jumpers, représenté en Figure II-28, permettent de relier les composants électroniques.

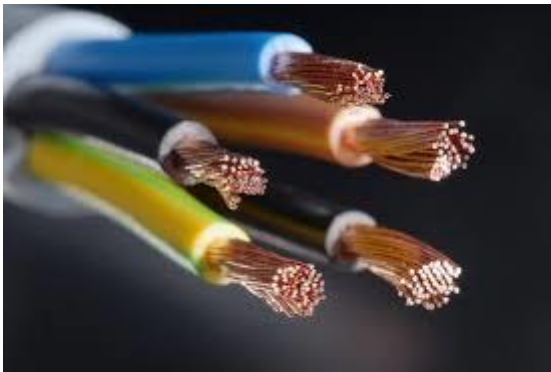


Figure II-29 Câbles électriques



Figure II-28 Fils de connexion

2.4.4 Batteries LIPO

Les batteries LIPO (Lithium Polymère) sont largement utilisées dans diverses applications électroniques pour alimenter des projets portables ou autonomes Figure II-30 et Figure II-31, en raison de leurs avantages spécifiques montrés dans le Tableau II-12 ci-dessous

Caractéristique	Description
Tension nominale	3.7V
Capacité	Varie selon le modèle (ex. 500mAh, 1000mAh, 2000mAh)
Courant de décharge	Dépend du modèle, généralement de 1C à 20C (où 1C = capacité de la batterie)
Dimensions	Varie selon la capacité, typiquement compactes pour une meilleure portabilité
Poids	Varie selon la capacité, de 50g à 150g
Type de connecteur	Japan Solderless Terminal JST ou autre connecteur standard pour une connexion facile
Température de fonctionnement	De 20°C à 60°C
Cycle de vie	Environ 300 à 500 cycles de charge/décharge
Protection intégrée	Souvent inclut un circuit de protection pour éviter les surcharges et les décharges profondes
Compatibilité	Compatible avec ESP32 et ESP8266 (via un régulateur de tension intégré)

Tableau II-12 les caractéristiques des batteries LIPO 3.7V



Figure II-30 Batteries LIPO
3.7V 700mAh



Figure II-31 Batteries LIPO
3.7V 1200mAh

Il est recommandé d'utiliser des modules de charge dédiés, comme ceux basés sur le **TP4056** Figure II-32, qui intègrent des protections contre les surcharges, les décharges excessives et les courts-circuits [67].

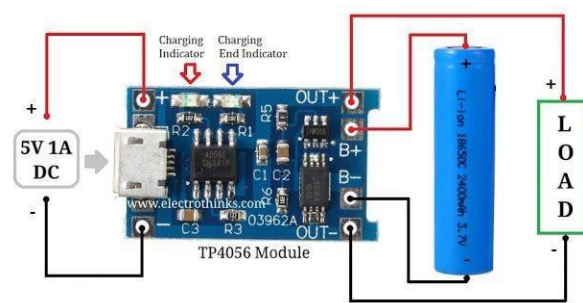


Figure II-32 Module de Charge TP4056

3 Software

Nous aborderons la plateforme de développement, Internet des Objets **IoT** et les kits **IoT**

3.1 Les plateformes de développement

La plateforme de développement est essentielle pour le développement et le déploiement d'applications embarquées. Elle fournit les outils nécessaires pour écrire, tester, et déboguer le code qui sera exécuté sur les microcontrôleurs. Il existe plusieurs plateformes de développement, parmi lesquelles on peut citer (IDE Arduino, ESP-IDF (Espressif IoT Development Framework), MicroPython, Lua RTOS, PlatformIO, ect [68], [69], [70]).

Nous avons utilisé l'**IDE Arduino** Figure II-33 car Au cours de notre formation en Génie industriel, nous avons utilisé cette plateforme pour divers travaux pratiques en électronique embarquée, ce qui nous a permis de rapidement maîtriser ces fonctionnalités et d'accélérer le processus de développement de notre boitiers embarqué pour notre projet.

3.1.1 IDE Arduino

L'IDE Arduino, représenté en Figure II-33 est une plateforme de développement et un outil populaire à utiliser pour programmer des microcontrôleurs tels que les Arduino, l'ESP32 et l'ESP8266.

Il offre une interface conviviale avec des fonctionnalités comme la coloration syntaxique, l'auto-complétions du code, et la vérification d'erreurs (voir Figure II-34).

Il dispose également d'une vaste bibliothèque de codes et d'exemples pour accélérer le développement, ainsi que d'une large communauté d'utilisateurs pour le support et les ressources.



Figure II-33 Icon de logiciel Arduino IDE

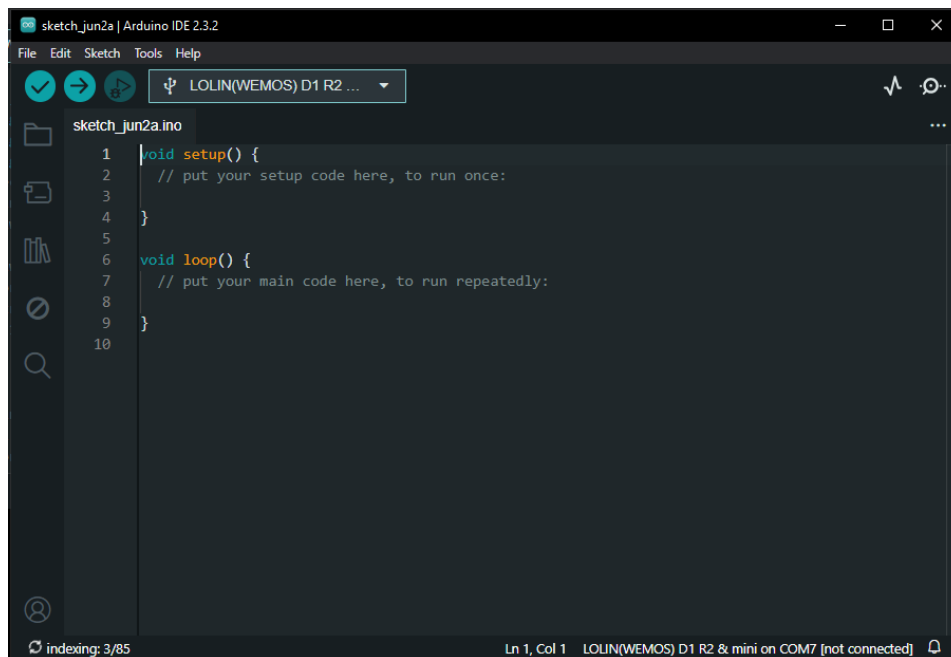


Figure II-34 Capture d'écran de l'interface Arduino IDE v2.3.2

3.2 L'Internet des objets

Kevin Ashton, chercheur au Massachusetts Institute of Technology MIT, est crédité pour avoir inventé le terme "Internet of Things" en 1999. Il a proposé l'idée que des objets physiques pouvaient être connectés à Internet via des capteurs, permettant ainsi une communication et une gestion automatisée.



Figure II-35
Kevin Ashton, 1999 — IoT

A travers ce qui suit nous allons voir une généralité sur IoT, les domaines d'utilisation, les protocoles de communication utiliser pour IoT, les plateformes utiliser dans ce domaine et en fin les kits IoT

3.2.1 Généralité sur IoT

L'Internet des objets (IoT) est un réseau interconnecté de dispositifs, de machines, d'objets et même d'êtres vivants qui possèdent des identifiants uniques (UID Universally unique identifier) et la capacité d'échanger des données sur un réseau sans nécessiter d'interaction humaine ou informatique directe [71]. Cette interconnexion permet une communication et un transfert de données fluides, menant à une automatisation et une efficacité accrue dans divers domaines [71] [72], [73], [74].

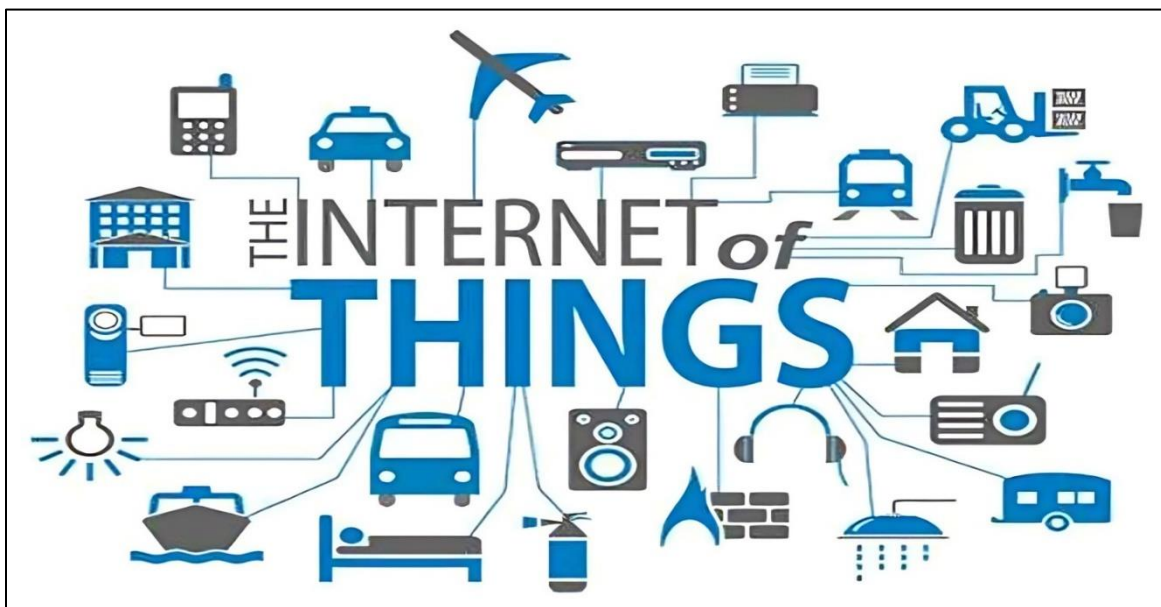


Figure II-36 Illustration des objets connectés

3.2.2 Domaines d'application de cette technologie

IOT joue un rôle instrumental dans de nombreux secteurs [72], [73], [75] :

1. Agriculture :

L'utilisation de l'IoT dans l'agriculture, souvent appelée "agriculture de précision", est en pleine expansion. Voici quelques statistiques[76], [77] :

- **Croissance du marché** : Le marché mondial de l'IoT agricole était évalué à environ 11,2 milliards USD en 2020 et devrait atteindre 20,9 milliards USD d'ici 2025, avec un taux de croissance annuel composé (CAGR Compound annual growth rate) de 13,7% .
- **Adoption des capteurs** : Les capteurs de surveillance de l'environnement et des cultures sont parmi les technologies IoT les plus adoptées, permettant de réduire jusqu'à 30% l'utilisation de l'eau et d'augmenter les rendements de **20% à 25%** .

Cette technologie va permettre de mesurer en temps réel les paramètres environnementaux et l'état des cultures pour optimiser l'utilisation des ressources (eau, engrais, pesticides) et les rendements [78].

2. Domotique :

La domotique, ou les maisons intelligentes, est un secteur important de l'IoT, utilisant cette technologie pour interconnecter les appareils électroménagers, l'éclairage et les systèmes de sécurité, offrant ainsi confort, économies d'énergie et contrôle à distance [78].

Voici quelques statistiques pertinentes [79], [80], [81] :

- **Croissance du marché** : Le marché mondial des maisons intelligentes était estimé à 79,3 milliards USD en 2020 et devrait atteindre 313,95 milliards USD d'ici 2026, avec un CAGR de 25,3%.
- **Adoption des appareils** : Environ 32% des foyers américains possédaient au moins un appareil de maison intelligente en 2020, et ce chiffre est en constante augmentation.

3. Santé :

L'IoT dans le domaine de la santé, également connu sous le nom de 'santé connectée', transforme la manière dont les soins sont fournis. Des objets connectés comme des montres ou des capteurs permettent de surveiller à distance l'état de santé des patients, envoyant des alertes en cas

d'urgence et fournissant des soins plus personnalisés [78]. Ci-dessous, quelques statistiques sur la croissance de l'IoT dans ce domaine [82], [83] :

- **Croissance du marché** : La taille du marché mondial de l'Internet des objets (IoT) dans le secteur de la santé était estimé à 175,61 milliards de dollars en 2024 et devrait atteindre à 822,54 milliards de dollars d'ici 2032, avec un CAGR de 21,3% .
- **Adoption des dispositifs** : En 2021, environ 60% des prestataires de soins de santé utilisaient des dispositifs IoT pour surveiller à distance la santé des patients.

4. Industrie 4.0:

L'IoT est au cœur de l'industrie 4.0, transformant la production et la gestion des usines en permettant l'automatisation, la maintenance prédictive, la réduction des temps d'arrêt et l'optimisation des processus de production grâce à l'interconnexion des machines et des systèmes [84] [85]. Ci-dessous, quelques statistiques sur la croissance de l'IoT dans ce domaine[86] :

- **Croissance du marché** : Le marché mondial de l'IoT industriel était évalué à 77,3 milliards USD en 2020 et devrait atteindre 110,6 milliards USD d'ici 2025, avec un taux de croissance annuel composé (CAGR) de 7,4% .
- **Amélioration de la productivité** : Les entreprises utilisant l'IoT pour la maintenance prédictive peuvent réduire les temps d'arrêt non planifiés de 20% à 50% et augmenter la productivité de 10% à 25% .
- **Automatisation et optimisation** : L'IoT permet une automatisation accrue et une optimisation des processus de production, ce qui se traduit par des gains d'efficacité significatifs et une meilleure gestion des ressources.

5. Villes intelligentes :

L'IoT est utilisé dans les villes pour gérer les transports, l'éclairage public, la collecte des déchets, la surveillance de l'environnement, les caméras de surveillance, les feux de circulation, etc., afin d'améliorer la qualité de vie des citoyens et de permettre une gestion plus efficace des ressources et des infrastructures urbaines [78]. Ci-dessous illustrent des statistiques récentes sur l'intégration de l'IoT dans ce domaine[87], [88]

- **Croissance du marché** : Le marché des technologies pour les villes intelligentes était estimé à 410,8 milliards USD en 2020 et devrait atteindre 820,7 milliards USD d'ici 2025, avec un CAGR de 14,8% .
- **Adoption des technologies** : Les villes qui utilisent des systèmes de gestion de l'éclairage public basés sur l'IoT peuvent réaliser des économies d'énergie de 50% à 75% .

Après avoir examiné toutes ces statistiques, on peut affirmer que l'IoT transforme la façon dont les entreprises et les individus interagissent avec le monde physique, en offrant une

connectivité, une automatisation et des analyses de données améliorées [84] [85]. L'adoption croissante dans de multiples secteurs souligne son importance grandissante dans la création d'un écosystème plus intelligent et interconnecté [71] [78].

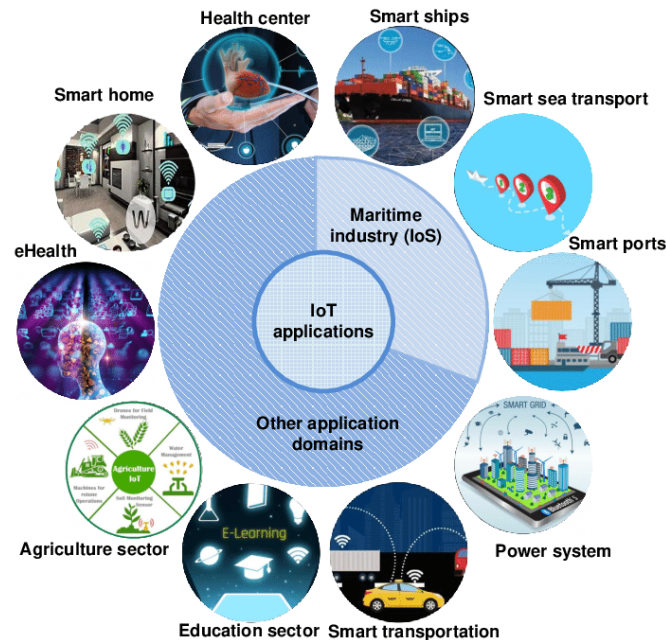


Figure II-37 Domaines d'application de la technologie IOT

3.2.3 Protocoles de Communication Utilisés dans IoT

Dans l'Internet des Objets (IoT), plusieurs protocoles de communication sont utilisés pour assurer la connectivité entre les dispositifs et les serveurs ou plateformes cloud [75]. On peut trouver :

a) MQTT (Message Queuing Telemetry Transport) : Un protocole de messagerie léger et simple, idéal pour les dispositifs à ressources limitées et les réseaux avec bande passante restreinte.

Utilisation : Pub/Sub (publish/subscribe) où les capteurs envoient des messages à un serveur de messages (**broker**), qui les distribue aux clients abonnés la Figure II-38.[89] [90]

Exemple : Utilisé pour la surveillance à distance, les notifications en temps réel, et la gestion des appareils.

b) HTTP/HTTPS (HyperText Transfer Protocol Secure) : Le protocole standard pour la communication web. HTTPS est la version sécurisée d'HTTP.

Utilisation : Requêtes et réponses entre les dispositifs IoT et les serveurs web.

Exemple : Utilisé pour envoyer des données de capteur à des serveurs web, accéder à des "Application Programming Interface" (Interface de Programmation d'Application en français) (API) RESTful, et récupérer des mises à jour de firmware.

c) Wi-Fi : Un protocole de communication sans fil standard utilisé pour les réseaux locaux.

Utilisation : Connexion des dispositifs IoT à des réseaux locaux ou à Internet la **Erreur ! Source du renvoi introuvable..**

Exemple : Utilisé dans les caméras de sécurité, les thermostats intelligents, et les systèmes de contrôle domestique.

d) Zigbee : Un protocole sans fil à faible puissance pour les réseaux maillés et une connexion de longue distance.

Utilisation : Communication entre les dispositifs IoT à courte portée.

Exemple : Utilisé dans les systèmes de domotique, les capteurs industriels, et les équipements de santé.

e) Bluetooth Low Energy (BLE) : Une version à faible consommation d'énergie de Bluetooth.

Utilisation : Communication à courte portée entre les dispositifs IoT.

Exemple : Utilisé dans les appareils portables, les balises (beacons), et les systèmes de suivi.

f) CoAP (Constrained Application Protocol) : Un protocole spécialisé pour les dispositifs contraints, similaire à HTTP mais plus léger.

Utilisation : Communication M2M (machine-to-machine) dans des environnements contraints.

Exemple : Utilisé dans les réseaux de capteurs et les systèmes domotiques.

g) LoRaWAN (Long Range Wide Area Network) : Un protocole pour les réseaux à longue portée avec faible consommation d'énergie [74].

Utilisation : Communication à faible débit entre les dispositifs IoT et les passerelles.

Exemple : Utilisé dans les applications de villes intelligentes, agriculture de précision, et suivi des actifs.

h) NB-IoT (Narrowband IoT) : Un standard de communication cellulaire conçu pour les dispositifs IoT [91].

Utilisation : Communication à longue portée avec faible consommation d'énergie, utilisant l'infrastructure des réseaux cellulaires existants.

Exemple : Utilisé dans les applications de suivi des actifs, les compteurs intelligents, et les systèmes de sécurité.

i) EC-GSM-IoT : Un standard de communication cellulaire pour les dispositifs IoT. Elle repose sur l'infrastructure GSM (2G) existante, largement déployée à travers le monde, et apporte des améliorations significatives en termes d'efficacité et de portée (entre 10 et 20dB), ce qui la rend compétitive parmi les technologies LPWAN.

En quelque sorte, c'est l'équivalent du LTE-M pour le réseau GSM. EC-GSM-IoT utilise des canaux de communication de 200 kHz avec une bande passante totale de 2,4 MHz, susceptible d'évoluer à l'avenir. Cette technologie supporte des débits variant de 350 bps à 70 kbps [92].

Pour notre projet de Smart Aquaponie, nous avons utilisé deux types de protocoles de communication : **Wi-Fi** et **MQTT**. Chacun de ces protocoles a des rôles spécifiques dans notre système, permettant une communication locale et une interaction avec la plateforme cloud.

Le Wi-Fi assure une communication locale rapide et fiable entre les dispositifs, tandis que le MQTT facilite la transmission des données vers la plateforme cloud et vice versa.

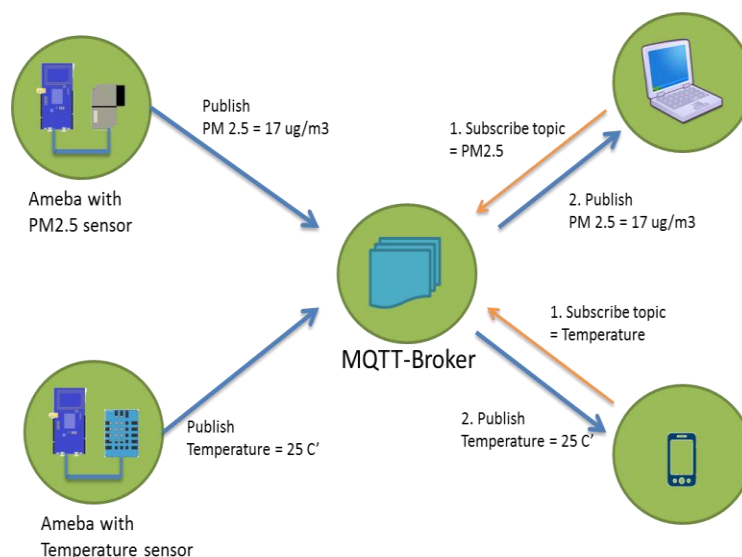


Figure II-38 exemple de communication MQTT

3.2.4 Plateformes IOT

Les **plateformes IoT (Internet of Things)** ou **services IoT cloud** sont des systèmes logiciels et matériels conçus pour faciliter le développement, le déploiement, la gestion et la sécurité des dispositifs IoT. Elles fournissent une infrastructure qui permet de connecter, collecter, stocker, analyser, gérer les données provenant des dispositifs IoT, ainsi que d'interagir avec ces dispositifs en temps réel. Les plateformes IoT simplifient les processus complexes nécessaires pour construire et gérer des solutions IoT complètes et évolutives.

a) *ThingSpeak*

ThingSpeak est une plateforme IoT qui permet de collecter, stocker, visualiser et analyser les données des capteurs en temps réel.

Caractéristiques :

- Visualisation des données en temps réel
- Analyse et traitement des données avec MATLAB intégré
- Support de protocoles comme HTTP, MQTT et MQTT TLS
- Création de notifications et de déclencheurs basés sur les données.

b) *Ubidots*

Ubidots est une plateforme IoT qui fournit des outils pour créer des applications IoT rapidement et facilement.

Caractéristiques :

- Visualisation des données avec des tableaux de bord interactifs
- Création de règles et d'alertes basées sur les données
- Support de protocoles comme HTTP, MQTT, et TCP/UDP
- API facile à utiliser pour l'intégration avec d'autres systèmes.



Figure II-39
Icon de ThingSpeak



Figure II-40 Icon de Ubidots

c) *Firebase*

Firebase, développé par Google, est une plateforme de développement d'applications mobiles et web qui offre également des services backend pour les projets IoT.



Firebase

Figure II-41
Icon de Firebase

Caractéristiques :

- Base de données en temps réel pour synchroniser les données entre les dispositifs IoT et les applications en temps réel
- Authentification utilisateur sécurisée
- Hébergement de fichiers et de contenu statique
- Notifications push et services cloud functions.

d) *Adafruit IO*

Adafruit IO est une plateforme IoT conçue par Adafruit pour faciliter la connexion des dispositifs IoT à Internet.



Figure II-42 Icon de
AdafruitIO

Caractéristiques :

- Visualisation des données avec des tableaux de bord et des widgets interactifs
- Support des protocoles MQTT et HTTP
- Création de déclencheurs et d'actions basées sur les données
- Intégration facile avec les produits Adafruit et les microcontrôleurs.

3.2.5 Définition d'un kit IoT

Les kits IoT sont des ensembles d'outils matériels et logiciels **pré-conçus** et configurés pour permettre aux développeurs, chercheurs et amateurs de créer rapidement des **systèmes connectés**. Ces kits comprennent une combinaison de capteurs, d'actionneurs, de modules de communication

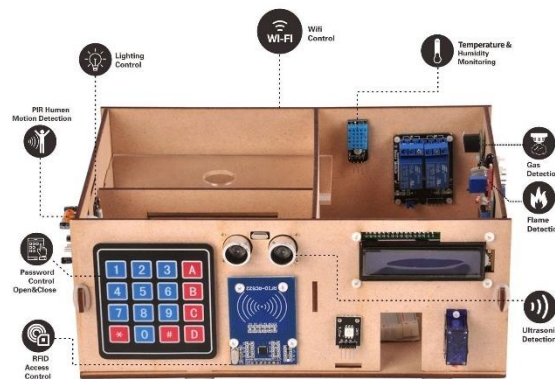


Figure II-43 exemple d'un Kit de maison intelligente
IoT

sans fil, de microcontrôleurs ou de microprocesseurs, ainsi que des logiciels de programmation et des interfaces utilisateur, comme illustré dans la Figure II-43.

Les kits IoT simplifient le processus de création de systèmes connectés, les rendant accessibles à un large éventail d'utilisateurs pour des applications variées.

4 Conclusion

Ce chapitre offre une vue d'ensemble exhaustive des composants matériels et logiciels essentiels pour le développement des systèmes embarqués dans le cadre de projets IoT. La diversité et la complémentarité de ces technologies ouvrent la voie à la conception de solutions innovantes et efficaces pour un large éventail d'applications, de l'agriculture à la domotique, en passant par la santé et les villes intelligentes.

La maîtrise approfondie de ces composants nous prépare à relever les défis et à saisir les opportunités liées à l'implémentation pratique de l'IoT. Dans le prochain chapitre, nous plongerons dans la phase pratique de notre projet en détaillant la création d'une smart aquaponie. Nous examinerons en profondeur les étapes du processus de développement, mettant en lumière les choix stratégiques et les défis rencontrés tout au long du processus de notre projet.

Chapitre III.

Développement et Implémentation du Prototype de Smart Aquaponie

1 Introduction

Dans le cadre de notre projet de fin d'études; et conformément à l'arrêté ministériel n° 1275 du 27 septembre 2022 portant sur le mécanisme « un diplôme...une startup » [1], nous présentons dans ce chapitre notre proposition de prototype de pour une smart aquaponie. Ce prototype est composé de plusieurs kits IoT interconnectés.

En effet, dans ce chapitre, nous présentons les différentes phases de réalisation de notre prototype de smart aquaponie. Nous détaillons le processus de réalisation du prototype aquaponique, incluant la partie mécanique et la structure, ainsi que le développement des kits IoT conçus pour la smart aquaponie.

Nous examinons en détail les fonctionnalités et les composants de chaque kit, ainsi que leur intégration dans le système aquaponique global que nous avons conçu. Nous mettrons en lumière les défis que nous avons rencontrés, les solutions que nous avons mises en œuvre et les résultats que nous avons obtenus.

En outre, nous avons mis en place un tableau de bord pour contrôler et gérer le système aquaponique à distance et en temps réel.

2 Analyse des Besoins

Tout d'abord, nous avons effectué des recherches sur les besoins et avons constaté qu'un système aquaponique nécessite une variété d'éléments et de conditions pour fonctionner efficacement. Voici une liste des besoins essentiels d'un système aquaponique :

1. Conditions Environnementales

- **Lumière** : Pour assurer la photosynthèse des plantes, soit par la lumière naturelle, soit par des lampes de croissance.
- **Température** : Des températures spécifiques adaptées aux espèces de poissons et de plantes élevées.
- **Qualité de l'Eau** : Maintenir une qualité d'eau optimale, incluant le contrôle des niveaux de pH, d'ammoniac, de nitrites et de nitrates.

- **Circulation de l'Eau** : Une circulation d'eau adéquate pour distribuer les nutriments et oxygène aux poissons et aux plantes.

2. Équipements Techniques

- **Systèmes de Monitoring et de Contrôle** : Pour surveiller et ajuster les paramètres clés tels que la température, le pH, les niveaux d'oxygène dissous, la turbidité, les TDS (total des solides dissous), le niveau d'eau, les gaz présents dans l'environnement, la luminosité, les niveaux d'oxygène dissous et la concentration de nutriments.
- **Mangeoire des Poissons** : pour assurer une alimentation équilibrée et régulière pour les poissons.
- **Pompes** : Pour assurer la circulation de l'eau entre les réservoirs de poissons et les lits de culture.
- **Tuyau** : Pour assurer la circulation de l'eau dans le système.
- **Aérateurs** : Pour maintenir des niveaux d'oxygène dissous adéquats dans l'eau.
- **Chauffe-eau ou Refroidisseurs** : Pour maintenir une température stable et optimale pour les poissons et les plantes.

3 Conception Mécanique et Structurelle

Pour entamer le développement du prototype, il faut impérativement passer par la phase de conception du modèle. Cette étape fondamentale est le socle sur lequel reposera tout le travail à venir.

3.1 Structure du Prototype

Pour cela, nous avons d'abord consulté en détails plusieurs réalisations antérieures (voir Figure III-3[93], Figure III-2[94] et Figure III-1). Ces réalisations nous ont permis d'identifier les besoins pour la conception de notre prototype.



Figure III-3
Vegequarium, un mini système aquaponique qui fait pousser des poissons et des plantes ensemble.



Figure III-2
Modèle d'hydroponie de type NFT dans des tubes en PVC de Klotz, H



Figure III-1
Modèle d'aquaponie à deux étages

Après avoir analysé les configurations de ces trois, nous opté pour un système aquaponique à deux niveaux : l'un dédié aux aquariums et l'autre aux plantations.

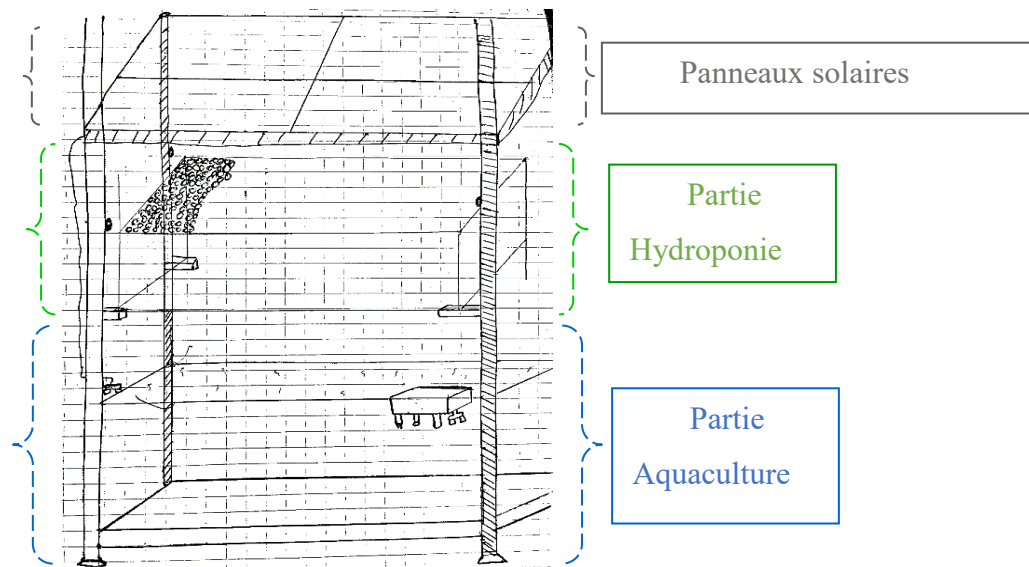


Figure III-4 :
Conception du premier prototype

Pour visualiser cette conception initiale comme illustré dans la Figure III-4, nous avons généré des modèles de conception à l'aide d'un outil de génération graphique basé sur l'intelligence artificielle (**ideogram**).



Figure III-5 Modèles de conception générées par une IA

Après avoir fini la conception et eu une vision réelle à l'aide d'intelligence artificielle IA, on a commencé à le bâtir avec des planches en bois trouvé dans le Fab-Lab (laboratoire de fabrication) comme matériau de base. A l'issue de cette première étape, nous avons obtenu une structure primaire illustrée dans la Figure III-6 comme suit :



Figure III-6
Fabrication de la première structure du prototype à deux niveaux

A titre de rappel et comme illustré dans la Figure I-2, l'aquaponie est un système qui fusionne les principes de l'hydroponie et du système de recirculation aquacole (RAS). Pour ce dernier, notre conception prévoit deux aquariums distincts situés en bas de la structure : l'un simulant un bassin d'aquaculture, et l'autre agissant comme un **biofiltre** pour le traitement des déchets produits par les poissons (voir la Figure I-10 et Systèmes de Recirculation Aquacole (RAS)).

Pour la partie plantation « la partie supérieure de la construction », en utilisant un panneau de Forex comme matériau de base, nous avons procédé à l'assemblage d'un bac spécialement conçu pour accueillir un système d'hydroponie de type média-lit, comme illustré dans la Figure III-7.



Figure III-7
Montage du bac de plantation en Forex noir
construit dans le fab-lab

En combinant ces éléments dans notre prototype, nous avons créé un prototype primaire d'un système d'aquaponie fonctionnel et polyvalent (représenté dans la Figure III-8).



Figure III-8
Prototype primaire avec un aquarium

Cependant, après avoir passé en revue le prototype, un problème majeur a été constaté : Le poids. La structure s'est révélée insuffisante pour supporter la charge des bacs de plantation remplis d'eau, mettant à risque l'intégrité de l'ensemble du dispositif. Après réflexions et discussions approfondies avec les encadrants, nous avons décidé de solidifier le tout avec des barres métalliques soudées. Ces dernières permettront de consolider le système assurant ainsi sa robustesse et sa durabilité à long terme.

Parallèlement à cela, nous avons cherché à améliorer les performances productives du système en ce qui concerne les plantations. En conséquence, nous avons opter pour l'intégration de deux types d'hydroponies en plus : NFT et DWC.

Deux modèles ont été envisagés et proposés pour cela :

- Le premier consistait à ajouter des tubes PVC qui seraient fixées aux barres avec le média-lit et le DWC qui seraient en dessous, comme illustré dans la Figure III-10 .
- Le deuxième modèle a été pensé de manière à ce qu'il y ait une séparation en bois et que les médias soient fixés sur cette dernière, comme illustré dans la Figure III-9.

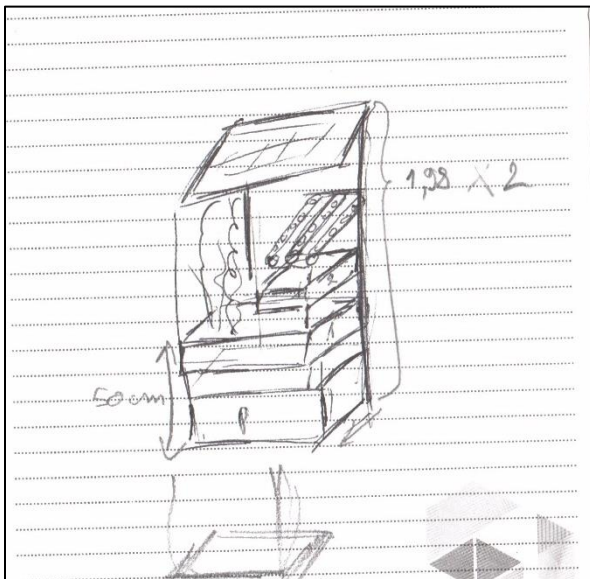


Figure III-10 Modèle n°01

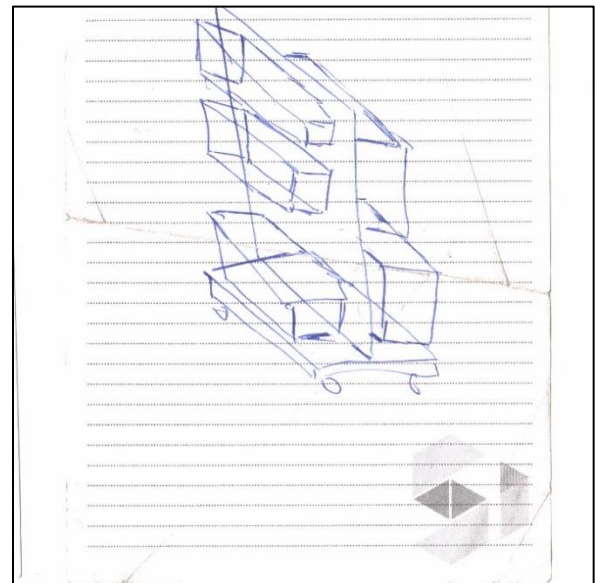


Figure III-9 Modèle n°02

Nous nous sommes finalement dirigées vers le premier modèle (Figure III-10), considérant ses capacités productives, sa solidité, son économie d'espace, ainsi que son potentiel esthétique. Nous avons estimé que ce modèle offrait une solution complète et polyvalente répondant à nos besoins et objectifs.

Nous avons sollicité le ferronnier de l'école afin de souder les différentes barres métalliques constituant la structure de notre prototype (Figure III-11).



Figure III-11
Soudage des supports métalliques

Ensuite, nous avons utilisé des tubes PVC afin qu'ils puissent contenir les plantes puis nous les avons assemblés avec des coudes et fixés aux barres.

À la fin de ce processus, nous avons réussi à créer un modèle intégrant les trois types d'hydroponie (NFT, Média-Lit et DWC), alimentés par un aquarium. Cela représente une étape significative, malgré les embûches et les défis techniques rencontrés. Ces difficultés ont été autant de moments d'apprentissage et de croissance, nous permettant d'affiner notre compréhension du projet et d'améliorer nos compétences techniques.



Figure III-12 La structure final du prototype

3.2 La sélection des espèces de plantes et de poissons

Après avoir achevé la construction du prototype, nous avons entrepris la sélection des espèces de plantes et de poissons à intégrer dans ce système.

Pour les plantes, nous avons opté pour un assortiment diversifié, en choisissant de cultiver des fraises dans le système NFT, de la laitue dans le DWC et des tomates dans le média-lit. Cette sélection a été faite afin d'adapter chaque plante au système hydroponique le mieux adapté à ses besoins spécifiques, comme indiqué dans le chapitre I, section Types d'hydroponies et Plantes Adaptées à la Culture en Système Aquaponique.

Pour les poissons, nous avons sélectionné des espèces dont les conditions de vie sont compatibles avec les besoins des plantes déjà choisies. Cela garantit que les paramètres environnementaux optimaux pour les poissons coïncident avec ceux requis pour la croissance des plantes, assurant ainsi un écosystème harmonieux et équilibré. Pour ce fait nous avons sélectionné la tilapia de Nile (voir la Figure I-11) qui est la plus adaptée.

Pour plus de détails sur la sélection, veuillez consulter l'annexe (Choix des espèces).

À la fin de ce processus, nous avons créé un prototype d'un système d'aquaponie simple, composé de trois types de systèmes hydroponiques, où nous cultivons de la laitue, des fraises et des tomates. Un aquarium intégré sert à la fois à l'irrigation et à l'élevage du Tilapia, comme représenté dans la Figure III-13.

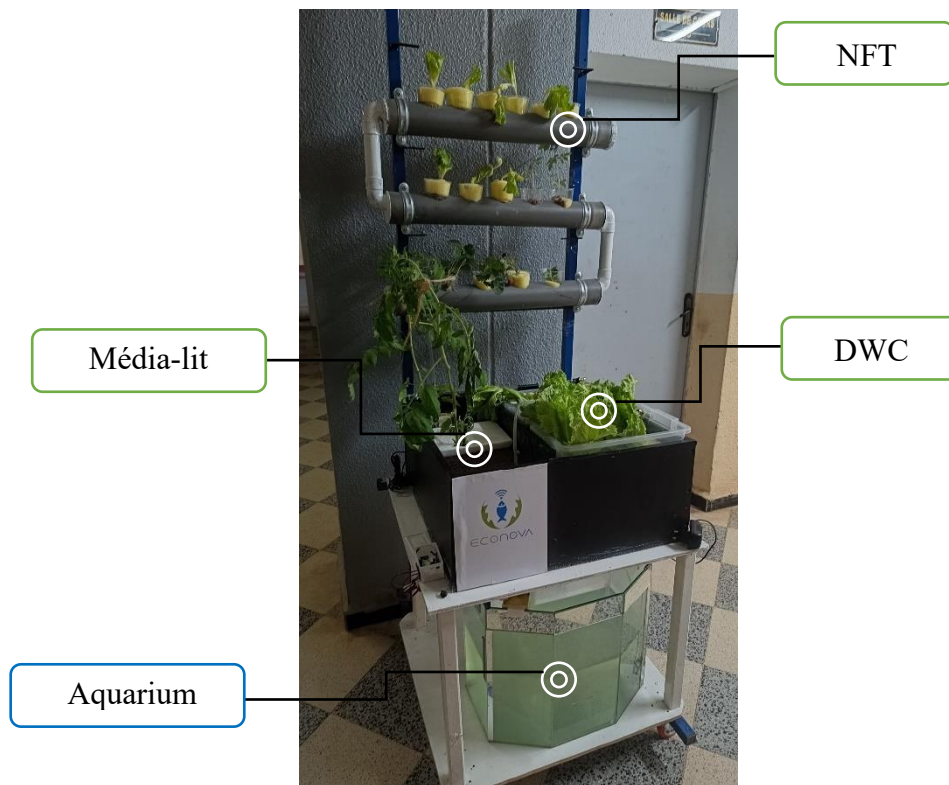


Figure III-13
Prototype d'un système d'aquaponie simple

4 Création des Kits IoT

Pour rendre le système d'aquaponie plus intelligent et augmenter la valeur de notre projet, nous avons introduit trois kits IoT (voir Chapitre II.3.2.5 Définition d'un kit IoT) : Kit_Aqua, Kit_Plante et Kit_Actionneur, chacun ayant une tâche bien précise dans le système (voir le Tableau III-1 Résume les tâches de chaque kit avec ses propres composants), basée sur une analyse des besoins d'un système aquaponique (voire la page 63)

Kit	Fonction principale	Composants principaux	Spécifications techniques
Kit_Aqua	Surveillance et gestion de l'environnement aquatique	Capteurs de température, de pH, d'oxygène dissous, de turbidité, de TDS, de niveau d'eau. Microcontrôleur Arduino Uno Rev2, Le Mangeoire Et une Batterie Rechargeable	Protocoles de communication : Wi-Fi plus le MQTT
Kit_Plante	Surveillance et gestion des conditions de croissance des plantes	Capteurs de luminosité, de Qualité d'Air MQ135, d'Humidité et de Température DHT11. Afficheur LCD I2C 20x4 Microcontrôleur ESP32 Alarme (buzzer) Voyants Indicateurs LED Et une Batterie Rechargeable	Protocoles de communication : Wi-Fi plus le MQTT
Kit_Actionneur	Contrôle des actionneurs pour maintenir les paramètres du système	Microcontrôleur ESP8266 12-F Relais, Pompe d'Eau Lampe pour l'Éclairage, Batterie Rechargeable	Protocoles de communication : Wi-Fi plus le MQTT

Tableau III-1 Résumé des tâches de chaque kit avec ses propres composants

Pour mieux comprendre les composants utilisés dans le Tableau III-1 et obtenir plus de détails, veuillez consulter le chapitre II, la section Hardware, cité précédemment.

Ces kits, visent aussi à fournir aux agriculteurs, pisciculteurs et à tous ceux qui appliquent l'aquaponie des outils efficaces et faciles à utiliser pour surveiller, contrôler et optimiser leurs systèmes.

4.1 Prototypage et Assemblage des Kits IoT

En utilisant des techniques telles que l'impression 3D pour les boîtiers et le prototypage de circuits imprimés, nous avons pu créer nos designs de kits pour une première version. Ensuite, nous avons procédé à l'assemblage des composants pour chaque kit

4.1.1 Prototypage

1. Dessin 2D des boîtiers :

Il permet de visualiser et de planifier l'agencement spatial des différents composants électroniques et mécaniques à l'intérieur des boîtiers, tout en aidant à organiser les idées, les figures ci-dessous (Figure III-16, Figure III-14 et Figure III-15) présente un aperçu visuel du dessin 2D des boîtiers pour chaque kit.

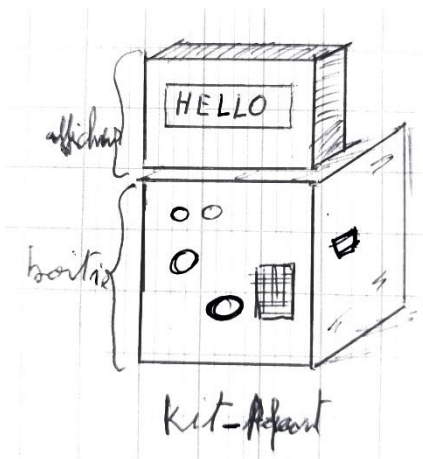


Figure III-16
Dessin 2D du Kit_Plante

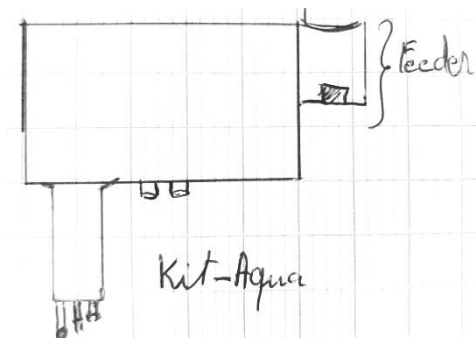


Figure III-15
Dessin 2D du Kit_Aqua

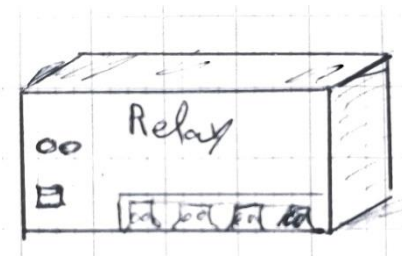


Figure III-14 Dessin 2D du
Kit_Actionneur

2. L'impression 3D des boîtiers :

Une fois les concepts définis par le dessin, nous avons utilisé le logiciel **SolidWorks** pour concevoir les modèles 3D de chaque boîtier (voir la Figure III-17, Figure III-18 et Figure III-19). Ces modèles ont ensuite été envoyés aux imprimantes 3D disponibles au fabrication laboratory (**FAB-LAB**) de l'école pour être matérialisés.

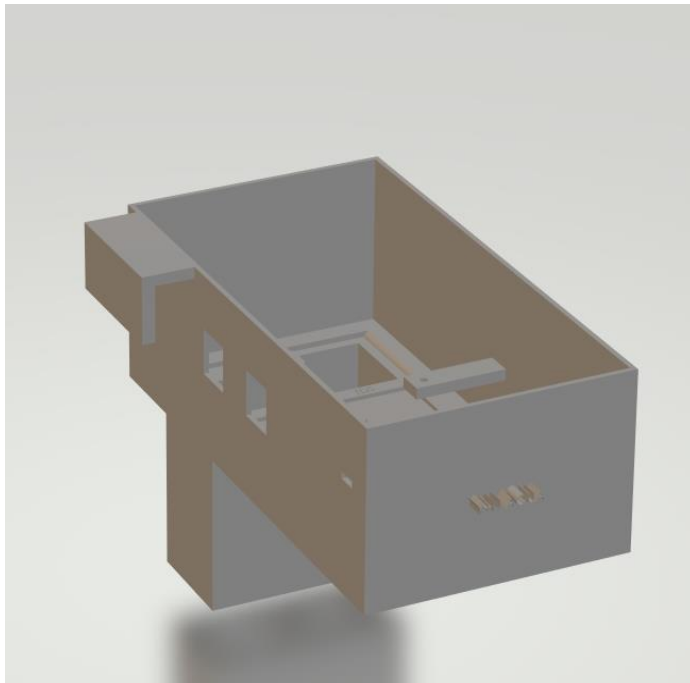


Figure III-19 La modélisation 3D de la boîte Kit_Aqua par le logiciel SolidWorks

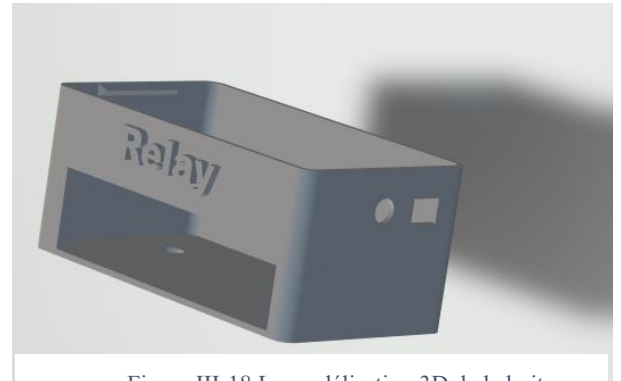


Figure III-18 La modélisation 3D de la boîte Kit_Actionneur par le logiciel SolidWorks

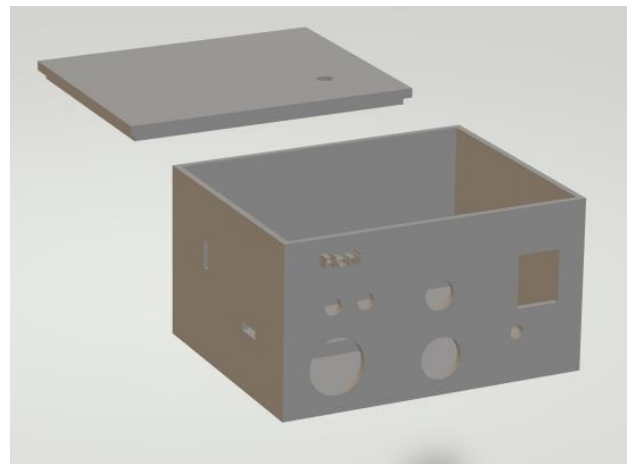


Figure III-17 La modélisation 3D de la boîte Kit_Plante par le logiciel SolidWorks

4.1.2 Assemblage

Chaque kit est composé de plusieurs composants électroniques. Pour le rendre fonctionnel, il faut d'abord procéder à l'assemblage électronique. Ensuite, ces composants doivent être testés avant d'être installés à leur place dans le boîtier.

1. Kit_Aqua :

Ces composants électroniques sont assemblés de la manière indiquée dans la Figure III-20 :

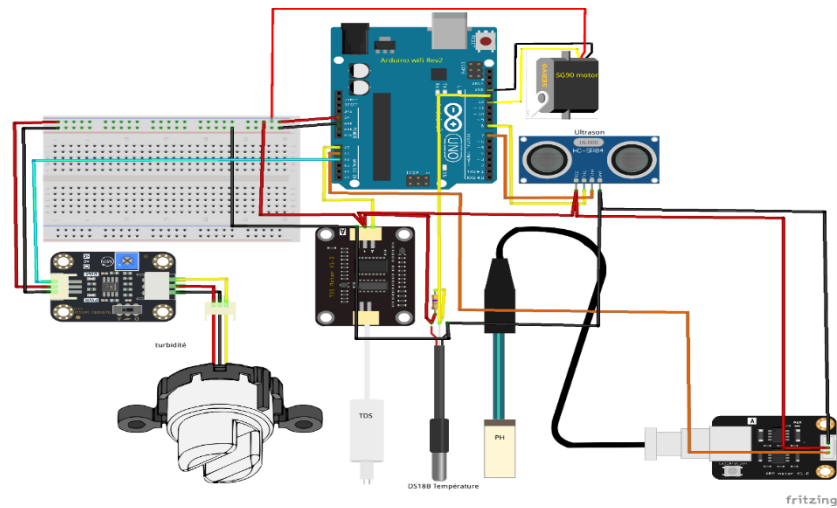


Figure III-20 Schéma de l'assemblage électronique du Kit_Aqua réalisé avec le logiciel Fritzing

2. Kit_Plante :

Les composants électroniques sont assemblés comme illustré dans la Figure III-21 :

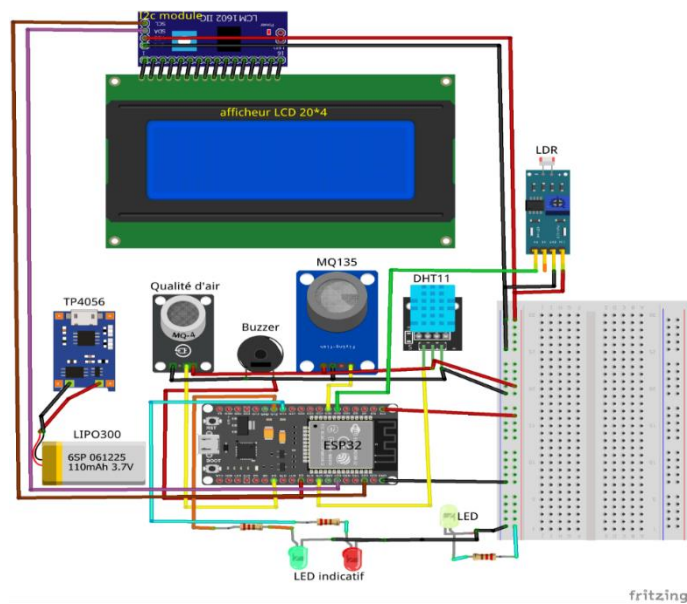


Figure III-21 Schéma de l'assemblage électronique du Kit_Plante réalisé avec le logiciel Fritzing

3. Kit_Actionneur :

Les composants électroniques sont assemblés conformément au schéma présenté dans la Figure III-22.

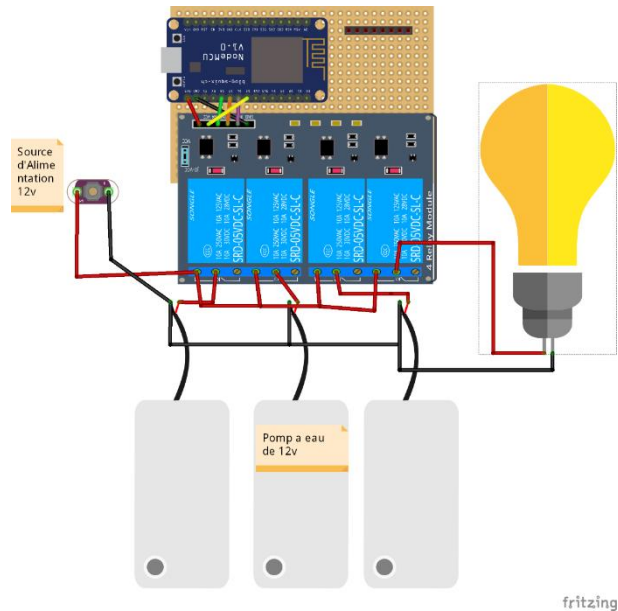


Figure III-22 Schéma de l'assemblage électronique du Kit_Actionneur réalisé avec le logiciel Fritzing

Pour référence, les composants de chaque kit ont été mentionnés dans le Tableau III-1. Après quoi, le boîtier est fermé et le kit est prêt pour l'implémentation du code embarqué, spécialement conçu pour correspondre à sa fonction principale, en vue d'une utilisation opérationnelle.

4.1.3 Développement des Logiciels Embarqués

Étant donné les fonctionnalités spécifiques de chaque kit, nous avons procédé au développement des logiciels embarqués nécessaires pour chacun d'entre eux pour cela on a utilisé l'Arduino IDE (voir IDE Arduino). Ce qui suit expose rapidement et brièvement les fonctions essentielles du code embarqué pour chaque kit.

1. Kit_Aqua :

readWaterTDS	Cette fonction utilise la bibliothèque GravityTDS.h pour lire la valeur du TDS (Total Dissolved Solids) de l'eau à l'aide du capteur
readWaterTemperature	Cette fonction utilise la bibliothèque DallasTemperature.h pour lire la température de l'eau à l'aide du capteur de température
readWaterPH	Cette fonction effectue plusieurs lectures du capteur de pH pour déterminer sa valeur dans l'eau
activateServo	Cette fonction active le servo pour distribuer de la nourriture aux poissons en réglant l'angle du servo, dans un laps de temps bien défini
readWaterLevel	: Cette fonction mesure le niveau d'eau dans le bassin à l'aide d'un capteur ultrasonique. Elle calcule la distance mesurée en centimètres et la convertit en volume d'eau en litres

2. Kit_Plante :

configurePinsAndInitializeComponents()	Cette fonction configure les broches utilisées par les composants du système, tels que les LED, le buzzer et les capteurs. Elle initialise également les composants comme l'écran LCD et le capteur DHT.
initSensors()	Cette fonction initialise les capteurs utilisés dans le programme en configurant les broches nécessaires pour leur fonctionnement.
readSensors()	Cette fonction lit les données des capteurs, y compris la qualité de l'air, l'humidité, la température, l'intensité lumineuse et les données du capteur de gaz MQ135.
displayValues()	Cette fonction affiche les valeurs des capteurs sur l'écran LCD
printSerialData()	Cette fonction affiche les données des capteurs sur le port série
controlHumidityIndicator()	Cette fonction contrôle un indicateur d'humidité en fonction de la lecture du capteur d'humidité. Elle active ou désactive un buzzer et des LED pour alermer l'utilisateur en fonction de la valeur de l'humidité.

3. Kit_Actionneur :

checkAndActivatePump()	Cette fonction vérifie si les données reçues correspondent à une demande d'activation de la pompe pour un client donné. Si c'est le cas, elle active la pompe pendant un certain temps.
-------------------------------	---

Il est essentiel de noter que les trois kits doivent intégrer la technologie IoT, Le schéma ci-dessous Figure III-23 illustre clairement si cette technologie est implémentée en **locale** ou dans le **cloud**, ainsi que les protocoles de communication utilisés pour chaque connexion [95], Voici les fonctions qui nous permettent d'atteindre cet objectif :

4. Connection locale :

isKitAqua(String data)	Cette fonction prend une chaîne de caractères en entrée et vérifie si elle contient le mot "Aqua". Elle est utilisée pour déterminer si les données reçues proviennent du Kit Aqua.
handleNewClient	Cette fonction gère les nouvelles connexions clientes. Elle prend en paramètre le client, le client associé au kit, et le nom du kit. Elle vérifie si les données reçues correspondent au kit approprié et établit la connexion si nécessaire.
handleClientRequests	Cette fonction gère les requêtes des clients connectés. Elle prend le client et son nom en paramètre. Elle lit les données disponibles, les affiche et active la pompe si nécessaire

5. Connection cloud :

initCloudServices()	Cette fonction initialise les services cloud
sendDataToCloud()	Cette fonction envoie les données collectées aux services cloud. Elle vérifie si les données ont été envoyées avec succès et affiche un message approprié sur le moniteur série
publishData()	Cette fonction publie les données des capteurs sur la plateforme IoT à intervalles réguliers
configureplateformeIoT()	Cette fonction configure la connexion au service plateforme IoT. Elle se connecte au

	réseau WiFi, configure le rappel de données (callback), initialise la connexion à la plateforme et se reconnecte si nécessaire
Callback()	C'est la fonction de rappel qui est appelée lorsqu'un message MQTT est reçu. Elle affiche le sujet (topic) et le contenu du message

Ces fonctions sont utilisées pour configurer, gérer et contrôler les connexions clientes, les requêtes et les actions sur les pompes en fonction des données reçues.

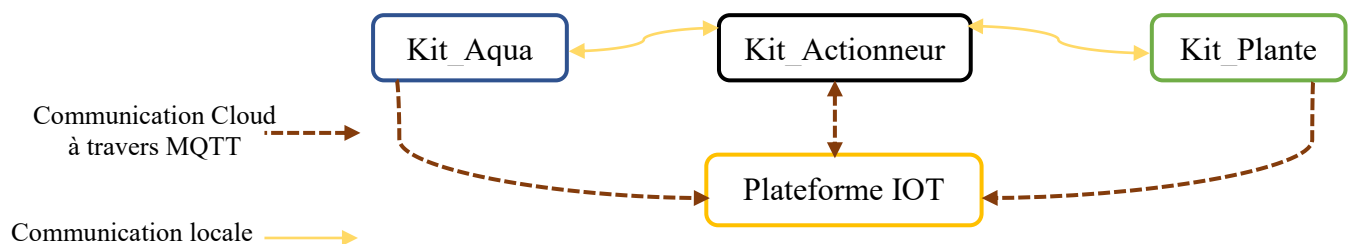


Figure III-23 Schéma d'intégration de la technologie IoT au sein de notre prototype smart aquaponie

4.1.4 Intégration des Kits dans notre prototype

L'intégration des Kits_Aqua, Kit_Plante et Kit_Actionneur dans le système aquaponique global est illustrée à la Figure III-27, où Chaque kit communique avec les autres via un réseau sans fil sécurisé (WIFI ou autre), permettant une coordination harmonieuse et une gestion centralisée [96], [97].

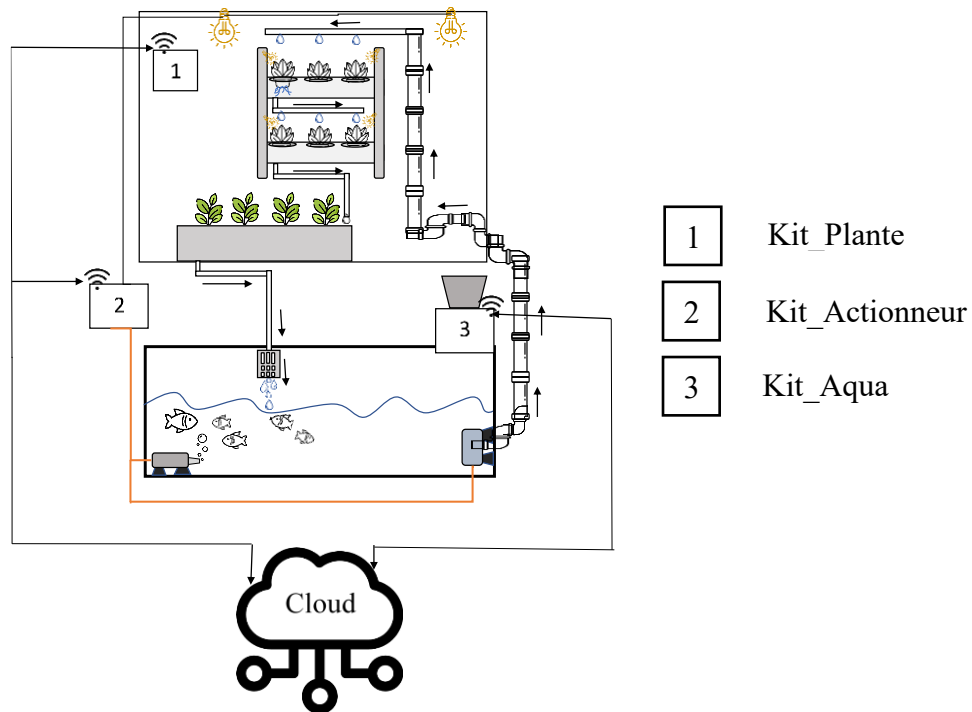


Figure III-27 Un schéma fonctionnel du prototype

À la fin de ce processus de Prototypage et Assemblage des Kits IoT , nous avons obtenu les kits tels qu'illustrés dans la Figure III-26, Figure III-25 et Figure III-24.

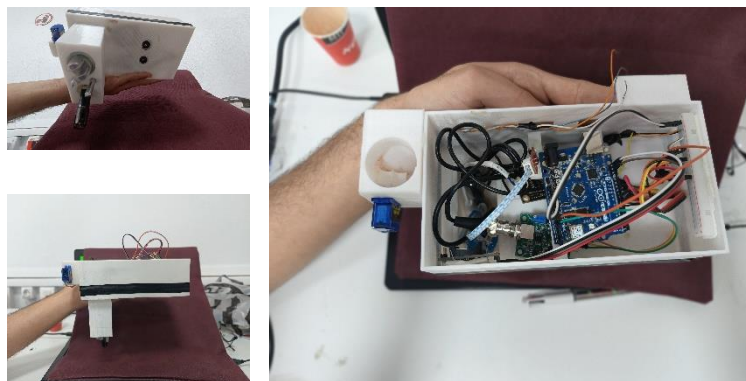


Figure III-26 Plusieurs vues de Kit_Aqua après l'assemblage

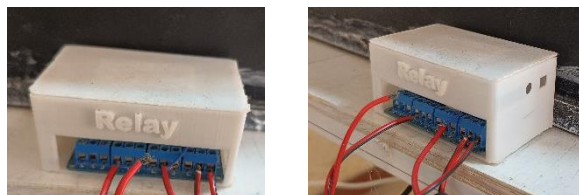


Figure III-25 Kit_Actionneur après l'assemblage



Figure III-24 Kit_Plante après l'assemblage

4.2 Développement de l'Interface Utilisateur

Pour faciliter la gestion, la visualisation et le contrôle des données, nous avons également mis en place un tableau de bord et une application mobile. Ces outils permettent une surveillance en temps réel et une gestion simplifiée des paramètres clés du système, offrant ainsi une solution complète et intégrée.

4.2.1 Conception du tableau de bord

Pour cette partie, nous avons utilisé une plateforme parmi les Plateformes IOT que nous avons déjà mentionnées précédemment, à savoir la plateforme Ubidots.

Ubidots est une plateforme IoT simple et rapide qui permet de collecter, stocker, visualiser et analyser des données en temps réel à partir des capteurs connectés. Elle offre une interface intuitive et conviviale, permettant aux utilisateurs de créer facilement des tableaux de bord personnalisés pour surveiller leurs appareils et systèmes à distance. Grâce à sa capacité de synchronisation rapide, Ubidots permet aux utilisateurs de recevoir des mises à jour en temps réel et de réagir rapidement aux changements dans leur environnement.[98]

Pour vous connecter à la plateforme Ubidots avec le kit [99], vous aurez besoin de :

Compte Ubidots : Créez un compte sur Ubidots si vous n'en avez pas déjà un. Cela vous permettra d'accéder à leurs services et de gérer vos appareils et données.

Clé API Ubidots « TOKEN » : Une clé "Application Programming Interface" (Interface de Programmation d'Application en français) (API), unique est nécessaire pour authentifier et sécuriser les communications entre votre kit et la plateforme Ubidots, exemple de **Clé API** qui est sous forme de "[BBUS-tL26ArKr0YZv47xgAHcgGEEaunO4UA](#)".

Connexion Internet : Assurez-vous que votre kit est connecté à Internet pour transmettre les données aux serveurs d'Ubidots.

Code de Connexion : Implémentez le code nécessaire pour initialiser la connexion, lire les capteurs et envoyer les données à Ubidots. Ce code inclura la configuration des capteurs, la connexion Wi-Fi, et l'utilisation de la clé API pour authentifier les requêtes.

Après avoir suivi ces étapes, nous avons réussi à créer des « **Devices** » dispositifs Aquaponie control (pour les deux kit Aqua et Plante) et Relay action (pour le kit Actionneur) sur la plateforme Ubidots (voir la Figure III-28). Ces dispositifs recevront les valeurs provenant des capteurs intégrés dans les kits et stocke chacun dans une variable (voir la Figure III-29).

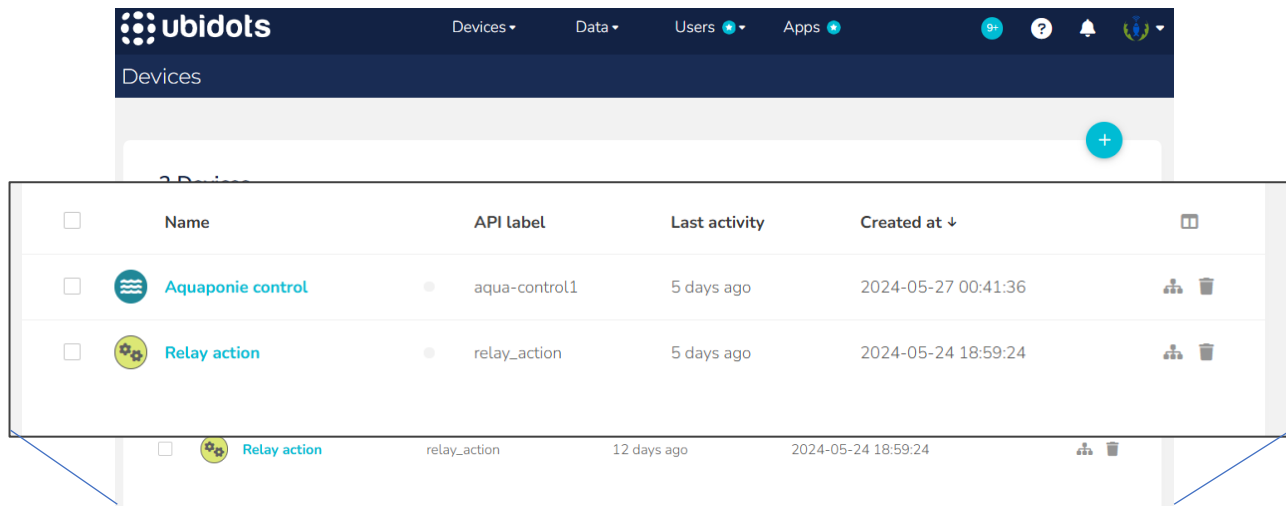


Figure III-28 l'interface de Ubidots onglet devices

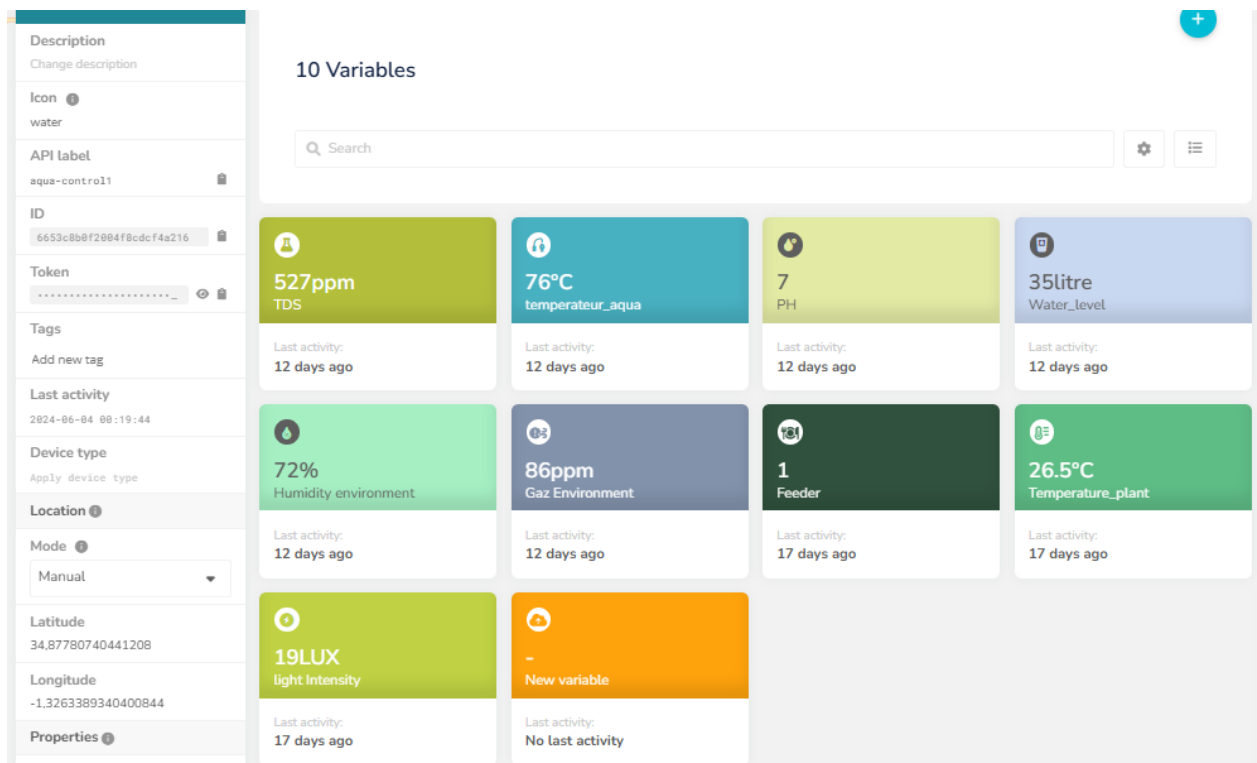


Figure III-29 l'interface de Ubidots onglet variable du devices Aqua control

Les variables que nous avons créées peuvent être consultées directement en ligne ou exportées sous forme de fichier Excel pour une analyse approfondie des données. De plus, il est possible de les visualiser et de créer un tableau de bord sur la même plateforme. Donc après avoir créé ces variables, nous pouvons passer à l'étape suivante en élaborant de tableau de bord interactif, comme illustré dans la Figure III-30.

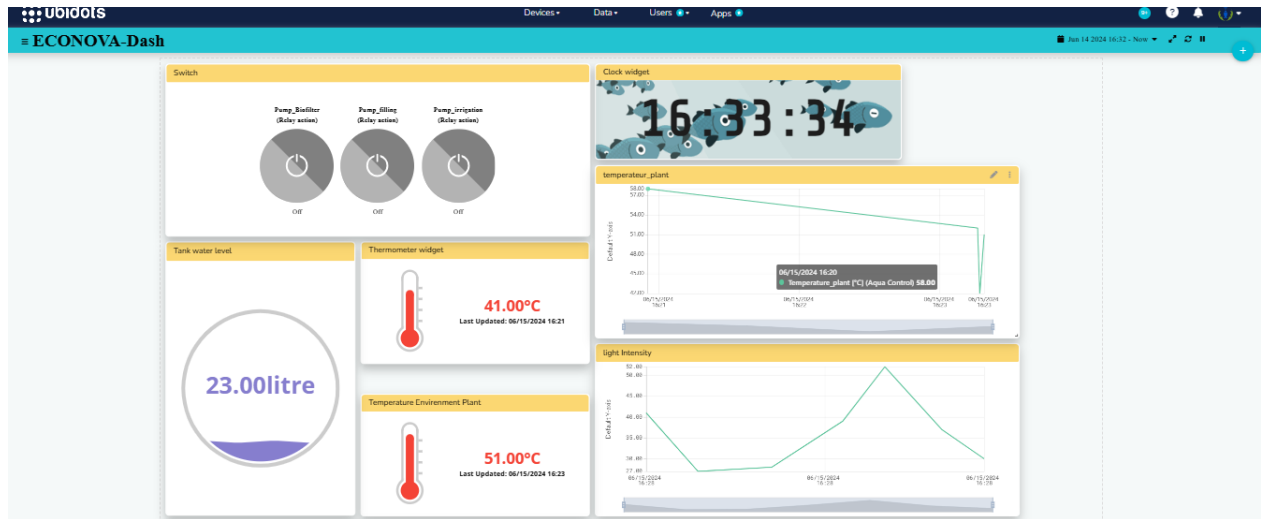


Figure III-30 Econova-Dshe le tableau de bord du prototype

À partir de ce tableau de bord, il est possible d'activer et de désactiver les pompes à distance (voir Figure III-32). De plus, on peut visualiser différents états du système, tels que le niveau d'eau (comme illustré dans la Figure III-33), la température actuelle de l'environnement et de l'eau (voir Figure III-31), la valeur du TDS Figure III-34, la luminosité Figure III-35. Notons que d'autres mesures peuvent être visualisés sur Ubidots, tels que le pH, Turbidité, niveau d'oxygène dissous, le taux d'humidité de l'environnement de plantation, etc.

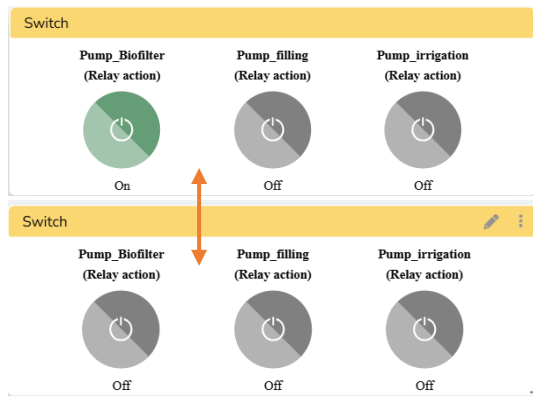


Figure III-32 Switches pour activer et désactiver les pompes



Figure III-33 niveau d'eau dans le système

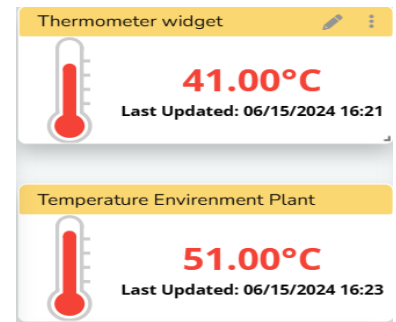


Figure III-31 La température actuelle de l'environnement

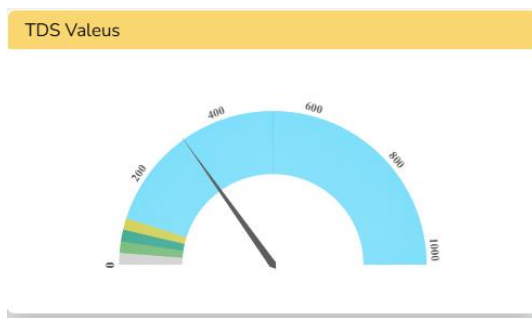


Figure III-34 La valeur du TDS

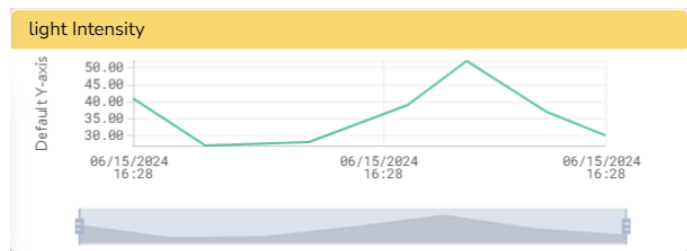


Figure III-35 La valeur de la luminosité

5 Conclusion

Ce chapitre a présenté une approche méthodique et détaillée pour la création d'un prototype fonctionnel de système d'aquaponie intelligent, mettant en évidence les étapes clés de l'analyse des besoins, de la conception structurelle, de la création des kits IoT, et du développement de l'interface utilisateur. Ces efforts combinés ont permis de développer un système complet et opérationnel, prêt à être testé et optimisé pour des applications pratiques.

Conclusion Générale

Conclusion Générale

Nous avons entrepris dans ce projet de fin d'études une exploration approfondie de l'aquaponie, un système intégré de production alimentaire, en examinant ses principes, ses composants et son fonctionnement. À travers une analyse détaillée, nous avons montré comment l'aquaponie combine les techniques d'aquaculture et d'hydroponie pour créer un système symbiotique qui offre de nombreux avantages, tels que la conservation de l'eau, l'amélioration des rendements et l'adaptabilité aux environnements urbains.

Dans le cadre du développement pratique, nous avons conçu et implémenté des kits IoT spécifiques pour surveiller et contrôler les paramètres critiques du système aquaponique. En particulier, nous avons détaillé le rôle des microcontrôleurs comme l'Arduino Uno WiFi Rev2 et l'ESP8266/ESP32, ainsi que des capteurs et actionneurs variés, allant des sondes de pH et de température aux pompes et relais. Le prototypage rapide et l'assemblage méticuleux de ces composants ont permis de créer des kits fonctionnels, adaptés à un environnement aquaponique.

L'intégration de la technologie IoT s'est avérée essentielle pour optimiser et automatiser le système. Nous avons utilisé la plateforme Ubidots pour collecter, stocker, visualiser et analyser les données en temps réel, facilitant ainsi la gestion à distance du système aquaponique. La capacité de créer des tableaux de bord personnalisés a permis une surveillance efficace et une réaction rapide aux changements environnementaux.

En conclusion, ce projet démontre le potentiel de la technologie IoT pour améliorer les systèmes aquaponiques. En combinant des connaissances théoriques avec des applications pratiques, nous avons non seulement développé des solutions innovantes pour l'agriculture durable mais aussi montré la voie pour de futures améliorations et expansions. L'expérience acquise dans ce projet de fin d'études ouvre de nouvelles perspectives d'amélioration. Nous pouvons citer, par exemple :

- Lancer une Start Up spécialisée dans le développement, l'installation et le conseil dans les systèmes aquaponiques
- L'intégration d'un quatrième kit permettant d'analyser les images grâce à l'intelligence artificielle (IA) afin de détecter les maladies et proposer le traitement adéquat.
- Améliorer les kits en proposant de nouvelles versions.

Conclusion Générale

- Développer notre propre plateforme IoT et application mobile.
- Prendre le temps nécessaire pour faire différentes cultures

Bibliographie

- [1] « Inciter les étudiants à concrétiser leurs idées innovantes – وزارة التعليم العالي والبحث العلمي ». Consulté le: 19 juin 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.mesrs.dz/index.php/fr/2022/12/inciter-les-etudiants-a-concretiser-leurs-idees-innovantes-2/>
- [2] F. O. P. U. FAO, « Résumé de L'État de la sécurité alimentaire et de la nutrition dans le monde 2023 ». FAO; IFAD; WHO; UNICEF; WFP, Rome, 2023.
- [3] « Différences entre Aquaponie et Hydroponie,» 1H2O3, 2024 ». [En ligne]. Disponible sur: <https://www.1h2o3.com/apprendre/aquaponie/differences-entre-aquaponie-et-hydroponie/>.
- [4] « Aquaponie : définition | Aquaponie.net ». Consulté le: 7 juin 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://aquaponie.net/aquaponie-definition/>
- [5] « Apprendre l'Aquaponie,» 1H2O3, 2024 ». [En ligne]. Disponible sur: <https://www.1h2o3.com/apprendre/aquaponie/>.
- [6] S. Jones, « Evolution of aquaponics », *Aquaponics J.*, vol. 1, 2002.
- [7] *La situation mondiale des pêches et de l'aquaculture 2020*. FAO, 2020. doi: 10.4060/ca9229fr.
- [8] G. Souad, « Cours Licence Aquaculture et Pisciculture ».
- [9] C. I. M. Martins *et al.*, « New developments in recirculating aquaculture systems in Europe: A perspective on environmental sustainability », *Aquac. Eng.*, vol. 43, n° 3, p. 83-93, 2010, doi: <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2010.09.002>.
- [10] « La pêche dans l'Égypte ancienne », Le Comptoir Général. Consulté le: 11 juin 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://lecomptoirgeneral.com/magazine/culture-peche/article/histoire-peche-dans-l-egypte-ancienne-cleopatre/>
- [11] « FAO - Oreochromis niloticus ». Consulté le: 20 juin 2024. [En ligne]. Disponible sur: https://www.fao.org/fishery/docs/CDrom/aquaculture/I1129m/file/en/en_niletilapia.htm
- [12] « FAO: Common carp home ». Consulté le: 20 juin 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.fao.org/fishery/affris/species-profiles/common-carp/common-carp-home/en/>
- [13] « Catfish ». Consulté le: 20 juin 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.fao.org/3/cc1395en/online/fish-cookbook-2022/catfish.html>
- [14] S. Christopher, C. Moti, P. Edoardo, et S. A. L. Alessandro, « Production alimentaire aquaponique à petite échelle. Élevage intégré de poissons et de plantes ». 2023.
- [15] B. C. Mohapatra, S. K. Panda, et N. K. C. D. Majhi, « Design and Development of User-Friendly Vertical Aquaponics Set-Up for Ornamental Fish and Plants », *Curr World Env.*, n° %118, 2023.
- [16] « Yibiyuan Irrigation ». [En ligne]. Disponible sur: <https://fr.yby-irrigation.com/hydroponic-system/10-tier-vertical-hydroponic-garden.html>.
- [17] N. Guellier, « Qu'est-ce que l'aquaponie ? Principe, origine, quelles plantes et poissons ? », Binette & Jardin. Consulté le: 7 juin 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://jardinage.lemonde.fr/dossier-1445-aquaponie.html>
- [18] D. C. Love *et al.*, « An International Survey of Aquaponics Practitioners », *PLOS ONE*, vol. 9, n° 7, p. 1-10, juill. 2014, doi: 10.1371/journal.pone.0102662.
- [19] V. Okomoda, S. Oladimeji, S. Solomon, O. Olabode, S. Ogah, et M. Ikhwanuddin, « Aquaponics production system: A review of historical perspective, opportunities, and challenges of its adoption », *Food Sci. Nutr.*, vol. 11, déc. 2022, doi: 10.1002/fsn3.3154.

Bibliographie

- [20] D. Love *et al.*, « Commercial aquaponics production and profitability: Findings from an international survey », *Aquaculture*, vol. 435, p. 67-74, janv. 2015, doi: 10.1016/j.aquaculture.2014.09.023.
- [21] S. A. Oladimeji *et al.*, « Aquaponics production of catfish and pumpkin: Comparison with conventional production systems. », *Food Sci. Nutr.*, vol. 8, n° 5, p. 2307-2315, mai 2020, doi: 10.1002/fsn3.1512.
- [22] F. Atique, P. Lindholm-Lehto, et J. Pirhonen, « Is Aquaponics Beneficial in Terms of Fish and Plant Growth and Water Quality in Comparison to Separate Recirculating Aquaculture and Hydroponic Systems? », *Water*, vol. 14, n° 9, p. 1447, avr. 2022, doi: 10.3390/w14091447.
- [23] X. Zhang et X. Cai, « Climate change impacts on global agricultural land availability », *Environ. Res. Lett.*, vol. 6, janv. 2011, doi: 10.1088/1748-9326/6/1/014014.
- [24] K. A. Obirikorang, W. Sekey, B. A. Gyampoh, G. Ashiagbor, et W. Asante, « Aquaponics for Improved Food Security in Africa: A Review », *Front. Sustain. Food Syst.*, vol. 5, p. 705549, août 2021, doi: 10.3389/fsufs.2021.705549.
- [25] S. Goddek, A. Joyce, B. Kotzen, et G. Burnell, *Aquaponics Food Production Systems - Combined Aquaculture and Hydroponic Production Technologies for the Future*. 2019. doi: 10.1007/978-3-030-15943-6.
- [26] M. Dos-Santos, « Smart Cities and urban areas – Aquaponics as Innovative urban agriculture », *Urban For. Urban Green.*, vol. 20, oct. 2016, doi: 10.1016/j.ufug.2016.10.004.
- [27] Y. Wei, W. Li, D. An, D. Li, Y. Jiao, et Q. Wei, « Equipment and Intelligent Control System in Aquaponics: A Review », *IEEE Access*, vol. PP, p. 1-1, nov. 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2953491.
- [28] F. Blidariu et A. Grozea, « Increasing the Economical Efficiency and Sustainability of Indoor Fish Farming by Means of Aquaponics-Review », *Sci. Pap. Anim. Sci. Biotechnol.*, vol. 44, oct. 2011.
- [29] D. Love *et al.*, « An International Survey of Aquaponics Practitioners », *PloS One*, vol. 9, p. e102662, juill. 2014, doi: 10.1371/journal.pone.0102662.
- [30] B. Yep et Y. Zheng, « Aquaponic trends and challenges – A review », *J. Clean. Prod.*, vol. 228, avr. 2019, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.04.290.
- [31] R. Tyson, D. D. Treadwel, et E. Simonne, « Opportunities and Challenges to Sustainability in Aquaponic Systems », *HortTechnology*, vol. 21, p. 1-13, févr. 2011, doi: 10.21273/HORTTECH.21.1.6.
- [32] P. Martinez, D. R. Ahmad, et M. Al-Hussein, « A vision-based system for pre-inspection of steel frame manufacturing », *Autom. Constr.*, vol. 97, p. 151-163, janv. 2019, doi: 10.1016/j.autcon.2018.10.021.
- [33] H. Haryanto, M. Ulum, A. Ibadillah, R. Alfita, K. Aji, et R. Rizkyandi, « Smart aquaponic system based Internet of Things (IoT) », *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 1211, p. 012047, avr. 2019, doi: 10.1088/1742-6596/1211/1/012047.
- [34] A. Dutta, P. Tamang, P. Dahal, R. Prajapati, et S. K.C., *IoT based Aquaponics Monitoring System*. 2018.
- [35] D. Pantazi, S. Dinu, et S. Voinea, « The smart aquaponics greenhouse—an interdisciplinary educational laboratory », *Romanian Rep. Phys.*, vol. 71, n° 3, p. 902, 2019.
- [36] A. K. Pasha, E. Mulyana, C. Hidayat, M. A. Ramdhani, O. T. Kurahman, et M. Adhipradana, « System design of controlling and monitoring on aquaponic based on Internet of Things », in *2018 4th International Conference on Wireless and Telematics (ICWT)*, IEEE, 2018, p. 1-5. Consulté le: 22 juin 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8527802/>

Bibliographie

- [37] « Sustainable Smart Aquaponics Farming Using IoT and Data Analytics | Semantic Scholar ». Consulté le: 8 juin 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.semanticscholar.org/paper/Sustainable-Smart-Aquaponics-Farming-Using-IoT-and-Paul-Agnihotri/a981ffec24aad1125af1363178b55bc3dd7f7981>
- [38] R. Barosa, S. Hassen, et L. Nagowah, *Smart Aquaponics with Disease Detection*. 2019, p. 6. doi: 10.1109/NEXTCOMP.2019.8883437.
- [39] W. M. Narvios, C. Cesa, F. Batayola, K. Bolo, S. Verdida, et Y. Nguyen, *Smart aquaponics system for a small-scale farmer for highly urbanized settler*, vol. 2502. 2022. doi: 10.1063/5.0108728.
- [40] H. Eneh *et al.*, « Towards an Improved Internet of Things Sensors Data Quality for a Smart Aquaponics System Yield Prediction », *MethodsX*, vol. 11, p. 102436, oct. 2023, doi: 10.1016/j.mex.2023.102436.
- [41] M. Adhipramana et R. M. E. Mulyana, « Remotely operated vehicle (ROV) robot for monitoring quality of water based on IoT », in *6th International Conference on Wireless and Telematics (ICWT) IEEE*, 2020, p. 1-7.
- [42] D. S. Yadav, *Microcontroller: Features and Applications*. New Age International, 2004.
- [43] H. MEGNAFI, « Électronique Embarquée–Arduino », 2024, Consulté le: 21 juin 2024. [En ligne]. Disponible sur: http://thesis.essa-tlemcen.dz/handle/STDB_UNAM/507
- [44] H. MEGNAFI, « Système à micro contrôleur–EasyPICV7 », 2024, Consulté le: 21 juin 2024. [En ligne]. Disponible sur: http://thesis.essa-tlemcen.dz/handle/STDB_UNAM/506
- [45] G. ABDELLAOUI et H. MEGNAFI, « Systèmes embarqués et temps réel (RaspberryPi) », 2019.
- [46] « Microcontrôleur Arduino Uno WiFi rev2 », RobotShop Europe. Consulté le: 30 mai 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://eu.robotshop.com/fr/products/arduino-uno-wifi-microcontroller-rev2>
- [47] A. Ismailov et Z. Jo`rayev, « Study of arduino microcontroller board », mars 2022.
- [48] Simadmin, « Tout sur l'ESP8266 et l'ESP32 », Elektronica Voor Jou. Consulté le: 30 mai 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://elektronicavoorjou.nl/fr/tout-sur-l%27esp8266-esp32/>
- [49] « ESP8266 vs ESP32, Lequel choisir? » Consulté le: 30 mai 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.atrakeur.com/blog/diy/esp8266-vs-esp32-lequel-choisir/>
- [50] engineer.ahsin, « Instructions de la carte de développement ENGINNERS ESP8266 NodeMCU », Manuals+. Consulté le: 30 mai 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://manuals.plus/fr/enginners/esp8266-nodemcu-development-board-manual>
- [51] « ESP32 et ESP8266 - Moussasoft ». Consulté le: 30 mai 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.moussasoft.com/esp32-et-esp8266/>
- [52] « DS18B20 Waterproof Temperature Sensor Cabl.pdf ».
- [53] « ph-sensor-ph-4502c.pdf ». Consulté le: 31 mai 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://cdn.awsli.com.br/969/969921/arquivos/ph-sensor-ph-4502c.pdf>
- [54] « Gravity_Analog_TDS_Sensor.pdf ».
- [55] « Turbidité | INSPQ », Institut national de santé publique du Québec. Consulté le: 31 mai 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.inspq.qc.ca/eau-potable/turbidite>
- [56] « LoraWan-capteur-turbidute-temperature.pdf ». Consulté le: 31 mai 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://deltalabprototype.fr/wp-content/uploads/2019/10/LoraWan-capteur-turbidute-temp%C3%A9rature.pdf>
- [57] « Propagation ». Consulté le: 31 mai 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.bruitparif.fr/propagation/>

Bibliographie

- [58] A. Djalilov, E. Sobirov, O. Nazarov, S. Urolov, et I. Gayipov, « Study on automatic water level detection process using ultrasonic sensor », *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 1142, n° 1, p. 012020, mars 2023, doi: 10.1088/1755-1315/1142/1/012020.
- [59] V. Kodathala, K. Kumar, R. C. Vunnam, et C. Raju, « Water Level Management Using Ultrasonic Sensor(Automation) », *Int. J. Comput. Sci. Eng.*, vol. 6, p. 799-804, juin 2018, doi: 10.26438/ijcse/v6i6.799804.
- [60] « Light dependent resistors ».
- [61] « Photorésistance : fonctionnement, choix, montages arduino, ... ». Consulté le: 31 mai 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://passionelectronique.fr/photoresistance/>
- [62] « DHT11–Temperature and Humidity Sensor », Components101. Consulté le: 1 juin 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://components101.com/sensors/dht11-temperature-sensor>
- [63] « 2.3 Premiers montages sur breadboard, Allumer une LED ! » Consulté le: 1 juin 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.robot-maker.com/ouvrages/2-3-allumer-une-led/>
- [64] oku electronics, « Demystifying the I2C Module for Arduino », Oku Electronics. Consulté le: 1 juin 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.okuelectronics.com/demystifying-the-i2c-module-for-arduino/>
- [65] « Module I2C | YoupiLab Components ». Consulté le: 1 juin 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://youpilab.com/components/product/module-i2c>
- [66] « Wiring I2C module on 16×2 LCD with SCL/SDA - Online Store ». Consulté le: 1 juin 2024. [En ligne]. Disponible sur: https://freeredar.shop/product_details/16989229.html
- [67] A. A. Chellal, J. Gonçalves, J. Lima, V. Pinto, et H. Megnafi, « Design of an embedded energy management system for Li–Po batteries based on a DCC-EKF approach for use in mobile robots », *Machines*, vol. 9, n° 12, p. 313, 2021.
- [68] « Just got ESP32, what program do you prefer for coding? », r/esp32. Consulté le: 2 juin 2024. [En ligne]. Disponible sur: www.reddit.com/r/esp32/comments/11m9z8f/just_got_esp32_what_program_do_you_prefer_for/
- [69] « Custom build of esp32 over idf-release/v5.1 - Development Platforms », PlatformIO Community. Consulté le: 2 juin 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://community.platformio.org/t/custom-build-of-esp32-over-idf-release-v5-1/36051>
- [70] Tutoduino, « Découvrir FreeRTOS sur un ESP32 avec PlatformIO », Tutoduino. Consulté le: 2 juin 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://tutoduino.fr/decouvrir-freertos-sur-un-esp32-avec-platformio/>
- [71] B. Simon, « What is IoT & Why IoT is Important », *internationalsecurityjournal*. juillet 2023. Consulté le: 17 mai 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://internationalsecurityjournal.com/why-iot-is-important/>
- [72] M. Kranz, *Building the Internet of Things: Implement New Business Models, Disrupt Competitors, Transform Your Industry*. John Wiley & Sons, 2016.
- [73] *Conceptual framework for economic evaluation of Globally Important Agricultural Heritage Systems (GIAHS): The case of Rice Fish Culture in China*. [En ligne]. Disponible sur: https://www.fao.org/fileadmin/user_upload/giahs/docs/Framework_on_Economic_Assessment_GIAHS.pdf
- [74] G. ABDELLAOUI, H. MEGNAFI, et F. T. BENDIMERAD, « A novel model using Reo for IoT self-configuration systems », in *2020 1st International Conference on Communications, Control Systems and Signal Processing (CCSSP)*, IEEE, 2020, p. 1-5. Consulté le: 21 juin 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9151679/>

Bibliographie

- [75] O. Hersent, D. Boswarthick, et O. Elloumi, *The Internet of Things: Key Applications and Protocols*. John Wiley & Sons, 2011.
- [76] « Agriculture IoT Market Share, Scope & Industry Growth, Analysis, 2030 », MarketsandMarkets. Consulté le: 5 juin 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/iot-in-agriculture-market-199564903.html>
- [77] B. Acharya, K. Garikapati, A. Yarlagadda, et S. Dash, « Chapter 1 - Internet of things (IoT) and data analytics in smart agriculture: Benefits and challenges », in *AI, Edge and IoT-based Smart Agriculture*, A. Abraham, S. Dash, J. J. P. C. Rodrigues, B. Acharya, et S. K. Pani, Éd., in Intelligent Data-Centric Systems. , Academic Press, 2022, p. 3-16. doi: 10.1016/B978-0-12-823694-9.00013-X.
- [78] « How IoT Applications Are Impacting Different Domains », xEnabler. Consulté le: 17 mai 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://xenabler.digital/blogs/how-iot-applications-are-impacting-different-domains-and-why-your-business-needs-it>
- [79] « Smart Home - Worldwide | Statista Market Forecast », Statista. Consulté le: 5 juin 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.statista.com/outlook/cmo/smart-home/worldwide>
- [80] A. M. R. <https://www.alliedmarketresearch.com>, « Smart Homes, Buildings Market Analysis - 2030 | Statistics, Growth », Allied Market Research. Consulté le: 5 juin 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.alliedmarketresearch.com/smart-home-automated-building-market>
- [81] « 41% of US internet households have a smart home device, building on the 90% of US households with internet at home », Parks Associates. Consulté le: 5 juin 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.parksassociates.com/blogs/press-releases/04112023>
- [82] « Internet of Things [IoT] in Healthcare Market Size & Share, 2032 ». Consulté le: 5 juin 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.fortunebusinessinsights.com/internet-of-things-iot-in-healthcare-market-102188>
- [83] « IoT Healthcare Market Size & Trends, Growth Analysis, Forecast [2030] », MarketsandMarkets. Consulté le: 5 juin 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/iot-healthcare-market-160082804.html>
- [84] S.-M. of I. Dr. Anand Lakshmanan, « Internet of Things – Convergence of Domains », *ictconnect*. juillet 2022. Consulté le: 17 mai 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://ictconnect.in/Tech/Article.aspx?articletitle=Internet-of-things-convergence-of-Domains>
- [85] « Internet of Things: What it is and the main IoT trends ». Consulté le: 17 mai 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.imd.org/reflections/internet-of-things/>
- [86] R. and M. ltd, « Internet of Things (IoT) Market - Growth, Trends, COVID-19 Impact, and Forecasts (2022 - 2027) ». Consulté le: 5 juin 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.researchandmarkets.com/reports/4591261/internet-of-things-iot-market-growth>
- [87] « Smart Cities Market Size, Industry Share | Forecast 2032 ». Consulté le: 5 juin 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.fortunebusinessinsights.com/industry-reports/smart-cities-market-100610>
- [88] « Smart Cities Market Share, Forecast | Growth Analysis & Opportunities [2030] ». Consulté le: 5 juin 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/smart-cities-market-542.html>
- [89] « MQTT with “Arduino” WiFi dev. Board - Development / Other Hardware Development », Arduino Forum. Consulté le: 2 juin 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://forum.arduino.cc/t/mqtt-with-arduino-wifi-dev-board/642783>

Bibliographie

- [90] H. Megnafi, L. Merad, D. Bennacer, A. Roztane, et W. Merina, *Internet of Things technology for efficient fire hydrant management*. 2023, p. 6. doi: 10.1109/IW_MSS59200.2023.10368652.
- [91] Z. Karaouzene, H. Megnafi, L. Merad, et S. M. Meriah, « Artificial Intelligence in 5G Planning: Optimization of EnodeB Planning Based on 4G KPIs », in *2023 IEEE International Workshop on Mechatronic Systems Supervision (IW_MSS)*, IEEE, 2023, p. 1-5. Consulté le: 21 juin 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/10368904/>
- [92] H. Megnafi, « Frequency plan optimization based on genetic algorithms for cellular networks », *J. Commun. Softw. Syst.*, vol. 16, n° 3, p. 217-223, 2020.
- [93] « Système aquaponique maison pour un jardinage durable | Indoor aquaponics, Aquaponics fish, Aquaponics diy », Pinterest. Consulté le: 20 juin 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.pinterest.com/pin/gardening-in-2024--281543723279126/>
- [94] « PVC d'un diamètre de 100 mm en mètres, Percer des trous de 70 mm, pour les pots... Hydroponic gardening, Hydroponic farming, Vegetable garden design - Online Store ». Consulté le: 20 juin 2024. [En ligne]. Disponible sur: https://lbibestar.shop/product_details/20735959.html
- [95] ت. ا.، « ECOLE SUPERIEURE EN SCIENCES APPLIQUEES --T L E M C E N-- ».
- [96] M. Brahami, B. Bettayeb, M. Dahane, M. Sahnoun, et M. Souier, *Capacitated multiple allocation incomplete hub location problem allowing direct links between non-hub nodes*. 2021, p. 6. doi: 10.1109/CyMaEn50288.2021.9497308.
- [97] M. Brahami, M. Dahane, M. Souier, et M. Sahnoun, « Sustainable capacitated facility location/network design problem: a Non-dominated Sorting Genetic Algorithm based multiobjective approach », *Ann. Oper. Res.*, vol. 311, avr. 2022, doi: 10.1007/s10479-020-03659-9.
- [98] « Ubidots IoT Platform », CloudBlue. Consulté le: 18 mai 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://catalog.cloudblue.com/products/ubidots-iot-platform/>
- [99] « Welcome », Ubidots. Consulté le: 15 juin 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://docs.ubidots.com/reference/welcome>

Annexes

Choix des poissons

Les poissons représentent le moteur du système aquaponique, si bien qu'ils fournissent les nutriments nécessaires pour la poussée des plantes. Cependant, le choix de l'espèce est une étape cruciale pour la mise en place du prototype de manière fonctionnelle.

Le tilapia fait des poissons les plus exploitées dans les différents élevages d'aquaponie et de pisciculture. Il est le deuxième poisson d'élevage après la carpe [5]. Ils ne sont pas très exigeants quant à la qualité de l'eau et ont une large faculté d'adaptation aux écarts de température, ce qui, en fait, des poissons très robustes [6].

Le tilapia regroupe à l'heure actuelle environ 70 espèces. Parmi elles, on trouve le tilapia rouge qui fait partie des espèces qui a été introduites en Algérie pour encourager son élevage.

Les *Oreochromis spp* connus sous le nom des tilapias rouges sont des hybrides produits à partir de croisements entre *O. mossambicus* et *O. niloticus* (tilapia rouge de Taïwan) ou *O. mossambicus* et *O. niloticus* (tilapia rouge des Philippines). Ils ont une croissance aussi rapide que le tilapia du Nil et peuvent se développer encore mieux dans les étangs d'eau saumâtre et les cages marines [5]. Dans le tableau ci-dessous, on trouve les conditions de vie nécessaires du tilapia rouge :

Paramètres	Intervalles
Température	En milieu naturel : 13,5°C – 33°C Laboratoire : 7°C – 41°C Pour la croissance : 28°C [7]
PH	6.5 – 11 [8]
Conductivité	50 - 100 ms/cm [9]
Turbidité	100 mg/L [10]
Oxygène dissous	4.5-5.7 mg/l [11]

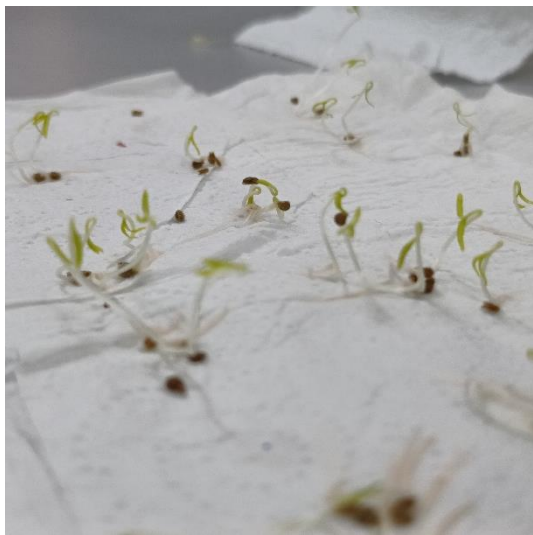
Figure 103 : Conditions de vie du tilapia rouge en aquaponie

Choix des plantes

- **La tomate**

La tomate est considérée comme un des fruits les plus consommés dans le monde, de sorte qu'en 2021 la production mondiale de tomates destinées à la consommation fraîche et à la transformation dépassait 189 millions de tonnes métriques. Dans l'Union Européenne, la consommation par habitant de tomates fraîches est stable à environ 15 kg par an, tandis que la consommation de tomates transformées est également stable à environ 18 kg par an [12].

Elle fait partie des cultures populaires en aquaponie en raison de leur rendement élevé et de leur compatibilité avec ce système. Si bien que les tomates poussent plus rapidement dans les systèmes aquaponiques que dans le sol, atteignant souvent leur taille maximale en aussi peu que quatre semaines [13]. L'aquaponie permet aussi une production continue de tomates toute l'année, ce qui est particulièrement avantageux dans les régions au climat rigoureux et le port vertical des variétés de tomates indéterminées les rend adaptées à l'aquaponie, optimisant l'espace limité. [14]



Annexes

Le FAO a mis en place un guide pour la culture de différents fruits et légumes en aquaponie, du coup voici les conditions idéales pour cultiver les tomates en aquaponie :

Paramètres	Intervalles
Température	15-22 °C (floraison plus de 24 °C)
Température de germination	13 – 21 °C
Temps de germination	3 – 7 jours
Temps de croissance	24 – 32 jours
PH	6 – 7
Espacement des plantes	18 – 30 cm (20–25 têtes/m ²)
Lumière	Plein soleil (ombrage léger par temps chaud)

Figure 104 : Conditions de la culture de la tomate en aquaponie [39]

- **La laitue**

La laitue se classe souvent parmi les premiers légumes à feuilles en termes de consommation. Elle est particulièrement bien adaptée à la culture en aquaponie car elle pousse rapidement et ne nécessite pas beaucoup d'espace racinaire.

La laitue n'est pas seulement l'un des légumes à croissance la plus rapide dans les jardins aquaponiques, mais c'est aussi l'un des légumes à croissance la plus rapide au monde. Dans les jardins traditionnels, la plupart des laitues poussent en environ 30 jours, tandis que les variétés plus robustes et pommées de laitues prennent entre 45 et 60 jours pour mûrir. Cependant, dans les systèmes aquaponiques, les laitues peuvent pousser deux à trois fois plus rapidement grâce à l'accès constant à une eau riche en nutriments, 24 heures sur 24. Cela signifie que les laitues en aquaponie peuvent pousser en aussi peu que deux semaines [15].

Le tableau ci-dessous montre les conditions de vie de la laitue en aquaponie

Annexes

Paramètres	Intervalles
Température	15-22 °C (floraison plus de 24 °C)
Température de germination	13 – 21 °C
Temps de germination	3 – 7 jours
Temps de croissance	24 – 32 jours
PH	6 – 7
Espacement des plantes	18 – 30 cm (20–25 têtes/m ²)
Lumière	Plein soleil (ombrage léger par temps chaud)

Figure 105 : Conditions de la culture de la laitue en aquaponie [39]

- **Le Basilic**

Le basilic constitue une des herbes aromatiques les plus utilisées dans le monde. Elle ajoute souvent une saveur fraîche et aromatique aux salades, plats de pâtes et soupes. Sa culture en aquaponie offre de nombreux avantages, notamment une croissance plus rapide, des rendements plus élevés, une utilisation efficace des ressources et une meilleure qualité des produits,

Le tableau ci-dessous présente les conditions de vie nécessaires de la culture du basilic en aquaponie :

Paramètres	Intervalles
Température	20 – 25 °C
Température de germination	20 – 25 °C
Temps de germination	6 – 7 jours
Temps de croissance	5 – 6 semaines

Annexes

PH	5,5 – 6,5
Espacement des plantes	15 – 25 cm (8 – 40 plantes/m ²)
Lumière	Ensoleillée ou légèrement abritée

Figure 106 : Conditions de la culture du basilic en aquaponie [39]

Bibliographie de Annexes

- [1 A. Boero, «Clubic,» 15 Novembre 2021. [En ligne]. Available: <https://www.clubic.com/pro/entreprises/intel/actualite-393081-le-premier-microprocesseur-commercial-a-50-ans-aujourd-hui-et-c-est-un-intel.html>. [Accès le 13 Avril 2024].
- [2 P.-Y. Rochat, *Introduction aux microcontrôleurs*, Lausanne, 2016.
- [3 T. Kowalski, «easypartner,» 12 Mars 2020. [En ligne]. Available: <https://easypartner.fr/blog/arduino-la-carte-de-programmation-qui-fait-sa-revolution/#:~:text=Arduino%20a%20%C3%A9t%C3%A9%20construit%20autour,r%C3%A9guli%C3%A8rement%20pour%20%C3%A9tancher%20sa%20soif.>. [Accès le 13 Avril 2024].
- [4 Jérôme, «passionelectronique,» 16 Janvier 2024. [En ligne]. Available: <https://passionelectronique.fr/photoresistance/>. [Accès le 15 Avril 2024].
- [5 «<https://www.alltechcoppens.com>,» [En ligne]. Available: [https://www.alltechcoppens.com/uploads/FR-2022-05-Tilapia-species-tool_2023-03-09-092344_ohcs.pdf?v=1678353824#:~:text=Tilapia%20rouge&text=Le%20tilapia%20du%20Nil%20est,rouge%20de%20Ta%C3%AFwan\)%20ou%20O..](https://www.alltechcoppens.com/uploads/FR-2022-05-Tilapia-species-tool_2023-03-09-092344_ohcs.pdf?v=1678353824#:~:text=Tilapia%20rouge&text=Le%20tilapia%20du%20Nil%20est,rouge%20de%20Ta%C3%AFwan)%20ou%20O..) [Accès le 16 Mai 2024].
- [6 S. Benhalima et A. Debza, *Prototype expérimental d'une mini serre aquaponique automatisée*, Université Abdelhamid Ibn Badis Mostaganem, 2023.
- [7 B. Abidi et B. Larbi Ben Houra, *Étude à la tolérance de salinité chez le tilapia rouge (Oreochromis)*, Blida, 2018.
- [8 M. Amirul Islam, D. R. Das, S. M. Khalequzzaman, D. Kamal et K. Abdul Halim, «Extensive Culture of Red Tilapia with Four Stocking Densities at Beel Kodalia, Bagerhat, Bangladesh,» *Pakistan Journal of Biological Sciences*, vol. 9, n° 110, pp. 1965-1969, 2006.
- [9 H. Miloude, O. Mohammed et Y. N. Hicham, *Contrôle de la qualité de l'eau d'élevage des poissons destinés à la consommation humaine*, Bordj Bou Arreridj, 2023.

Annexes

- [1 I. Ardjosoediro et I. W. Ramnarine, «The influence of turbidity on growth, feed conversion and survivorship of the Jamaica red tilapia strain,» *Aquaculture*, vol. 212, pp. 159-165, 2002.
- [1 H. Aris, M. Fadjar et H. Kartikaningsih, «Red Tilapia (*Oreochromis* sp.) Rearing Productivity in Running Water of Banjaran Irrigation Area, Purwokerto, Central Java, Indonesia,» *Journal of Life Science and Biomedicine*, vol. 5, n° 16, pp. 159-162, 2015.
- [1 F.-X. Branthôme, «Worldwide (total fresh) tomato production in 2021,» 23 Février 2023. [En ligne]. Available: https://www.tomatonews.com/en/worldwide-total-fresh-tomato-production-in-2021_2_1911.html. [Accès le 18 Mai 2024].
- [1 Jamie, «Aquaponic Tomatoes 101 – Your Complete Growing Guide,» [En ligne]. Available: <https://whyfarmit.com/aquaponic-tomatoes/>. [Accès le 18 Mai 2024].
- [1 «GoGreenAquaponics,» 19 Février 2022. [En ligne]. Available: <https://gogreenaquaponics.com/blogs/news/how-to-grow-tomatoes-in-aquaponics>. [Accès le 18 Mai 2024].
- [1 «How to Grow Lettuce in Aquaponics,» 17 Janvier 2024. [En ligne]. Available: <https://gogreenaquaponics.com/blogs/news/how-to-grow-lettuce-in-aquaponics#:~:text=Lettuce%20is%20one%20of%20the%20best%20crops%20to%20grow%20in,water%20temperatures%20as%20other%20plants..> [Accès le 18 Mai 2024].
- [1 D. S. Yadav, *Microcontroller : Features and Applications*, New Delhi: New Age International, 2004.
- [1 A. S. Ismailov, Z. B. Jo‘rayev et A. M. B. Institute, «Study of arduino microcontroller board,» *Science and Education*, vol. 3, n° 13, pp. 172-173, 2022.
- [1 M. Fezari et A. Al Dahoud, «Exploring One-wire Temperature sensor ³DS18B20 with,» 2019.
- [1 L. Kacel et B. I. Nacer , *Contrôle de la qualité de l'eau à travers l'usage d'une plateforme électronique*, Bouira, 2022.
- [2 «Snowate,» [En ligne]. Available: <https://www.snowate.com/fr/knowledge-calculator/knowledge/tds-water-analysis.html>. [Accès le 14 Avril 2024].
- [2 P. C. e. l. m. d. G. s. s. l. d. l. n. d. s. p. d. Québec, «inspq.qc.ca,» Juin 2003. [En ligne]. Available: <https://www.inspq.qc.ca/eau-potable/turbidite#:~:text=La%20turbidite%20est%20la%20mesure,l'inverse%20de%20la%20limpide%20..> [Accès le 14 Avril 2024].
- [2 L. Perra, J. Rocher , J. Escriva et J. Lloret, «Design and development of low cost smart turbidity sensor for water quality monitoring in fish farms,» *Aquacultural Engineering*, vol. 81, pp. 10-18, 2018.
- [2 «DFRobot,» [En ligne]. Available: https://wiki.dfrobot.com/Turbidity_sensor_SKU__SEN0189#target_5. [Accès le 14 Avril 2024].

Annexes

- [2 A. Djalilov, E. Sobirov, O. Nazarov, S. Urolov et I. Gayipov, «Study on automatic water level detection process using ultrasonic sensor,» *In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, vol. 1142, n° %11, 2023.
- [2 K. S. Varun, K. A. Kumar, V. R. Chowdary et C. S. K. Raju, «Water Level Management Using Ultrasonic Sensor(Automation),» *International Journal of Computer Sciences and Engineering*, vol. 6, n° %16, pp. 799-804, 2018.
- [2 C. GRAULLIER et C. DEBRÉE, *Étude d'un capteur de lumière : la photorésistance*, Orléans, 2019-2020.
- [2 «Mouser,» [En ligne]. Available: <https://www.mouser.com/datasheet/2/758/DHT11-Technical-Data-Sheet-Translated-Version-1143054.pdf>. [Accès le 15 Avril 2024].
- [2 B. Kherkhour et Z. Zerioul, «Conception et réalisation d'un système domotique à base Arduino,» Faculté de Génie Électrique et d'Informatique - Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou, 2016.
- [2 K. Draif, «MouusaSoft,» [En ligne]. Available: <https://www.moussasoft.com/sg90-servo-moteur-arduino/>. [Accès le 15 Avril 2024].
- [3 «Robotique.tech,» 24 Mars 2022. [En ligne]. Available: <https://www.robotique.tech/tutoriel/commander-une-pompe-a-eau-par-la-carte-arduino/>. [Accès le 15 Avril 2024].
- [3 «Tetradon,» [En ligne]. Available: <https://www.tetradon.com.ua/zoomagazin/vse-dlya-pruda/pompi-nasosi-dlya-prudov-i-fontanov/nasos-xilong-xl-134-2300l-ch>. [Accès le 16 Avril 2024].
- [3 Cfaury, «Arduino.blaise-pascal,» 28 Novembre 2020. [En ligne]. Available: [https://arduino.blaise-pascal.fr/cabler-une-led/#:~:text=Une%20LED%20est%20une%20diode,de%20la%20masse%20\(GND\)..](https://arduino.blaise-pascal.fr/cabler-une-led/#:~:text=Une%20LED%20est%20une%20diode,de%20la%20masse%20(GND)..). [Accès le 16 Avril 2024].
- [3 «sensorkit.arduino,» [En ligne]. Available: <https://sensorkit.arduino.cc/sensorkit/module/lessons/lesson/04-the-buzzer>. [Accès le 16 Avril 2024].
- [3 A. Factory, «ArduinoFactory,» 29 Octobre 2022. [En ligne]. Available: <https://arduino-factory.fr/buzzer/#:~:text=Le%20buzzer%20est%20compos%C3%A9%20d,notes%20et%20des%20m%C3%A9lodies%20simples..> [Accès le 16 Avril 2024].
- [3 F. O. P. e. U. FAO, «Résumé de L'État de la sécurité alimentaire et de la nutrition dans le monde 2023,» FAO; IFAD; WHO; UNICEF; WFP, Rome, 2023.
- [3 «Différences entre Aquaponie et Hydroponie,» 1H2O3, 2024. [En ligne]. Available: <https://www.1h2o3.com/apprendre/aquaponie/differences-entre-aquaponie-et-hydroponie/>. [Accès le 18 Mars 2024].
- [3 «Apprendre l'Aquaponie,» 1H2O3, 2024. [En ligne]. Available: <https://www.1h2o3.com/apprendre/aquaponie/>. [Accès le 18 Mars 2024].

Annexes

- [3 «Aquaponie.net,» 2024. [En ligne]. Available: <https://aquaponie.net/aquaponie-definition/>. [Accès le 21 Mars 2024].
- [3 S. Christopher , C. Moti, P. Edoardo , S. Austin et L. Alessandro, *Production alimentaire aquaponique à petite échelle. Élevage intégré de poissons et de plantes*, 2023.
- [4 N. Mccray, «Earth.org,» 12 Février 2023. [En ligne]. Available: <https://earth.org/hydroponic-farming/>. [Accès le 21 Mars 2024].
- [4 «Rise Hydroponics,» 21 Juillet 2021. [En ligne]. Available: <https://risehydroponics.in/which-is-the-best-hydroponics-system/>. [Accès le 23 Mars 2024].
- [4 S. Prana, «Fast Buds,» 26 Septembre 2022. [En ligne]. Available: <https://2fast4buds.com/fr/news/Quest-ce-hydroponique-comment-ce-fait-elle>. [Accès le 23 Mars 2024].
- [4 B. C. Mohapatra, S. K. Panda, N. K. Chandar et D. Majhi, «Design and Development of User-Friendly Vertical Aquaponics Set-Up for Ornamental Fish and Plants.,» *Curr World Environ*, n° %118, 2023.
- [4 «Yibiyuan Irrigation,» [En ligne]. Available: <https://fr.yby-irrigation.com/hydroponic-system/10-tier-vertical-hydroponic-garden.html>. [Accès le 23 Mars 2024].
- [4 S. Jones, «Evolution of aquaponics,» *Aquaponics Journal vol.1*, 2002.
- [4 «Aquaponie.net,» 03 Mai 2016. [En ligne]. Available: <https://aquaponie.net/aquaponie-evolution-pratiques-ancestrales/>. [Accès le 03 2024].
- [4 N. Guellier, «Le Monde,» 25 Octobre 2017. [En ligne]. Available: <https://jardinage.lemonde.fr/dossier-1445-aquaponie.html>. [Accès le Mars 2024].
- [4 D. C. Love, J. P. Fry, L. Genello, E. S. Hill, A. J. Frederick, X. Li et K. Semmens, «An International Survey of Aquaponics Practitioners,» *Plos One*, vol. 9, n° %17, 16 Juillet 2014.
- [4 V. T. Okomoda, S. A. Oladimeji, S. G. Solomon, S. O. Olufeagba, S. I. Ogah et M. Ikhwanuddin, «Aquaponics production system: A review of historical perspective, opportunities, and challenges of its adoption,» *Food science & nutrition*, vol. 11, n° %13, pp. 1157-1165, 2023.
- [5 D. C. Love, J. P. Fry, X. Li, E. S. Hill, L. Genello, K. Semmens et R. E. Thompson, «Commercial aquaponics production and profitability: Findings from an international survey,» *Aquaculture*, n° %1435, pp. 67-74, 2015.
- [5 S. A. Oladimeji, V. T. Okomoda, S. O. Olufeagba, S. G. Solomon, A. B. Abol-Munafi, K. I. Alabi, M. Ikhwanuddin, C. O. Martins, J. Umaru et A. Hassan, «Aquaponics production of catfish and pumpkin: Comparison with conventional production systems,» *Food Science & Nutrition*, vol. 8, n° %15, pp. 2307-2315, 2020.

Annexes

- [5 F. Atique, P. Lindholm-Lehto et J. Pirhonen, «Is Aquaponics Beneficial in Terms of Fish and Plant Growth and Water Quality in Comparison to Separate Recirculating Aquaculture and Hydroponic Systems ?»,» *Water*, vol. 14, n° 19, p. 1447, 2022.
- [5 X. Zhang et X. Cai, «Climate change impacts on global agricultural land availability»,» *Environmental Research Letters*, vol. 6, n° 11, 2021.
- [5 K. A. Obirikorang, W. Sekey, B. A. Gyampoh, G. Ashiagbor et Winston, «Aquaponics for Improved Food Security in Africa: A Review»,» *Frontiers in Sustainable Food Systems*, vol. 5, 2021.
- [5 S. Goddek, A. Joyce, B. Kotzen et G. M. Burnell, *Aquaponics Food Production Systems : Combined Aquaculture and Hydroponic Production Technologies for the Future*, Springer Cham, 2019.
- [5 M. J. P. L. dos Santos, «Smart cities and urban areas—Aquaponics as innovative urban agriculture»,» *Urban Forestry & Urban Greening*, vol. 20, pp. 402-406, 2016.
- [5 B. Paul, S. Agnihotri, K. B., P. Tripathi et N. Babu C. , «Sustainable Smart Aquaponics Farming Using IoT and Data Analytics»,» *Journal of Information Technology Research (JITR)*, vol. 15, n° 11, p. 27, 2022.
- [5 R. Barosa, S. I. Sayed Hassen et L. Nagowah, «Smart aquaponics with disease detection»,» *In 2019 Conference on Next Generation Computing Applications (NextComp)*, pp. 1-6, 2019.
- [5 W. M. O. Narvios, C. K. N. Cesa, F. F. Batayola, K. Bolo, S. M. Verdida et Y. Q. Nguyen, «Smart Aquaponics System for a Small-Scale Farmer for Highly Urbanized Settler»,» *In AIP Conference Proceedings*, vol. 2502, n° 11, 2022.
- [6 A. H. Eneh, C. N. Udanor, N. I. Ossai, S. O. Aneke, P. O. Ugwoke, A. A. Obayi, C. H. Ugwuishiwu et G. E. Okereke, «Towards an improved internet of things sensors data quality for a smart aquaponics system yield prediction»,» *MethodsX*, vol. 11, p. 102436, 2023.
- [6 M. Adhipramana, R. Mardiaty et E. Mulyana, «Remotely operated vehicle (ROV) robot for monitoring quality of water based on IoT»,» *6th International Conference on Wireless and Telematics (ICWT) IEEE*, pp. 1-7, 2020.
- [6 Z. Schmautz, F. Loeu, F. Liebisch, A. Graber, A. Mathis, T. Griessler Bulc et R. Junge, «Tomato Productivity and Quality in Aquaponics: Comparison of Three Hydroponic Methods»,» *Water*, vol. 8, n° 111, p. 533, 2016.