

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Centre Universitaire Abdelhafid Boussouf – Mila

Institut des Sciences et de Technologie

Département de Génie mécanique et l'électromécanique

N° Ref :.....



Projet de fin étude préparé en vue de l'obtention du diplôme de **MASTER**

Spécialité : ELECTROMECHANIQUE

Conception et mise en œuvre d'un système semi-hydroponique vertical

Réalisé par :

- BENSIALI Rodayna
- CHOUGUI Aya
- KEBBABI Imad
- MERIOUCHE Chiheb eddine

Soutenu devant le jury:

Dr.	B. SMAANI	Président
Dr.	R. BOUHANECHÉ	Examineur
Dr.	R. BELAIDI	Promoteur

Année universitaire: 2024/2025

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

اللَّهُ

Remerciements

*Louange à Dieu, car c'est par Sa grâce que s'accomplissent les bonnes œuvres.
C'est grâce à Sa sagesse, Sa force et Son soutien que nous avons pu franchir les étapes de
ce parcours et mener à bien ce projet.*

*Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à Monsieur BELAIDI Rachid,
notre encadrant, pour sa disponibilité, ses conseils précieux et son accompagnement
constant tout au long de la réalisation de ce mémoire.*

*Nos remerciements s'adressent également à l'ensemble des enseignants du
département de génie mécanique et électromécanique, ainsi qu'à tous ceux qui, depuis
l'école primaire jusqu'à l'université, nous ont transmis leur savoir avec dévouement et
patience. Leur engagement a largement contribué à la construction de notre parcours
académique.*

*Nous exprimons aussi notre sincère reconnaissance à toutes les personnes qui nous
ont soutenus de près ou de loin par un mot d'encouragement, un geste, une aide technique
ou morale et qui ont contribué, d'une manière ou d'une autre, à l'accomplissement de ce
travail.*

*Enfin, nous remercions chaleureusement les membres du jury pour l'honneur qu'ils nous
font en acceptant d'évaluer notre mémoire.*

Dédicace

*À mes chers **parents**,*

*Vous êtes la lumière de ma vie, le soutien qui m'a toujours donné la force d'avancer.
Merci pour votre amour, votre patience et tous vos sacrifices pour moi. Que Dieu vous
protège et vous accorde la santé, le bonheur et une longue vie.*

À ceux qui partagent ma vie et mon cœur :

*À **Abdelsttar**, un exemple de force et de générosité,
À **Ayoub**, la joie de la maison, toujours avec son sourire innocent,
À ma chère sœur **Tawba**, ma complice, mon soutien, ma fierté.*

À tous mes professeurs,

*Merci pour votre aide, vos efforts et votre confiance pendant toutes mes années d'étude.
Vos conseils m'ont beaucoup aidée.*

À toute ma grande famille,

*À mes oncles, mes tantes, et à tous ceux qui m'aiment et me soutiennent,
Je vous dédie aussi cette réussite, avec beaucoup d'amour et de reconnaissance.*

Rodayna

Dédicace

Louange à Allah, source de toute réussite : par Sa grâce, l'effort s'illumine, les veilles prennent sens et les rêves deviennent réalité.

Je dédie ce modeste travail, né de mes efforts, forgé dans les moments de doute, soutenu par l'amour et l'endurance :

À ma mère, la femme invincible, celle dont le regard a chassé mes doutes, dont la voix a apaisé mes peines. Tu es ma boussole dans la tempête, ma lumière dans les nuits sombres, la racine profonde de mon courage. Si ce travail est une victoire, il est d'abord le fruit de ton amour.

À mon père, homme d'une noblesse rare, tu es ce roc immobile sur lequel ma volonté s'est appuyée, cette force tranquille qui m'a portée sans jamais faillir. Tu es mon pilier, mon repère, mon héros discret. Puisse Dieu te récompenser pour chaque pas que j'ai pu faire grâce à toi.

À mes sœurs : Djoumana, Oumaima, Maya, vos rires et votre tendresse sont mes racines. Je vous souhaite une vie pleine de lumière, de succès et de protection divine.

À mon petit frère Mouayed Abderrahmene, petit ouragan de bonheur, ta joie a été un baume au milieu des longues journées.

À toutes celles et ceux qui m'ont tendu la main, dit un mot, partagé un regard compatissant, merci d'avoir été là, même dans l'ombre.

Et enfin, à moi-même, à celle qui a tenu bon lorsque tout semblait flancher, qui a affronté les tempêtes en silence, les yeux pleins de fatigue mais le cœur plein d'espoir. À cette âme persévérante qui n'a jamais cessé d'y croire, même dans l'ombre. Cette réussite t'appartient. Sois-en fière, profondément.

Aya

Dédicace

*{Allah élève en degrés ceux d'entre vous qui croient et ceux à qui le savoir a été donné}
Allah a dit : « Les vents soufflent selon ce qu'Allah veut pour elles. Nous sommes les vents, nous sommes la mer et les navires. Celui qui espère quelque chose avec détermination l'atteindra, même si les hommes et les djinns s'y opposent. Louange à Allah, le Détenteur des bienfaits et des grâces, de la générosité et de la bonté. Ô Seigneur, merci pour le succès que Ta miséricorde a permis. Car la réussite n'est que le souffle de Ton don. »*

Je dédie le fruit de ma réussite :

*À celui qu'Allah a couronné de respect et de sagesse, Celui qui m'a appris que la réussite ne vient qu'avec patience et persévérance, À la lumière qui a éclairé mon chemin, À la flamme dont la lumière ne s'éteindra jamais dans mon cœur, À celui dont je porte le nom avec fierté : **Mon père.***

À mon premier et éternel soutien, Ma force après Allah, La prunelle de mes yeux, ce que j'ai de plus précieux, À celle dont les prières sincères ont été le secret de mon succès, Au paradis de mon cœur, Celle qui m'a accompagné et guidé dans chaque étape de ma vie, Je suis reconnaissant qu'Allah t'ait choisie comme mère, Ô meilleur appui, plus beau réconfort, et don le plus noble...

*À ma bien-aimée : **ma mère.***

*À ceux dont il fut dit : « Nous raffermirons ton bras par ton frère », À ceux qui ont été ma force et mon soutien, Des sources où je me suis abreuvé : **Abdessemed et Maftah Eddine.***

À celles qui me rappellent ma force, Qui se tiennent derrière moi comme mon ombre, Les fleurs de la maison, son cœur chaleureux : mes deux sœurs.

À tous ceux que ma mémoire a pu contenir, mais que ma page n'a pu énumérer,

Merci à moi-même, Pour chaque patience, Pour chaque effort et chaque pas de fierté, Pour m'être tenu debout seul, sans jamais fléchir. Je me remercie aujourd'hui, pleinement.

Imad

Dédicace

À ma maman, qui m'a toujours soutenu avec amour.

À mon papa, qui m'a appris à être fort et patient.

À mes frères et sœurs : À Malak et son fils Sand, qui apportent de la joie à ma vie.

À Wi'am, toujours là pour moi avec gentillesse.

À Arwa, ma petite sœur pleine d'énergie.

À Mostapha, mon frère et mon soutien.

À ma tante Hayat, pour son amour et ses encouragements.

Et à une personne spéciale dans mon cœur, qui m'a donné de la force sans rien dire.

Je vous dédie ce travail avec tout mon cœur et ma gratitude

Chiheb eddine

Sommaire

Remerciement	
Dédicaces	
Sommaire	
La liste des tableaux	
La listes des figures	
La liste d'abréviations	
Introduction générale	1

I État de l'art de l'hydroponie

I.1 Introduction à l'agriculture hydroponique	2
I.2 Présentation du concept d'hydroponie	2
I.3 Historique et évolution de l'hydroponie	3
I.4 Culture hydroponique dans le monde et en Algérie.....	5
I.4.1 Dans le monde	5
I.4.2 En Algérie.....	5
I.5 Principes fondamentaux et exigences clés de la culture hydroponique	5
I.5.1 Exigences physico-chimiques	6
I.5.2 Composition et équilibre des solutions nutritives.....	7
I.5.3 Les conteneurs et les supports racinaires	8
I.5.4 La lumière	9
I.6 Catégories de systèmes hydroponiques.....	9
I.6.1 Systèmes actifs et passifs	9
I.6.2 Systèmes avec ou sans substrat	10
I.6.3 Systèmes à boucle ouverte et boucle fermée.....	10
I.7 Types de systèmes hydroponiques	11
I.7.1 Technique du film nutritif (NFT).....	11

I.7.2 Aéroponie	12
I.7.3 Aquaponie.....	13
I.7.4 Culture en eau profonde (Deep Water Culture DWC)	14
I.7.5 Technique à flux profond (Deep flow technique DFT).....	14
I.7.6 La méthode Kratky (The Kratky method).....	15
I.7.7 Système à mèches (Wick System)	16
I.7.8 Système à marées (Ebb and Flow).....	17
I.7.9 Système goutte-à-goutte (Drip irrigation system)	18
I.8 Comparaison entre agriculture conventionnelle et hydroponique	19
I.9 Bénéfices et limites de l'hydroponie.....	20
I.9.1 Pourquoi Choisir l'Hydroponie : Avantages et Atouts	20
I.9.2 Contraintes et défis associés à l'hydroponie	20
I.10 Conclusion	21

II Étude technique et choix des composants

II.1 Introduction	23
II.2 Objectif du projet.....	23
II.3 Justification du choix du système vertical semi-hydroponique	24
II.4 Composants clés du système hydroponique automatisé	24
II.4.1 Le microcontrôleur ESP32.....	24
II.4.2 Capteurs	28
II.4.3 Actionneurs	33
II.4.4 Alimentation électrique	38
II.5 Environnement de développement et outils logiciels	41
II.6 Gestion climatique	43
II.7 Gestion d'irrigation.....	44
II.8 Conclusion.....	44

III Essais du système et analyse des performances

III.1 Introduction.....	46
III.2 Simulation initiale sous Arduino IDE et Proteus	46
III.2.1 Objectif de la simulation.....	46
III.2.2 Schéma électronique de simulation.....	47
III.2.3 Liste et configuration des composants simulés dans Proteus	47
III.2.4 Développement du premier code de simulation (Arduino UNO).....	50
III.2.5 Traitement des données capteurs.....	53
III.2.6 Logique de commande et fonctionnement du système simulé	55
III.2.7 Résultats attendus et validation de la simulation	57
III.3 Migration vers ESP32.....	62
III.3.1 Justification du remplacement de l'Arduino par ESP32	62
III.3.2 Adaptation du code Arduino à ESP32	62
III.4 Modélisation électronique avec Fritzing	66
III.5 Développement de l'application mobile sur Blynk.....	67
I.1.1 Création du compte Blynk et configuration du projet via la plateforme web	67
III.5.1 Accéder au projet Blynk Web depuis l'application mobile	75
III.6 Intégration matérielle.....	77
III.6.1 Montage électrique.....	77
III.6.2 Réalisation du la serre agricole	79
III.7 Présentation des résultats	79
III.7.1 Résultats du contrôle de la température.....	79
III.7.2 Résultats du contrôle de l'humidité du sol	81
III.7.3 Résultats du contrôle et de la surveillance à distance	82
III.8 Conclusion	85
Références bibliographiques	
Annexes	
Résumé	

المخلص
Abstract

Liste des tableaux

Tableau II-1 spécifications techniques du capteur DHT22. [50].....	29
Tableau II-2 Caractéristiques du capteur d'humidité du sol.....	32
Tableau II-3 Caractéristiques techniques de la mini-pompe à eau submersible de type DC.	35
Tableau II-4 Caractéristiques techniques des ventilateurs.	37
Tableau II-5 Caractéristiques techniques du module relais 4 canaux.	38
Tableau II-6 Caractéristiques techniques de la batterie.....	39
Tableau III-1 Liste des composants simulés dans Proteus.	48
Tableau III-2 Connexions des composants au microcontrôleur Arduino UNO.....	49
Tableau III-3 Types de données utilisés dans le code Arduino.....	55
Tableau III-4 Synthèse des actions du système en fonction des seuils mesurés.....	56
Tableau III-5 Conversion des valeurs brutes de l'ADC de l'ESP32 en pourcentage d'humidité du sol.	65

Liste des figures

Figure I-1 Système hydroponique simple pour plantes d'intérieur [2].	3
Figure I-2 Jardins Suspendus de Babylone [9].	5
Figure I-3 Plages de pH en culture hydroponique.	6
Figure I-4 Les 16 éléments minéraux essentiels à la nutrition des plantes, utilisés en hydroponie [26].	8
Figure I-5 Les différents types des substrats [28].	8
Figure I-6 Illustration d'un système hydroponique en boucle ouverte.	10
Figure I-7 Illustration d'un système hydroponique en boucle fermée.	11
Figure I-8 Modèle illustratif de la technique du film nutritif (NFT) [32].	11
Figure I-9 Modèle illustratif d'un système aéroponie.	12
Figure I-10 Modèle illustratif d'un système aquaponie [32].	13
Figure I-11 Modèle illustratif d'un système hydroponique en culture profonde (DWC) [32].	14
Figure I-12 Modèle illustratif d'un système DFT avec des panneaux flottants [34].	15
Figure I-13 Schéma explicatif du fonctionnement de la méthode Kratky [38].	16
Figure I-14 Vue simplifiée du système à mèches.	17
Figure I-15 Modèle illustratif du système à marées [32].	18
Figure I-16 Exemple de montage en système goutte à goutte [32].	19
Figure II-1 Architecture générale d'un microcontrôleur.	25
Figure II-2 Le microcontrôleur ESP32-WROOM-32.	26
Figure II-3 Capteur de température et d'humidité de l'air DHT22.	28
Figure II-4 Capteur d'humidité du sol.	31
Figure II-5 Symboles normalisés des pompes hydrauliques.	33
Figure II-6 Mini pompe à eau submersible de type DC.	34
Figure II-7 Ventilateur.	36
Figure II-8 Extracteur.	36
Figure II-9 Relais à 4 canaux.	37
Figure II-10 Batterie 12 V.	39
Figure II-11 Schéma de principe du fonctionnement d'une alimentation à découpage.	40
Figure II-12 Convertisseur AC/DC à découpage (SMPS).	40
Figure II-13 La breadboard.	41

Figure II-14 Outils logiciels utilisés dans le développement du système automatisé.	42
Figure III-1 simulation initiale sous Arduino IDE et Proteus.	47
Figure III-2 Installation de la carte Arduino.....	51
Figure III-3 Installation de la bibliothèque du DHT 22.	51
Figure III-4 Installation de la bibliothèque LCD.	51
Figure III-5 Les étapes pour choisir la carte et le port.	52
Figure III-6 Configuration des préférences de l'IDE Arduino.....	52
Figure III-7 Vérification et compilation du code dans l'IDE Arduino avant téléversement.	53
Figure III-8 Étapes de téléversement du code vers la carte Arduino.	53
Figure III-9 L'organigramme du fonctionnement du système.	57
Figure III-10 Activation du ventilateur 1 et ventilateur 2 ($T \geq 32^{\circ}\text{C}$).....	57
Figure III-11 Simulation sous Proteus en dehors des conditions climatiques optimales	59
Figure III-12 Simulation sous Proteus dans des conditions climatiques optimales.....	60
Figure III-13 Activation de la pompe (humidité du sol $<30\%$).	61
Figure III-14 Les bibliothèques nécessaires à installer dans Arduino IDE.	63
Figure III-15 Les étapes de choisir la carte et le port.	63
Figure III-16 Le schéma de câblage complet du système basé sur le microcontrôleur ESP32.....	66
Figure III-17 Schéma électrique du système automatisé de gestion climatique et d'irrigation.	67
Figure III-18 Interface de création de compte sur Blynk.	68
Figure III-19 Création d'un nouveau Template.	69
Figure III-20 Les étapes pour créer un nouvel appareil (Device).....	70
Figure III-21 Les étapes pour définir un flux de données (datastream).....	71
Figure III-22 Insertion du Auth Token, du SSID et du mot de passe Wi-Fi dans le code....	72
Figure III-23 Insertion des widgets.....	73
Figure III-24 Configuration des widgets Blynk liés aux DataStreams et sauvegarde du tableau de bord.....	74
Figure III-25 Interface Web Dashboard complète configurée sur Blynk.	75
Figure III-26 L'installation de l'application Blynk IoT.	76
Figure III-27 Accès au projet via l'application mobile.....	76
Figure III-28 Interface du projet via l'application Blynk IoT.	77
Figure III-29 Réalisation réelle de la partie électrique.	78

Figure III-30 Serre agricole réalisée.	79
Figure III-31 Affichage des données dans des conditions climatiques optimales.	80
Figure III-32 Humidité du sol inférieure au seuil minimal.	81
Figure III-33 Humidité du sol au seuil optimal.	82
Figure III-34 Variation de l'humidité du sol avec seuils de commande de la pompe.	82
Figure III-35 Interface d'affichage des valeurs en temps réel sur le téléphone en mode automatique.	83
Figure III-36 Contrôle manuel depuis l'application mobile (mode manuel).	83
Figure III-37 Interface d'affichage des valeurs en temps réel sur l'ordinateur (mode automatique).	84
Figure III-38 Contrôle manuel du système depuis l'interface PC (mode manuel).	84

Liste des abréviations

1N: One Junction (norme de diode).

2N: Two Junctions (norme de transistor).

ADC: Analog to Digital Converter.

BLE: Bluetooth Low Energy.

CAN: Controller Area Network.

CPU: Central Processing Unit.

DAC: Digital to Analog Converter.

DC: Courant Continu.

DFT: Deep Flow Technique.

DHT22: Digital Humidity and Temperature, modèle 22.

DLI: Daily Light Integral.

DWC: Deep Water Culture.

EC: Electrical Conductivity.

ENSA: École Nationale Supérieure Agronomique.

ESP32: Espressif Systems 32-bit.

GND: Ground (Masse).

GPIO: General Purpose Input/Output.

HF: Haute Fréquence.

HIGH: High Level Signal (niveau logique haut).

HR: Humidité Relative.

IDE: Integrated Development Environment.

INRA: Institut National de la Recherche Agronomique (Algérie).

IP67: Indice de Protection 67 (poussière + immersion temporaire).

ITCMI: Institut Technique des Cultures Maraîchères Industrielles.

IoT: Internet of Things.

I²C: Inter-Integrated Circuit.

LED: Light Emitting Diode.

LCD: Liquid Crystal Display.

LM: Linear Monolithic.

LOW: Low Level Signal (niveau logique bas).

N: Valeur numérique (issue de la conversion ADC).

NASA: National Aeronautics and Space Administration.

NFT: Nutrient Film Technique.

NO: Normally Open.

PC: Photocoupler.

PSRAM: Pseudo Static RAM.

PVC: Polychlorure de Vinyle.

PWM: Pulse Width Modulation.

RAM: Random Access Memory.

RISC-V: Architecture de processeur libre.

RL: Relay.

ROM: Read Only Memory.

RTC: Real Time Clock.

RV: Resistor Variable.

SDIO: Secure Digital Input Output.

SMPS: Switched Mode Power Supply.

SPI: Serial Peripheral Interface.

T: Température.

UART: Universal Asynchronous Receiver Transmitter.

UNO: Uno (nom donné à la carte Arduino UNO).

URSS: Union des Républiques Socialistes Soviétiques.

USB: Universal Serial Bus.

V: Volt.

V_{AC}: Tension Alternative.

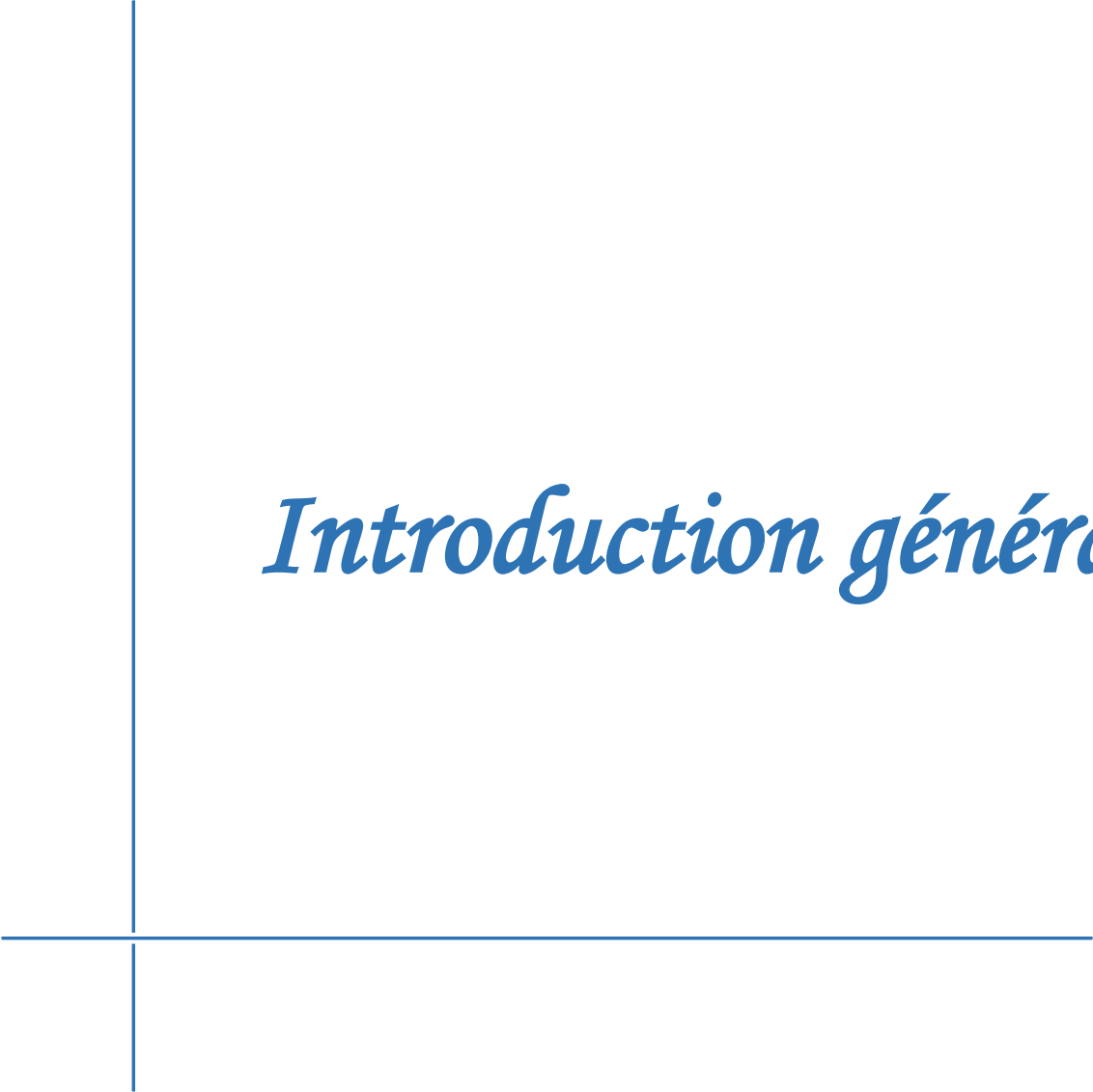
V_{CC}: Voltage Common Collector (Alimentation positive).

V_{ref}: Voltage Reference.

Web: World Wide Web.

iOS: iPhone Operating System.

pH: Potentiel Hydrogène.



Introduction générale

Introduction générale

Face aux enjeux croissants liés à la sécurité alimentaire, à la raréfaction des terres cultivables et à la gestion durable des ressources, l'agriculture se trouve à un tournant technologique majeur. Parmi les alternatives émergentes, la culture hydroponique offre une réponse concrète en permettant la production végétale hors sol, avec une économie significative d'eau et une maîtrise fine des conditions de croissance. Son intégration dans des structures compactes et modulaires, notamment en milieu urbain, en fait un levier stratégique pour l'agriculture de demain.

Dans ce contexte, notre projet s'inscrit dans une double démarche : académique, d'une part, à travers la conception et la réalisation d'un système hydroponique vertical automatisé répondant aux exigences d'un mémoire de fin d'études en électromécanique ; entrepreneuriale, d'autre part, en posant les bases d'un concept reproductible dans le cadre d'une start-up technologique axée sur l'agriculture intelligente.

Le système développé vise à automatiser la gestion des paramètres clés tels que la température, l'humidité, l'irrigation et la nutrition des plantes, à l'aide de capteurs, d'actionneurs, d'une unité de contrôle embarquée (ESP32), et d'une interface mobile conviviale. La verticalité du dispositif permet un gain d'espace et une optimisation du rendement sur de petites surfaces, tout en réduisant l'intervention humaine.

Ce mémoire présente dans un premier temps les fondements scientifiques et techniques de l'hydroponie, puis détaille l'étude, la conception et la mise en œuvre du système automatisé. Il expose ensuite les résultats expérimentaux obtenus et les perspectives d'évolution, tant sur le plan technique que sur le plan du développement commercial du projet

Chapitre I

État de l'art de l'hydroponie

I.1 Introduction à l'agriculture hydroponique

Le sol constitue généralement le principal milieu de croissance des plantes, leur fournissant les nutriments essentiels, l'air et l'eau. Toutefois, il peut parfois représenter un obstacle au bon développement des cultures en raison de certaines contraintes, telles que la salinité, la pollution ou la pauvreté en éléments nutritifs. Face à ces défis, il devient essentiel d'adopter des méthodes agricoles innovantes. La culture hors sol, et plus particulièrement l'agriculture hydroponique, apparaît alors comme une solution idéale pour surmonter ces limitations.

Ce chapitre présente les fondements de la culture hydroponique, notamment ses principes, ses différents types, ses avantages, ainsi que son développement en Algérie et dans le monde. Une comparaison avec l'agriculture conventionnelle y est également proposée, en termes d'avantages, de limites et d'exigences.

I.2 Présentation du concept d'hydroponie

L'hydroponie désigne une méthode de culture hors-sol où les plantes se développent sans terre naturelle, parfois sur des substrats inertes, grâce à des solutions aqueuses enrichies en nutriments minéraux. Étymologiquement, le terme provient du grec *hudor* (eau) et *ponos* (travail) soulignant le rôle fondamental de l'eau dans l'alimentation des plantes. Cette technique scientifique s'appuie sur des principes de physiologie végétale, de chimie et d'agronomie pour optimiser la croissance, les rendements et le contrôle phytosanitaire. Adaptée aux environnements aux ressources limitées en sol ou en eau, ou aux espaces restreints, elle permet une gestion précise des apports nutritifs et une réduction des pathogènes telluriques. L'hydroponie incarne ainsi une approche innovante et efficiente de l'agriculture, dont la maîtrise technique varie selon l'échelle de production (domestique ou commerciale) [1].



Figure I-1 Système hydroponique simple pour plantes d'intérieur [2].

I.3 Historique et évolution de l'hydroponie

La culture hydroponique, bien qu'associée aux technologies modernes, trouve ses racines dans l'Antiquité et s'est développée par étapes scientifiques et techniques majeures :

➤ Origines anciennes :

Pratiques similaires à l'hydroponie observées dans les jardins suspendus de Babylone, les chinampas aztèques au Mexique, et mentionnées dans des textes chinois et égyptiens.

➤ 1600 - Jan Van Helmont (Belgique) :

Première expérience sur la croissance végétale à partir de l'eau seule, amorçant la réflexion sur la nutrition des plantes.

➤ 1699 - John Woodward (Angleterre) :

Cultive des plantes en solutions aqueuses ; montre que l'eau naturelle (de source ou de rivière) favorise mieux la croissance que l'eau distillée.

➤ 1860 - Julius von Sachs & Wilhelm Knop (Allemagne) :

Élaboration des premières solutions nutritives composées d'eau et de sels minéraux. Base scientifique des cultures hors-sol.

➤ 1929 - William Frederick Gericke (Université de Californie, USA) :

Popularise l'usage de la culture hydroponique pour la production de légumes, notamment les tomates [3].

- 1938 - Dennis R. Hoagland & Daniel I. Arnon (USA) :

Développent les solutions nutritives standards toujours utilisées, appelées solutions Hoagland [4].

- 1945 - Projet militaire américain au Japon :

Mise en place d'une ferme hydroponique de 22 ha pour l'approvisionnement en légumes frais des troupes américaines à Tokyo [5].

- Années 1950 - Diffusion mondiale :

Introduction de l'hydroponie en Europe (Italie, Espagne, France, Allemagne, Royaume-Uni, Suède), dans l'URSS, et en Palestine, souvent sur petites surfaces pour répondre à des défis agronomiques [6].

- 1960 - Allen Cooper (UK) :

Invention de la Nutrient Film Technique (NFT), où un film mince de solution nutritive circule sur les racines, améliorant oxygénation et absorption [7].

- Années 1970 - Recherches de la NASA (USA) :

Développement de l'aéroponie, méthode suspendant les racines dans l'air et les alimentant par pulvérisation. Conçue pour les missions spatiales [8].



Figure I-2 Jardins Suspendus de Babylone [9].

I.4 Culture hydroponique dans le monde et en Algérie

I.4.1 Dans le monde

En Europe, la culture hors sol sous serre est principalement concentrée dans quatre pays : les Pays-Bas, qui disposent des plus grandes superficies, suivis par la France, la Belgique et le Royaume-Uni. On la retrouve également en Suisse et dans certains pays d'Europe de l'Est. En dehors de l'Europe, les plus grandes surfaces dédiées à ce type de culture se trouvent au Japon et en Afrique du Sud [10].

I.4.2 En Algérie

Parmi les recherches notables, on retrouve celles de Habbas à Biskra [11], Belbachir à Tlemcen [12], ainsi que Kasmi et Tayar à El Oued [13]. Malgré le fort potentiel que possède l'Algérie en matière de culture hydroponique, cette dernière demeure peu développée. Plusieurs études ont été menées, notamment à l'INRA (culture de laitue en hydroponie en 2017), à l'ENSA et à l'ITCMI de Mostaganem [14], mais elles n'ont pas été concrètement appliquées sur le terrain. La première expérience de culture hors sol en Algérie remonte à Béni-Abbès, réalisée par Chouard et Renaud [15], visant à valoriser les substrats sableux locaux [16].

I.5 Principes fondamentaux et exigences clés de la culture hydroponique

La culture hydroponique s'appuie sur des bases scientifiques de physiologie végétale stimulant la croissance des plantes en milieu non terrestre, grâce à l'utilisation d'un liquide concentré en sels minéraux indispensables. Différemment des méthodes culturales classiques, nécessitant un sol fertile afin d'alimenter la croissance végétale, cette technique garantit une administration optimale des paramètres édaphiques (H_2O , O_2 , éléments minéraux) au contact immédiat du système racinaire [17]. Son fonctionnement repose principalement sur cinq processus essentiels :

I.5.1 Exigences physico-chimiques

➤ Eau

◆ Potentiel hydrogène pH :

La plage optimale de pH pour une solution nutritive en culture hors-sol se situe généralement entre 5,8 et 6,5. Un écart significatif par rapport à cette plage peut compromettre l'absorption des nutriments et ainsi nuire au développement des plantes. Il est important de noter que chaque espèce cultivée possède une exigence spécifique en matière de pH. Par exemple, la culture de la tomate tolère une plage de pH allant de 6 à 6,5 [18].

◆ Conductivité électrique (EC) :

Indicateur de la concentration en sels nutritifs, avec une plage recommandée de 1,0 à 2,5 mS/cm [18]. Une CE excessive ($>2,5$ dS/m) accroît la pression osmotique, limitant l'absorption des nutriments, tandis qu'une CE trop faible ($<1,5$ dS/m) provoque des carences [19].



Figure I-3 Plages de pH en culture hydroponique.

◆ Température de l'eau :

Une température entre 18 et 22 °C favorise une bonne absorption des nutriments [20]. Au-delà de cette plage, la demande en oxygène augmente tandis que sa disponibilité dans la solution diminue, ce qui peut compromettre la santé racinaire [19].

➤ **Oxygénation optimale des racines**

L'oxygénation des racines, cruciale en hydroponie, requiert une concentration minimale de 5 mg/L d'O₂ dissous. Différentes méthodes permettent d'atteindre ce niveau ; l'aération passive grâce à un espace d'air, l'injection active via des pierres de diffusion, ou le remplacement fréquent de la solution nutritive [20].

I.5.2 Composition et équilibre des solutions nutritives

Une solution nutritive est un mélange d'eau et de sels minéraux dissous, formulé pour répondre aux besoins spécifiques des plantes. Son efficacité repose sur un équilibre précis entre les macroéléments (N, P, K, Ca, Mg, S) et les microéléments (Fe, Zn, Mn, Cu, B, Mo), ainsi que sur la stabilité des paramètres physico-chimiques tels que le pH, l'EC, l'oxygène dissous et la température [21]; [22].

Un ajustement dynamique de la concentration et des rapports entre nutriments, notamment le ratio azote/potassium (N/K), est essentiel pour s'adapter aux besoins de la plante à chaque phase de son développement [20]. En effet, la qualité et la productivité des cultures hydroponiques dépendent fortement de la disponibilité et de l'absorption des nutriments dans le milieu de culture [23]; [24].

Parmi les éléments reconnus comme essentiels, certains comme le carbone (C) et l'oxygène (O) proviennent de l'atmosphère, tandis que les autres sont absorbés via la solution nutritive. D'autres éléments comme le sodium, le silicium, le vanadium, le sélénium, le cobalt, l'aluminium et l'iode sont considérés comme bénéfiques [25].

Ces nutriments sont classés en deux groupes :

- **Sels minéraux majeurs** : N, P, K, Ca, Mg, S, Cl, Na.
- **Oligo-éléments** : Fe, Cu, Zn, Mn, Mo, Co, etc [12].

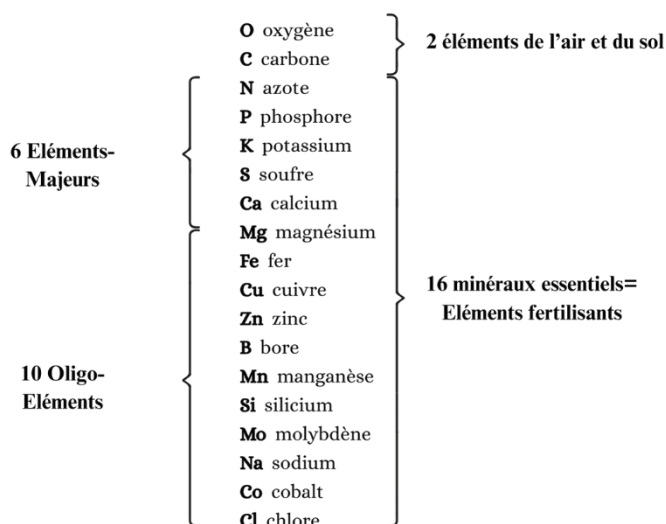


Figure I-4 Les 16 éléments minéraux essentiels à la nutrition des plantes, utilisés en hydroponie [26].

I.5.3 Les conteneurs et les supports racinaires

Selon Fevereau [27], le choix des récipients contenant le substrat dépend de l'espèce cultivée et de la nature de son système racinaire. En général, les conteneurs sont fabriqués en matière plastique, chimiquement inerte, étanche, durable, et doivent être faciles à installer.

Bien que l'hydroponie s'affranchisse du sol, un substrat de soutien est impératif pour l'ancrage des racines. Les matériaux privilégiés, tels que la perlite, la tourbe ou la laine de roche, se caractérisent par leur stabilité structurelle, leur porosité favorisant l'aération et le drainage, et leur résistance au compactage, assurant ainsi un environnement racinaire optimal [20].



Figure I-5 Les différents types des substrats [28].

I.5.4 La lumière

En culture intérieure, un éclairage artificiel adapté est souvent indispensable pour compenser l'absence de soleil. L'intensité et la durée d'éclairement dépendent des besoins spécifiques de chaque espèce et sont généralement exprimées en DLI (Daily Light Integral). En revanche, en culture sous serre ou à l'extérieur, la lumière naturelle peut suffire, à condition que l'ensoleillement soit adéquat et que sa durée quotidienne réponde aux exigences photopériodiques des plantes cultivées [20].

I.6 Catégories de systèmes hydroponiques

L'hydroponie regroupe divers systèmes, classés selon leur mécanisme (actif ou passif), l'utilisation éventuelle d'un substrat, ainsi que le mode de gestion de la solution nutritive.

I.6.1 Systèmes actifs et passifs

I.6.1.1 Système hydroponique actif

Les systèmes hydroponiques actifs (NFT, aéroponie, etc.) reposent sur une circulation mécanique de la solution nutritive, assurée par des pompes électriques, tandis qu'un dispositif de drainage par gravité permet la récupération et la réutilisation de l'excédent. Leur principal avantage réside dans leur rendement supérieur et leur compatibilité avec des serres automatisées, où des dispositifs de contrôle (minuteries, capteurs) assurent une distribution optimale des nutriments. Cette approche active permet un fonctionnement autonome prolongé (plusieurs semaines) grâce à une circulation motorisée constante, garantissant ainsi une meilleure disponibilité des éléments nutritifs pour les plantes tout en limitant les interventions humaines [29].

I.6.1.2 Système hydroponique passif

Les systèmes hydroponiques passifs fonctionnent sans dispositif mécanique (pompe, aérateur) ni apport énergétique externe. Les espèces chlorophylliennes assimilent leurs nutriments via deux transports physiques : un flux interstitiel ascendant (capillarité) et un écoulement gravitationnel descendant (gravité). Parmi les différents modèles passifs de culture hydroponique, le système à mèche (Wick System) et la méthode de culture sur substrat (Karatky Method).

I.6.2 Systèmes avec ou sans substrat

I.6.2.1 Système hydroponique avec substrat

Le système hydroponique avec support physique utilise un matériau inerte (billes d'argile, fibre de coco, etc.) pour ancrer les racines, tandis que l'alimentation est assurée par une solution nutritive apportée via un système d'irrigation. Ce support garantit drainage et aération racinaire optimaux.

I.6.2.2 Système hydroponique sans substrat

L'hydroponie sans substrat est une technique culturale où les plantes croissent exclusivement dans une solution nutritive aqueuse, leur support physique se limitant à des systèmes de fixation spécifiques (paniers ou filets) [30].

I.6.3 Systèmes à boucle ouverte et boucle fermée

En hydroponie, les systèmes peuvent également être classés selon la gestion de la solution nutritive :

I.6.3.1 Systèmes à boucles ouvertes (open cycle)

La solution nutritive n'est pas récupérée après drainage.

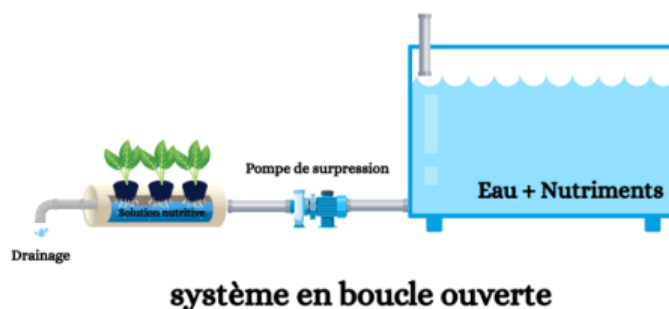


Figure I-6 Illustration d'un système hydroponique en boucle ouverte.

I.6.3.2 Systèmes à boucles fermées (closed loop)

La solution nutritive est récupérée, filtrée et réutilisée.

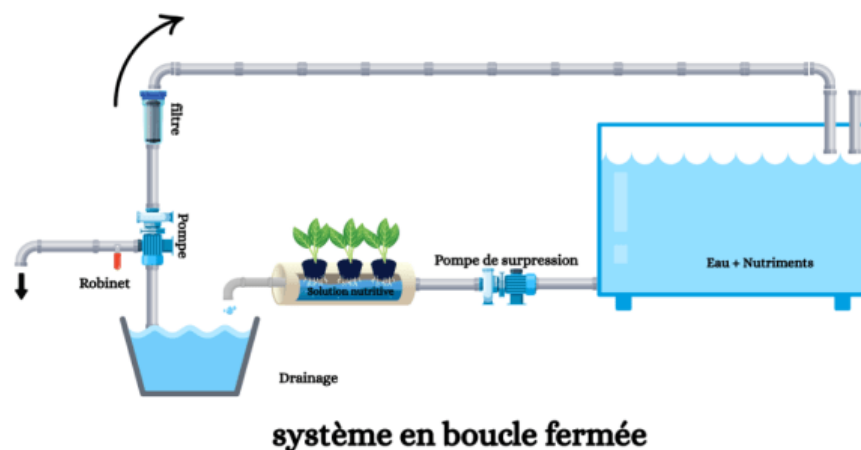


Figure I-7 Illustration d'un système hydroponique en boucle fermée.

I.7 Types de systèmes hydroponiques

I.7.1 Technique du film nutritif (NFT)

La méthode du film nutritif (NFT) est un système hydroponique actif repose sur une conception de gouttières ou de tubes inclinés, souvent en PVC, favorisant l'écoulement gravitaire d'une solution nutritive mise en circulation continue par une pompe. Ce dispositif engendre un flux pelliculaire nutritif au fond des canaux, assurant l'absorption des éléments essentiels par les extrémités racinaires sans saturer le milieu. Simultanément, l'exposition aérienne de la partie supérieure des racines garantit une oxygénation adéquate, un paramètre technique crucial pour l'efficacité métabolique et la croissance des plantes cultivées hors-sol [31].

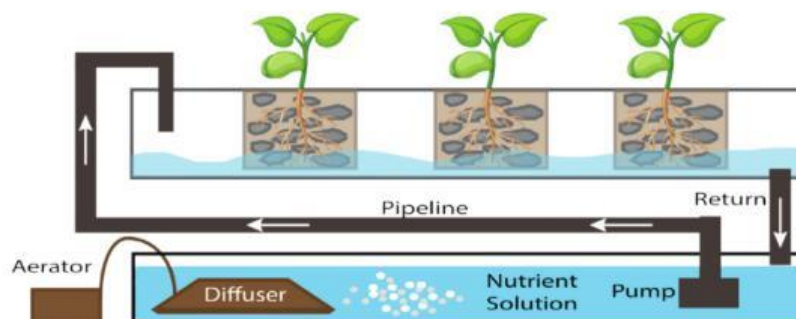


Figure I-8 Modèle illustratif de la technique du film nutritif (NFT) [32].

➤ Avantages :

- Économie nutritive et oxygénation optimale.
- Idéal pour les plantes légères.

➤ Inconvénients :

- Forte dépendance au système de pompage.
- Sensibilité aux blocages.

I.7.2 Aéroponie

L'aéroponie est une technique hydroponique avancée, classée parmi les systèmes actifs. Elle permet aux plantes de croître sans substrat grâce à la pulvérisation ciblée d'une solution nutritive sur leurs racines suspendues [33].

Principalement utilisée pour les espèces horticoles de petite taille, cette technique repose sur des caissons fermés munis de panneaux en plastique ou en polystyrène, horizontaux ou inclinés, soutenus par une structure composée de matériaux inertes tels que le PVC, le polystyrène expansé ou d'autres matériaux synthétiques non réactifs [34].

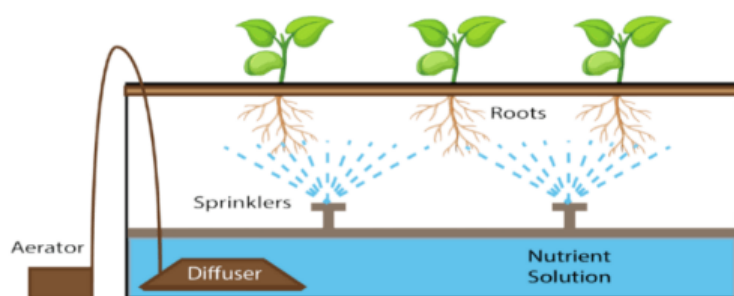


Figure I-9 Modèle illustratif d'un système aéroponie.

[32].

❖ Avantages :

- Croissance rapide et rendement élevé.
- Optimisation de l'utilisation de l'eau.

❖ Inconvénients :

- Investissement initial et maintenance élevés.
- Vulnérabilité aux pannes.

I.7.3 Aquaponie

L'aquaponie, une approche novatrice de culture, s'inspire des écosystèmes naturels en exploitant les rejets nutritifs issus de l'élevage piscicole (excréments de poissons, algues, nourriture non consommée). Ces éléments organiques enrichissent l'eau, servant de source nutritive pour les plantes cultivées en hydroponie. En retour, les végétaux agissent comme des filtres biologiques, purifiant l'eau chargée en déchets, qui est ensuite recyclée et réintroduite dans les bassins piscicoles. L'aquaponie constitue ainsi une symbiose ingénieuse, intégrant la production végétale et l'élevage de poissons au sein d'un même système [35].

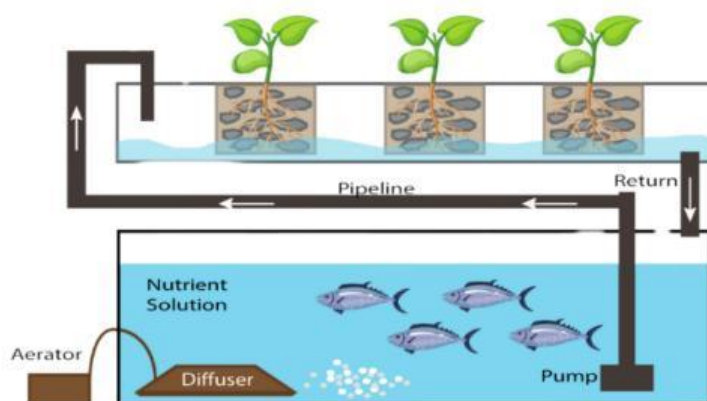


Figure I-10 Modèle illustratif d'un système aquaponie [32].

➤ Avantages :

- Approche durable et écologique.
- Recyclage naturel des nutriments.

➤ Inconvénients :

- Équilibre biologique délicat.
- Exige des compétences spécifiques.

I.7.4 Culture en eau profonde (Deep Water Culture DWC)

Le système Deep Water Culture (DWC) consiste à immerger totalement les racines des plantes dans une solution nutritive stagnante mais continuellement oxygénée grâce à une pompe à air. Les plantes, généralement installées dans des pots filet sur des radeaux flottants, bénéficient d'un accès constant à l'eau, aux nutriments et à l'oxygène, favorisant une croissance rapide. Ce système actif, simple à mettre en œuvre et sans substrat massif, est particulièrement adapté aux légumes-feuilles.

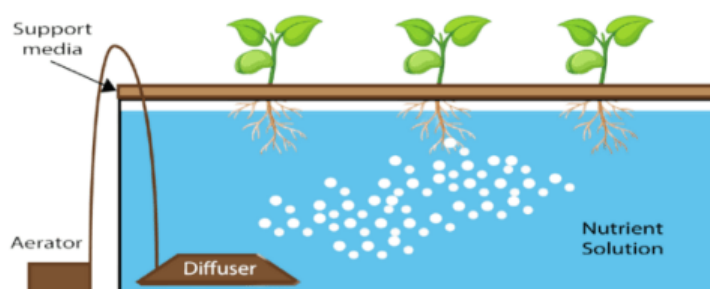


Figure I-11 Modèle illustratif d'un système hydroponique en culture profonde (DWC) [32].

➤ Avantages :

- Croissance rapide.
- Installation simple.

➤ Inconvénients :

- Risque d'asphyxie racinaire.
- Dépendance continue à l'alimentation électrique.

I.7.5 Technique à flux profond (Deep flow technique DFT)

La Deep Flow Technique (DFT) est un système hydroponique actif dans lequel les racines des plantes, soutenues par des radeaux flottants, baignent dans un film nutritif en circulation continue, plus épais que celui du système NFT, avec une profondeur d'eau généralement comprise entre 10 et 30 cm [36]. Une pompe assure le déplacement de la solution nutritive, tandis qu'un niveau d'oxygène dissous minimal de 4–5 mg/L est

maintenu, notamment par circulation active ou effet Venturi, pour éviter le stress racinaire, surtout au-delà de 23 °C [34]. Moins profond que le DWC, ce système permet une meilleure circulation, mais présente un risque en cas de panne de pompe, ce qui le rend légèrement plus complexe à gérer.

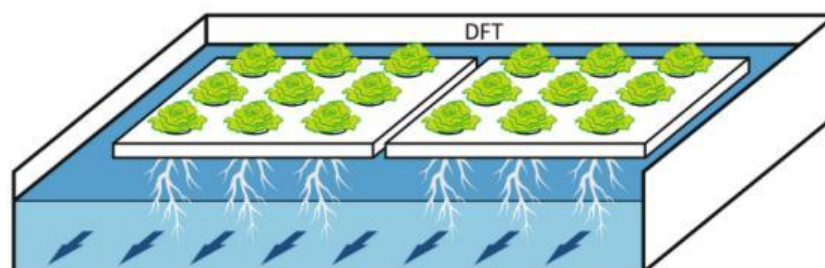


Figure I-12 Modèle illustratif d'un système DFT avec des panneaux flottants [34].

➤ Avantages :

- Facile à mettre en œuvre.
- Bonne régulation du pH et de la température.

➤ Inconvénients :

- Oxygénation critique à surveiller.
- Risque de stagnation hydrique.

I.7.6 La méthode Kratky (The Kratky method)

La méthode Kratky, développée par le Dr. Bernard A. Kratky (Université d'Hawaï), révolutionne l'hydroponie par son approche passive. Ce système utilise un simple réservoir contenant une solution nutritive que les plantes absorbent progressivement, créant naturellement une zone d'oxygénation pour les racines. Il est entièrement autonome, ne nécessitant ni énergie ni mécanisme complexe, se révèle particulièrement efficace pour cultiver des espèces végétales à croissance rapide comme la laitue, les épinards ou les herbes aromatiques [37].

Le système Kratky peut être considéré comme une variante du Deep Water Culture, mais sans utilisation de pompe [38].

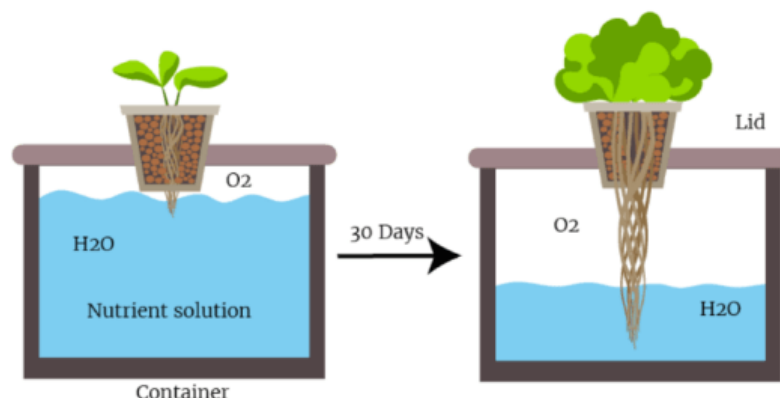


Figure I-13 Schéma explicatif du fonctionnement de la méthode Kratky [38].

➤ Avantages :

- Faible coût et simplicité.
- Excellent rendement pour les légumes-feuilles.

➤ Inconvénients :

- Absence d'ajustement après installation.
- Sensibilité au pH et à la formulation nutritive.

I.7.7 Système à mèches (Wick System)

Ce système repose sur un mécanisme de transfert capillaire assuré par des mèches en matériaux poreux. Ces dernières peuvent être constituées soit de fibres naturelles (coton, laine), soit de fibres synthétiques (polyester, nylon, rayonne), cette dernière catégorie offrant une meilleure longévité [29]. Dans la plupart des configurations standards, le dispositif intègre un réseau de mèches interconnectées permettant d'assurer une distribution uniforme de l'eau et des nutriments aux racines. L'efficacité du système atteint son optimum lorsque le substrat est placé à faible hauteur au-dessus du réservoir, une configuration qui améliore le transfert hydrique tout en minimisant les dépenses énergétiques [39].

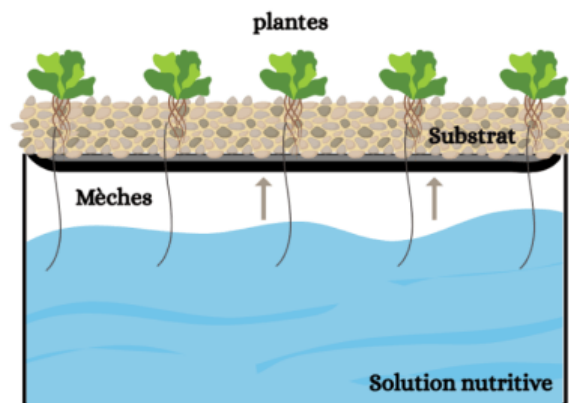


Figure I-14 Vue simplifiée du système à mèches.

- Avantages :
 - Simplicité de construction et d'entretien.
 - Autonomie énergétique.
- Inconvénients :
 - Débit nutritif lent.
 - Accumulation de sels minéraux.

I.7.8 Système à marées (Ebb and Flow)

Cette technique horticole irrigue les racines des plantes par immersion cyclique dans une solution nutritive, suivie d'un drainage vers un réservoir. L'alternance de ces phases assure un apport optimisé en nutriments et en oxygène à la zone racinaire [40].

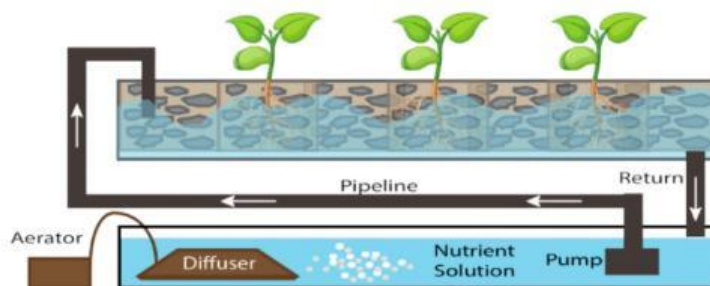


Figure I-15 Modèle illustratif du système à marées [32].

- Avantages :
 - Alternance hydratation/aération optimale.
 - Polyvalence des substrats et des plantes.
- Inconvénients :
 - Gestion régulière nécessaire.
 - Risque d'accumulation de sels.

I.7.9 Système goutte-à-goutte (Drip irrigation system)

Dans un système hydroponique goutte à goutte, le réservoir d'eau est positionné directement sous le plateau de culture. Des conduits acheminent l'eau du réservoir jusqu'aux plantes, chaque plant étant hydraté via un orifice percé dans les tuyaux. Le placement stratégique du réservoir sous le plateau permet la récupération et la réutilisation de l'eau de drainage [41].

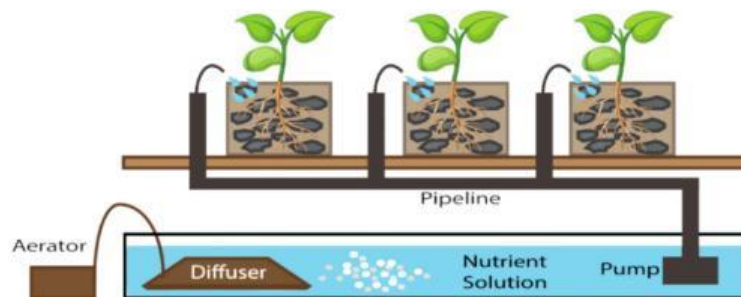


Figure I-16 Exemple de montage en système goutte à goutte [32].

➤ Avantages :

- Apport ciblé et économie d'eau.
- Adapté à une grande variété de plantes.

➤ Inconvénients :

- Colmatage des émetteurs.
- Sensibilité aux variations de pression.

I.8 Comparaison entre agriculture conventionnelle et hydroponique

L'agriculture en sol représente la méthode traditionnelle, celle que l'on retrouve naturellement dans la nature. Dans ce cas, l'agriculteur a moins d'éléments à gérer, puisque le sol fait la majeure partie du travail. Les nutriments naturels aident à maintenir le niveau de pH des plantes. Les agriculteurs peuvent également ajouter au sol ces nutriments, jouant ainsi un rôle de tampon pour stabiliser ce pH.

À l'inverse, les systèmes de culture hors sol, comme l'agriculture verticale, n'utilisent pas du tout de sol. Ils utilisent de l'eau ou un milieu qui suspend les racines des plantes dans une solution liquide contenant un mélange équilibré de nutriments nécessaires à leur croissance. Cela permet un meilleur contrôle des nutriments, et la plante n'a pas besoin de rechercher des nutriments car ils lui sont fournis directement sous une forme hautement assimilable [42].

I.9 Bénéfices et limites de l'hydroponie

I.9.1 Pourquoi Choisir l'Hydroponie : Avantages et Atouts

- ✓ Production d'aliments sans résidus de pesticides ni contaminants organiques, avec une valeur nutritionnelle optimisée grâce à une nutrition contrôlée [43].
- ✓ Croissance végétale accélérée jusqu'à 20 % et rendements supérieurs de 20 à 25 % [33], avec une homogénéité accrue et une réduction des maladies liées au sol [44].
- ✓ Réduction de la consommation d'eau jusqu'à 90 %, suppression des besoins en fertilisants et optimisation de l'espace cultivé par des systèmes verticaux [45].
- ✓ Fonctionnelle en milieux urbains, arides ou non arables, avec une production continue, indépendante des saisons.
- ✓ Surveillance automatisée des paramètres (pH, EC, température), avec solutions nutritives prêtes à l'emploi et réduction de la main-d'œuvre nécessaire.
- ✓ Production locale réduisant les besoins en transport, contribuant à l'autonomie alimentaire des territoires [33].

I.9.2 Contraintes et défis associés à l'hydroponie

Malgré ses avantages considérables (productivité, écologie, contrôle), l'hydroponie rencontre des défis techniques, économiques et réglementaires lors de sa mise en œuvre et de son suivi, nécessitant une analyse approfondie.

- ✗ Exigence technique et surveillance stricte.
- ✗ Dépendance énergétique et vulnérabilité aux pannes et aux coupures.
- ✗ Investissement initial élevé.
- ✗ Défis sanitaires et reconnaissance biologique limitée [20].

Ces contraintes sont compensables par une automatisation poussée et des protocoles

stricts.

I.10 Conclusion

En définitive, l'hydroponie s'impose comme une alternative crédible à l'agriculture conventionnelle, face à la pression croissante sur les ressources naturelles et à l'urbanisation des espaces cultivables. Sa diversité de systèmes, fondée sur des principes scientifiques éprouvés, ainsi que ses performances agronomiques en font une solution en plein essor. Ce cadre théorique pose les fondations indispensables à la conception technique du système automatisé développée dans les chapitres suivants.

Chapitre II

*Étude technique et choix des
composants.*

II.1 Introduction

Ce chapitre s'inscrit dans une démarche de conception systémique, en détaillant les composants matériels et logiciels qui assurent le fonctionnement du système hydroponique automatisé. L'accent est mis sur le choix du microcontrôleur (ESP32), les capteurs (température, humidité, sol, etc.), les actionneurs (pompe, ventilateurs, relais), ainsi que sur les outils de développement utilisés pour la programmation, la simulation et le contrôle à distance. Cette étude permet de poser les bases techniques solides pour la mise en œuvre fonctionnelle du projet, tout en tenant compte des contraintes de fiabilité, de coût et d'efficacité énergétique.

II.2 Objectif du projet

Ce projet a pour objectif principal de concevoir et de mettre en œuvre un système hydroponique vertical automatisé, capable d'assurer la culture de plantes sans sol, avec une gestion intelligente de l'irrigation et de la ventilation. Il vise à :

- Optimiser la consommation d'eau grâce à un système d'irrigation goutte à goutte, qui délivre la quantité juste nécessaire à chaque plante.
- Maximiser l'utilisation de l'espace en adoptant une structure verticale, idéale pour les petites surfaces ou les milieux urbains.
- Améliorer les conditions de croissance (température, humidité, etc.) par une régulation automatique.
- Permettre le suivi et le contrôle du système à distance via une application mobile.
- Offrir une solution simple, économique et facilement reproductible à petite échelle.

L'enjeu est d'apporter une réponse concrète aux besoins d'une agriculture moderne, plus efficace, économe en ressources et adaptée aux contraintes actuelles (climat, urbanisation, etc.).

II.3 Justification du choix du système vertical semi-hydroponique

Le choix d'une structure verticale permet d'augmenter le nombre de plants cultivés sur une surface réduite, tout en favorisant une meilleure exposition à la lumière et une gestion simplifiée des flux d'eau.

Le recours à un système semi-hydroponique avec substrat (au lieu d'un système en solution nutritive seule) assure une meilleure rétention d'humidité et une stabilité accrue en cas de coupure d'alimentation. Ce choix est adapté aux environnements réels où les conditions peuvent être variables.

L'irrigation est assurée goutte à goutte, ce qui permet une précision dans l'apport en eau, réduit les pertes par évaporation, et diminue les risques de sur-irrigation.

Enfin, l'automatisation par microcontrôleur, capteurs et relais, avec retour d'information sur application mobile, permet de réduire l'intervention humaine et d'assurer une régulation constante des paramètres essentiels pour la croissance des plantes.

II.4 Composants clés du système hydroponique automatisé

II.4.1 Le microcontrôleur ESP32

II.4.1.1 Présentation générale d'un microcontrôleur

Un microcontrôleur est un circuit intégré très compact qui regroupe sur une seule puce un microprocesseur (ou CPU), de la mémoire (généralement une mémoire vive RAM pour stocker temporairement les données, et une mémoire morte ROM ou Flash pour conserver le programme de façon permanente), ainsi que plusieurs périphériques d'entrée/sortie (E/S) programmables. Ces périphériques peuvent inclure des ports numériques (GPIO), des convertisseurs analogique-numérique (ADC) et numérique-analogique (DAC), des minuteries (timers), et des interfaces de communication série comme UART, SPI ou I²C [46]. Cette intégration complète fait du microcontrôleur un composant idéal pour les systèmes embarqués, où il doit assurer un contrôle précis et autonome de tâches spécifiques. À la différence du microprocesseur, qui nécessite des composants externes pour assurer ces fonctions.

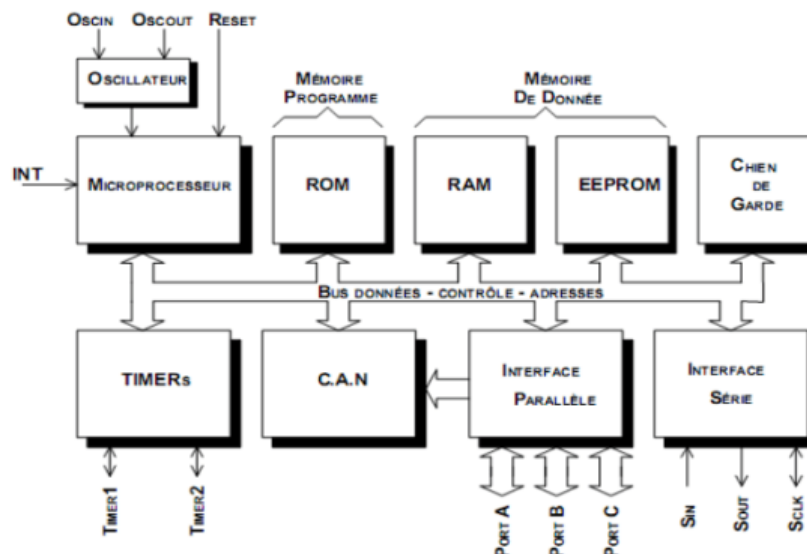


Figure II-1 Architecture générale d'un microcontrôleur.

II.4.1.2 Présentation de la famille ESP32

L'ESP32, c'est une série de petites puces électroniques (microcontrôleurs) fabriquées par Espressif Systems, spécialement conçues pour les objets connectés. Elles sont à la fois puissantes et ne consomment pas beaucoup d'énergie, ce qui les rend parfaites pour tous les projets d'Internet des Objets (IoT). Ce qui fait leur force, c'est leur capacité à faire des calculs rapides grâce à leur architecture optimisée, leur connectivité sans fil (Wi-Fi et Bluetooth intégrés), leur grande polyvalence pour brancher capteurs et autres composants, et tout ça, avec un excellent rapport qualité-prix.

II.4.1.3 Les principales variantes des microcontrôleurs ESP32

Les microcontrôleurs ESP32, selon Espressif Systems [47], sont disponibles en différentes séries pour s'adapter à une variété de besoins en termes de performance, de connectivité, de consommation d'énergie ou de compacité.

- **ESP32-WROOM** : Les variantes standard, polyvalentes, pour les projets généraux et la domotique.
- **ESP32-WROVER** : Se distinguent par une mémoire PSRAM étendue, idéales pour des applications gourmandes en mémoire (image, audio).
- **ESP32-S** : La nouvelle génération axée sur la sécurité, les performances et

l'IA embarquée.

- **ESP32-C** : Basées sur RISC-V, elles sont conçues pour des dispositifs connectés à faible coût et la domotique moderne.
- **ESP32-PICO** : Ultra-compactes, parfaites pour les objets portables et les designs miniaturisés.
- **ESP32-H** : Spécialisées dans les protocoles bas débit (Zigbee/Thread) pour les capteurs longue durée et la maison intelligente.
- **ESP32-A** : Dédiées aux applications audios avancées.

II.4.1.4 Caractéristiques techniques et architecture du ESP32-WROOM-32

Pour piloter notre système semi-hydroponique intelligent, nous avons choisi le module ESP32-WROOM-32 d'Espressif Systems. C'est un composant idéal car il est à la fois compact et puissant.

Ce module utilise un microcontrôleur ESP32 32 bits avec un double cœur Xtensa LX6. Cela signifie qu'il peut gérer plusieurs tâches en même temps de manière très efficace.

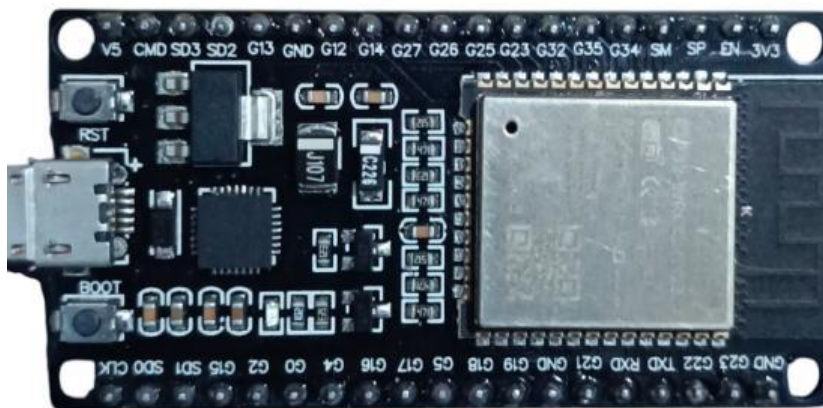


Figure II-2 Le microcontrôleur ESP32-WROOM-32.

Ses caractéristiques techniques principales sont les suivantes :

- **Mémoire** : Il intègre 448 Ko de ROM, 520 Ko de SRAM et 16 Ko de mémoire RTC. Il dispose aussi d'une mémoire Flash de 4 Mo et peut être étendu avec jusqu'à 16 Mo de Flash et 8 Mo de SRAM externes [48]

- **Connectivité sans fil** : Il est équipé du Wi-Fi 802.11 b/g/n et du Bluetooth 4.2, incluant les modes Classique (BR/EDR) et Low Energy (BLE) [49].
- **Interfaces multiples** : L'ESP32-WROOM-32 offre une grande variété de connexions pour interagir avec d'autres capteurs et actionneurs, comme l'UART, SPI, I²C, I²S, PWM, CAN, SDIO, ainsi que des convertisseurs ADC/DAC et la gestion des capteurs tactiles [49].
- **Alimentation** : Alimentation directe via USB (5V DC).
- **Faible consommation** : Il est économe en énergie, consommant environ 80 mA en utilisation normale.
- **Robustesse** : Son format ultra-compact (18 × 25,5 × 3,1 mm) et sa capacité à fonctionner dans une large plage de températures (de -40 °C à +85 °C) le rendent adapté aux environnements exigeants [49].

II.4.1.5 Justification du choix de l'ESP32

Le choix du module ESP32-WROOM-32 s'est appuyé sur les critères suivants :

- Son double cœur (240 MHz) gère sans problème les capteurs, les actionneurs, le Wi-Fi et le Bluetooth simultanément.
- Grâce à sa connectivité Wi-Fi et Bluetooth intégrée, il permet un pilotage et un suivi à distance, sans nécessiter de modules additionnels.
- Ses nombreuses entrées/sorties s'interfacent directement avec nos capteurs (DHT22, humidité du sol) et relais, assurant une excellente compatibilité.
- Fonctionnant en 3,3 V avec une faible consommation, il est idéal pour les systèmes autonomes.
- Sa compatibilité avec l'IDE Arduino et d'autres environnements simplifie grandement le développement et la maintenance.
- Son prix très accessible en fait un choix économique et performant pour notre projet.

II.4.2 Capteurs

Dans un système semi-hydroponique automatisée, les capteurs jouent un rôle fondamental en permettant de mesurer, surveiller et transmettre les paramètres environnementaux essentiels à la croissance des plantes. Nous avons intégré les capteurs suivants dans notre système : DHT22 et capteur d'humidité du sol.

II.4.2.1 Capteur de température et d'humidité de l'air DHT22

Le DHT22 est un capteur numérique actif qui mesure la température et l'humidité relative de l'air. Il envoie directement les valeurs de température et d'humidité sous forme de signal numérique. Pour le connecter, il dispose de trois broches essentielles : VCC pour l'alimentation électrique, GND pour la masse, et une broche DATA unique pour la transmission des données numériques. Il utilise un capteur capacitif pour l'humidité et une thermistance pour la température, et transmet ensuite ces lectures à un microcontrôleur, tel qu'un ESP32, via sa broche DATA.

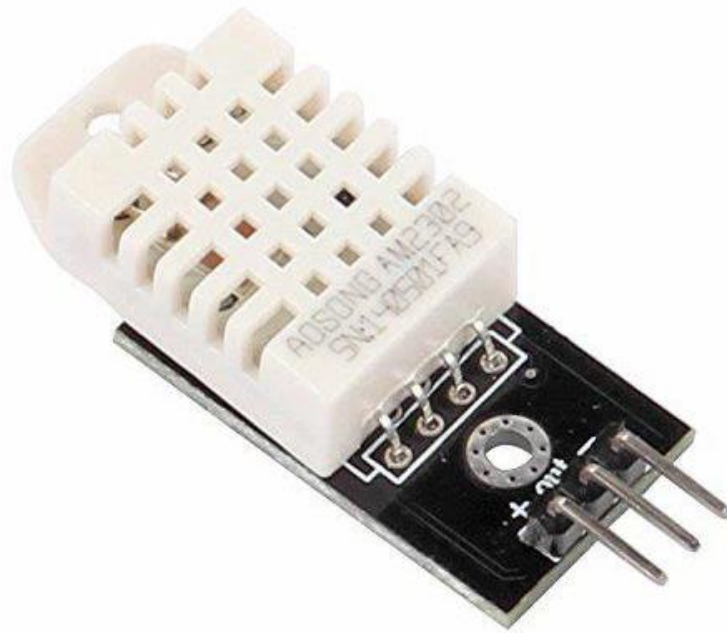


Figure II-3 Capteur de température et d'humidité de l'air DHT22.

II.4.2.1.1 Caractéristiques techniques du capteur DHT22

Tableau II-1 spécifications techniques du capteur DHT22. [50]

Caractéristique	Description
Tension d'alimentation	3,3 à 6 V DC
Type de signal de sortie	Signal numérique via un bus de données unique
Élément de détection	Capteur capacitif en polymère
Plage de fonctionnement	Humidité : 0 à 100 % HR ; Température : -40 à +80 °C
Précision	Humidité : ± 2 % HR (max. ± 5 % HR) ; Température : $\pm 0,5$ °C
Résolution (ou sensibilité)	Humidité : 0,1 % HR ; Température : 0,1 °C
Répétabilité	Humidité : ± 1 % HR ; Température : $\pm 0,2$ °C
Hystérésis d'humidité	$\pm 0,3$ % HR
Stabilité à long terme	$\pm 0,5$ % HR par an
Période de mesure (rafraîchissement)	Moyenne : 2 secondes
Interchangeabilité	Complètement interchangeable
Dimensions	Petit format : $14 \times 18 \times 5$ mm Grand format : $22 \times 28 \times 5$ mm

II.4.2.1.2 Fonctionnement du capteur DHT22

- Alimentation et Initialisation : Le capteur reçoit une tension de 3,3 à 6 V. Après mise sous tension, il s'initialise pendant environ 1 seconde avant d'être prêt.
- Déclenchement (Start Signal) : Le microcontrôleur (ex: ESP32) envoie une impulsion basse (>1 ms) sur la broche DATA pour débiter la communication.
- Réponse du Capteur : Le DHT22 réagit par une séquence de synchronisation : une impulsion basse de 80 μ s suivie d'une impulsion haute de 80 μ s, signalant sa disponibilité.
- Transmission des Données (40 bits) :
 - 16 bits pour l'humidité (partie entière et décimale).

- 16 bits pour la température (partie entière et décimale).
- 8 bits de checksum pour la vérification d'intégrité des données.
- Encodage des Bits : Chaque bit commence par une impulsion basse de 50 μ s. Un bit "0" est une impulsion haute de 26-28 μ s, tandis qu'un bit "1" est une impulsion haute de 70 μ s.
- Fin de Communication : Une fois les données transmises, le capteur se met en mode basse consommation, en attente d'une nouvelle requête.

II.4.2.1.3 Critère de choix du DHT22

Le choix du capteur DHT22 pour la surveillance climatique de la serre est justifié par ses atouts techniques majeurs :

- Le DHT22 offre une précision élevée ($\pm 0.5^{\circ}\text{C}$, $\pm 2\%$ HR) parfaite pour le contrôle climatique.
- Sa stabilité à long terme en fait un choix fiable pour les environnements agricoles.
- Compatible 3.3V/5V avec interface 1-Wire simple, il s'intègre facilement à l'ESP32.
- Économe en énergie (2.5mA), il préserve l'autonomie du système.
- Son boîtier robuste (IP67) résiste aux conditions humides.
- Il propose un excellent rapport qualité-prix.
- Les bibliothèques Arduino/ESP32 facilitent son implémentation.
- Solution idéale pour les projets hydroponiques nécessitant précision et simplicité.

II.4.2.2 Capteurs d'humidité du sol

Le capteur d'humidité du sol que nous utilisons est un dispositif de type électrochimique à sonde résistive de type YL-69, couplé à un module comparateur YL-38, ce dernier utilise un circuit intégré LM393, qui joue le rôle de comparateur de tension. Ce capteur fonctionne selon le principe de la conductivité électrique : deux électrodes sont

insérées dans le substrat, et la résistance mesurée entre elles varie selon la teneur en eau du sol. Plus le sol est humide, plus la conductivité augmente, et donc la résistance diminue. Le module YL-38 permet d'amplifier et de traiter le signal en fournissant à la fois une sortie analogique A0, utilisée pour une lecture continue de l'humidité, et une sortie numérique D0, qui indique si l'humidité a franchi un seuil fixé à l'aide d'un potentiomètre intégré.

Grâce à ces deux sorties, ce capteur est parfaitement compatible avec les microcontrôleurs tels que l'ESP32, l'Arduino et autres, permettant une intégration facile dans des systèmes automatisés.

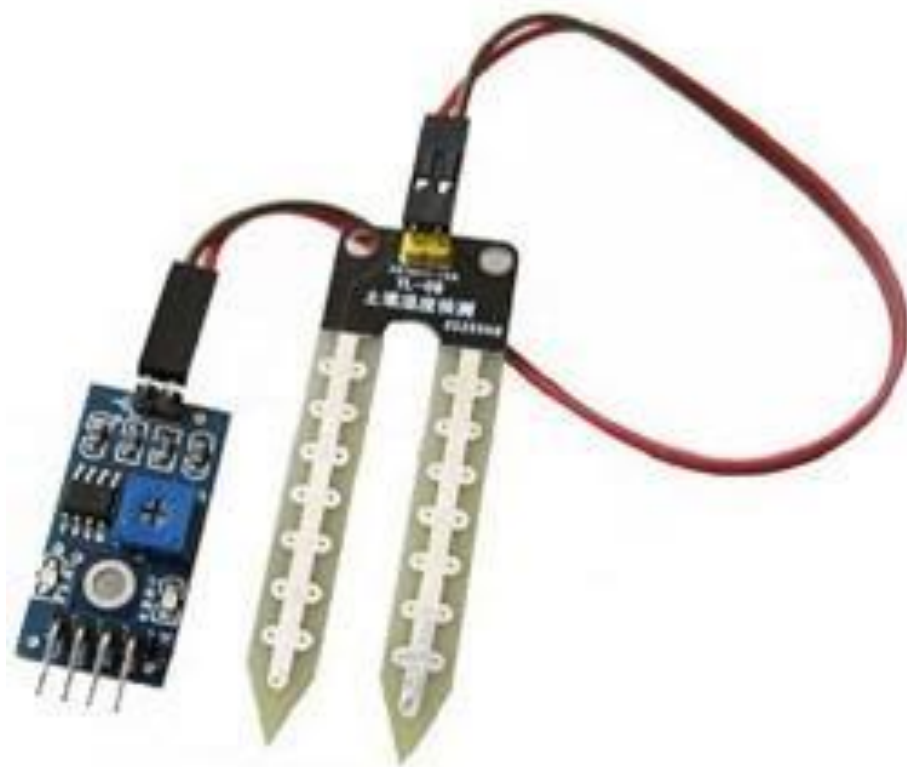


Figure II-4 Capteur d'humidité du sol.

II.4.2.2.1 Caractéristiques du capteur d'humidité du sol

Tableau II-2 Caractéristiques du capteur d'humidité du sol.

Caractéristique	Description
Tension de fonctionnement	3,3 V – 5 V DC
Consommation électrique	~15 mA
Type de capteur	Résistif
Comparateur intégré	LM393
Sortie analogique (A0)	0 - 5 V proportionnel à l'humidité
Sortie numérique (D0)	Niveau logique basé sur un seuil réglable
Facilité d'intégration	Format compact (3,2 cm x 1,4 cm) LEDs d'indication intégrée.
Avantages	• Faible coût • Simplicité d'utilisation • Double sortie (analogique et numérique) • Indication visuelle • Format compact
Inconvénients	• Durée de vie limitée • Moins fiable que les capteurs capacitifs • Fragilité mécanique

II.4.2.2.2 Critères de sélection

- Le capteur d'humidité du sol YL-69, couplé au comparateur LM393, fournit une lecture analogique proportionnelle à l'humidité du sol, avec une précision suffisante pour la gestion de l'irrigation goutte à goutte.
- Il offre un signal analogique pour une lecture continue et une sortie numérique pour un seuil configurable (grâce au LM393).

- Parfaitement compatible avec l'ESP32 (0 - 3.3V), ce capteur s'intègre aisément dans l'architecture du système.
- Sa consommation modérée de 15mA le rend adapté à un fonctionnement permanent sans surcharger l'alimentation.
- Économique et largement disponible.
- Le capteur se configure facilement grâce à son potentiomètre intégré et ses indicateurs LEDs, permettant une mise en service rapide sans équipement supplémentaire.
- Sa conception robuste et sa simplicité d'installation en font un choix technique pertinent pour des mesures fiables dans des environnements humides typiques des cultures hydroponiques.

II.4.3 Actionneurs

II.4.3.1 Gestion de l'irrigation par mini pompe submersible à eau

La pompe est un actionneur électromécanique qui convertit l'énergie électrique en énergie hydraulique. Cette conversion permet de mettre le fluide en mouvement ou d'augmenter sa pression dans une conduite ou un système fermé. Elle est largement utilisée dans diverses applications telles que l'irrigation agricole, les systèmes de distribution d'eau, le pompage domestique, ainsi que dans les installations industrielles nécessitant le transfert ou la mise sous pression de fluides.

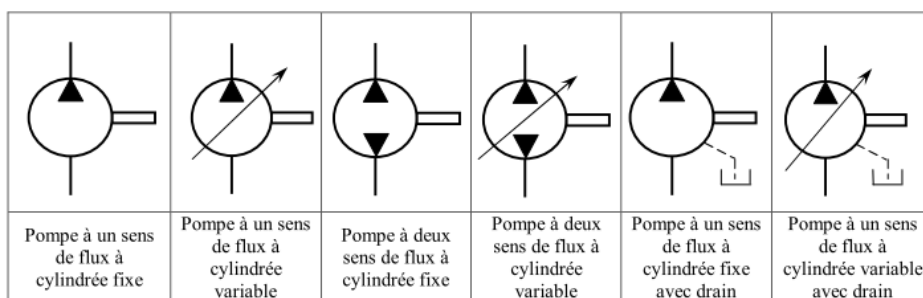


Figure II-5 Symboles normalisés des pompes hydrauliques.

Les pompes sont classées selon leur principe de fonctionnement en deux grandes catégories :

- Pompes centrifuges.
- Pompes volumétriques.

Nous avons opté pour l'utilisation d'une mini-pompe à eau submersible de type DC, conçue pour le transfert de fluides à faible débit. Son design compact permet une immersion directe dans les réservoirs, ce qui la rend particulièrement adaptée aux applications hydroponiques.

Cette pompe utilise un petit moteur à courant continu qui entraîne un rotor à palettes. Lorsque la tension est appliquée, la solution nutritive est aspirée puis refoulée grâce à la force centrifuge. Immergée dans le liquide, la pompe est naturellement refroidie, ce qui améliore sa durée de vie.



Figure II-6 Mini pompe à eau submersible de type DC.

II.4.3.1.1 Caractéristiques techniques de la mini-pompe à eau submersible de type DC

Tableau II-3 Caractéristiques techniques de la mini-pompe à eau submersible de type DC.

Caractéristique	Valeur typique
Tension d'alimentation	3-12V DC
Courant	100-200 mA
Débit	80-120 l/heure
Hauteur de refoulement	40-110cm
Puissance absorbée	0.3 à 2.4 W
Diamètre extérieur de la sortie d'eau	7.5 mm
Diamètre intérieur de la sortie d'eau	5 mm
Matériau	Plastique

II.4.3.2 Régulation climatique par ventilation et extraction d'air

La régulation de la température et de l'humidité de l'air à l'intérieur de la serre est essentielle pour le développement optimal des cultures hydroponiques. Pour assurer cette fonction, le système intègre un ventilateur et un extracteur. Afin de simplifier la conception et l'approvisionnement, deux ventilateurs Brushless DC identiques ont été choisis, l'un configuré pour fonctionner en brassage ou intraction, et l'autre en extraction de l'air.

Dans le cadre de ce prototype initial, la ventilation repose sur les deux ventilateurs Brushless DC configurés pour assurer l'intraction et l'extraction d'air. Toutefois, lors de la réalisation finale du système, un dispositif de refroidissement plus performant pourra être envisagé afin d'assurer une meilleure stabilité thermique dans des conditions réelles d'exploitation.



Figure II-7 Ventilateur.



Figure II-8 Extracteur.

II.4.3.2.1 Principe de fonctionnement

Ces ventilateurs sont des ventilateurs axiaux à courant continu (DC), utilisant un moteur "Brushless" (sans balais) pour générer un flux d'air. Le mouvement des pales crée une différence de pression qui force l'air à se déplacer.

- **Ventilateur** : Positionné pour introduire de l'air frais de l'extérieur (intraaction) ou pour brasser l'air à l'intérieur de la serre, favorisant l'homogénéisation de la température et de l'humidité.
- **Extracteur** : Orienté pour évacuer l'air chaud et humide de la serre vers l'extérieur. L'inversion de son "siège" (sens d'installation ou flux) par rapport au ventilateur permet de créer un différentiel de pression pour le renouvellement de l'air.

II.4.3.2.2 Caractéristiques techniques des ventilateurs

Tableau II-4 Caractéristiques techniques des ventilateurs.

Caractéristique	Description
Type	DC Brushless Fan
Tension nominale	12 V
Courant	0.14 A
Dimensions	120mm×120mm×25mm

II.4.3.3 Modules relais

Pour la commande des actionneurs, notamment la pompe à eau, le ventilateur et l'extracteur, un module relais à 4 canaux a été intégré au système. Ce composant est essentiel pour interfacer le microcontrôleur ESP32, qui fonctionne en basse tension et avec de faibles courants, avec des charges nécessitant des tensions et des courants plus élevés.



Figure II-9 Relais à 4 canaux.

Un relais est un interrupteur électromécanique. Il se compose principalement d'une bobine électromagnétique et de contacts. Lorsque la bobine est excitée par un courant (fourni par l'ESP32 dans notre cas), elle génère un champ magnétique qui attire une armature mobile, provoquant la fermeture ou l'ouverture des contacts. Cette isolation électrique

permet de contrôler des circuits de puissance (ex: circuit 12V pour le ventilateur et l'extracteur) avec un signal de commande de faible puissance (ex: 3.3V ou 5V de l'ESP32), protégeant ainsi le microcontrôleur. Chaque canal du module représente un relais indépendant, permettant de commander jusqu'à quatre dispositifs distincts dont 3 seront utilisés pour la pompe, le ventilateur et l'extracteur.

II.4.3.3.1 Caractéristiques techniques du module relais 4 canaux

Tableau II-5 Caractéristiques techniques du module relais 4 canaux.

Caractéristique	Description
Tension de commande (côté microcontrôleur)	3.3V ou 5V DC (compatible avec l'ESP32).
Tension de commutation maximale (côté charge)	Souvent AC 250V / DC 30V.
Courant de commutation maximal par canal	Typiquement 7A, 10A ou 15A. Ces valeurs doivent être supérieures au courant nominal des actionneurs connectés.
Nombre de canaux	4

II.4.4 Alimentation électrique

II.4.4.1 Batterie

Une batterie, ou plus précisément un accumulateur électrochimique, est un dispositif de stockage d'énergie permettant la conversion réversible de l'énergie chimique en énergie électrique. Elle est composée d'une ou plusieurs cellules électrochimiques, chacune constituée de trois éléments essentiels :

- Une anode (électrode négative).
- Une cathode (électrode positive).
- Un électrolyte, solution conductrice assurant le transport des ions entre les deux électrodes.

Dans le cadre de ce projet, le modèle utilisé est une batterie plomb-acide scellée de marque RAGGIE, référence 12V 2.2Ah (20HR). Ce type de batterie ne nécessite aucun entretien, ce qui la rend particulièrement adaptée aux applications embarquées ou autonomes.



Figure II-10 Batterie 12 V.

II.4.4.1.1 Les principales caractéristiques techniques sont les suivantes :

Tableau II-6 Caractéristiques techniques de la batterie.

Caractéristique	Description
Tension nominale	12 V
Capacité	2.2 Ah (sur 20 heures)
Tension de charge en usage cyclique	14.4 – 15.0 V
Tension de maintien en veille (standby)	13.5 – 13.8 V
Courant de charge initial recommandé	< 0.69 A

II.4.4.2 Convertisseur AC/DC à découpage (SMPS)

Pour l'alimentation électrique des principaux éléments du système (incluant l'ESP32, les capteurs et les relais), nous utilisons un convertisseur d'alimentation à découpage **SMPS** (Switched Mode Power Supply), plus précisément une alimentation AC-DC à découpage.

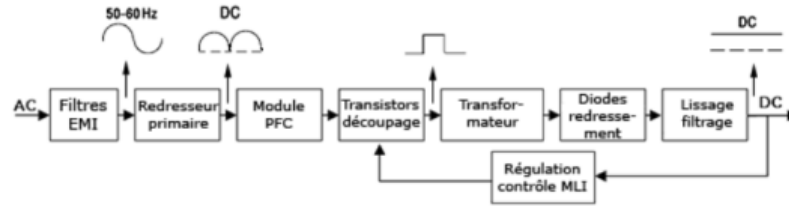


Figure II-11 Schéma de principe du fonctionnement d'une alimentation à découpage.

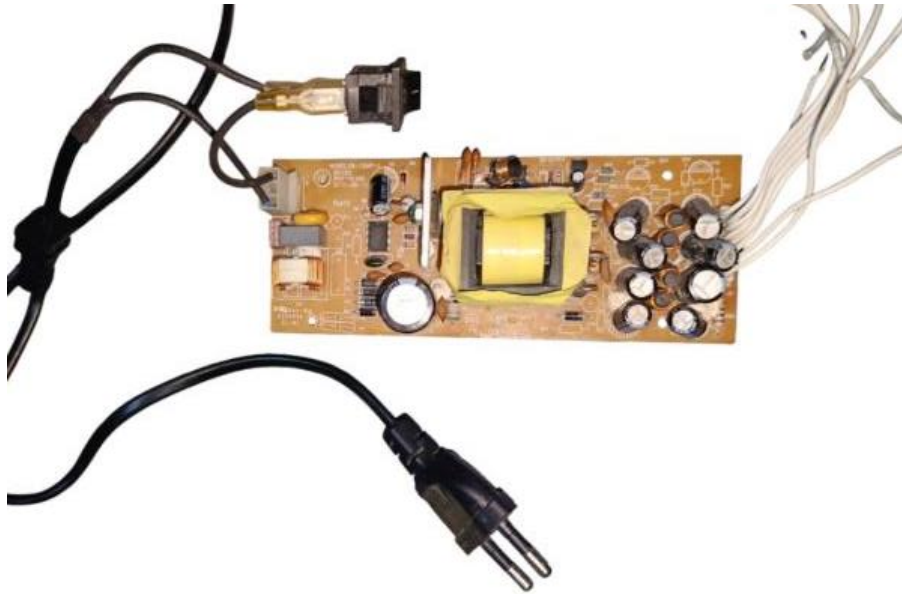


Figure II-12 Convertisseur AC/DC à découpage (SMPS).

Ce type est couramment utilisé en électronique de puissance pour transformer une tension alternative d'entrée élevée $V_{AC} = 220 \text{ V}$ en une ou plusieurs tensions continues de basse valeur et stabilisées (ex. 12 V, 5 V ou 3,3 V DC). Il assure une conversion efficace de l'énergie grâce à une commutation à haute fréquence, une régulation précise et un rendement énergétique élevé. Le principe de fonctionnement repose sur quatre étapes clés :

- Redressement et filtrage de la tension AC en une tension DC haute (via pont de diodes et condensateur).
- Découpage haute fréquence par des interrupteurs électroniques (MOSFETs), contrôlés par un circuit PWM intégré.
- Transformation galvanique de la tension via un transformateur HF, assurant à la fois adaptation de niveau et isolation.

- d) Redressement rapide et filtrage de sortie à l'aide de diodes rapides et de condensateurs électrolytiques, pour fournir une tension DC stabilisée.

II.4.4.3 La breadboard

Une breadboard (ou plaque d'essai) est un outil de prototypage non permanent permettant de connecter des composants électroniques sans soudure. Elle est essentielle pour :

- Tester rapidement des circuits avant implémentation finale.
- Modifier facilement les connexions durant la phase de développement.
- Apprendre les bases du câblage électronique.

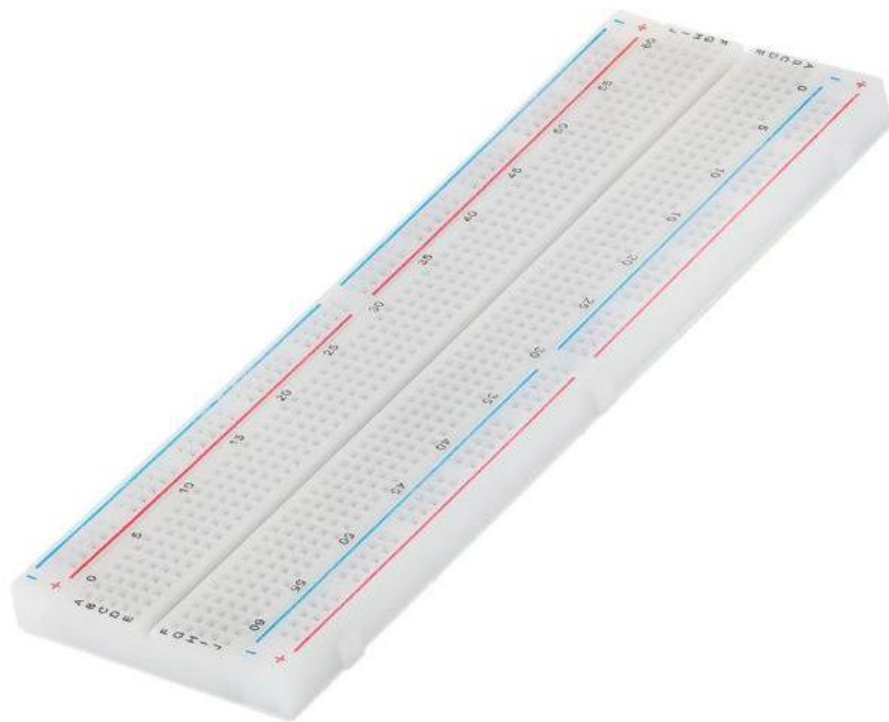


Figure II-13 La breadboard.

II.5 Environnement de développement et outils logiciels

Le développement du système a impliqué une chaîne d'outils logiciels sélectionnés pour leur adéquation avec l'ESP32 et les impératifs du projet : conception (Proteus), programmation (Arduino IDE), prototypage (Fritzing) et supervision (Blynk).



Figure II-14 Outils logiciels utilisés dans le développement du système automatisé.

➤ **Proteus**

Le logiciel Proteus Design Suite a été utilisé pour la simulation des circuits électroniques avant leur mise en œuvre physique. Il permet de vérifier le comportement logique de l'ensemble des composants dans un environnement virtuel.

◆ **Utilités :**

- Simulation du fonctionnement des capteurs et actionneurs.
- Vérification de la cohérence globale du circuit.
- Réduction des risques de détérioration des composants réels.

➤ **Arduino IDE**

L'Arduino IDE a été utilisé pour la programmation du microcontrôleur ESP32, principal composant de commande du système. Il offre une interface intuitive permettant d'écrire, compiler et téléverser du code en langage C/C++.

◆ **Utilités :**

- Interface simplifiée adaptée aux systèmes embarqués.
- Large disponibilité de bibliothèques prêtes à l'emploi (capteurs,

pompes, modules WiFi, etc.).

- Support natif des connexions WiFi et des transmissions de données vers des plateformes IoT.

➤ **Fritzing**

Fritzing est un outil de création de schémas de câblage utilisés pour documenter les connexions matérielles. Il facilite le passage de la phase de conception à celle de l'assemblage physique.

◆ **Utilités :**

- Représentation visuelle claire des connexions entre composants.
- Aide à l'assemblage sur breadboard ou plaque d'essai.
- Documentation technique accessible pour les utilisateurs ou intervenants tiers.

➤ **Blynk**

La plateforme Blynk permet le développement d'une interface mobile dédiée au contrôle du système via WiFi. Elle est essentielle pour la surveillance en temps réel des paramètres environnementaux.

◆ **Utilités :**

- Affichage en temps réel des données (température, humidité).
- Commande manuelle de la pompe ou de la ventilation.
- Notifications d'alerte en cas de dysfonctionnement.
- Intégration fluide avec l'ESP32 via communication sans fil.

II.6 Gestion climatique

Cette gestion s'appuie principalement sur le contrôle de la température et de l'humidité de l'air à l'intérieur de la serre.

Pour ce faire, notre projet utilise un capteur DHT22 qui mesure ces deux paramètres en temps réel. Les données recueillies sont envoyées à un microcontrôleur ESP32. Si les seuils prédéfinis sont dépassés, l'ESP32 active des ventilateurs extracteurs via un module relais.

Ce système déclenche donc automatiquement la ventilation lorsque l'air devient trop chaud ou trop humide, ce qui permet un échange thermique efficace avec l'extérieur. Cette approche aide à prévenir les maladies liées à l'humidité excessive et optimise la photosynthèse en maintenant la température dans la plage idéale pour les cultures choisies. L'automatisation de cette régulation climatique a aussi l'avantage de réduire la consommation d'énergie et de minimiser les interventions humaines.

II.7 Gestion d'irrigation

Le réservoir est essentiel pour la gestion de la solution nutritive. Pour la préparer, on utilise deux solutions distinctes, la solution A et la solution B, afin de prévenir toute réaction chimique indésirable avant mélange. Ces solutions, riches en macro et micro-éléments vitaux pour les plantes, sont ajoutées au réservoir principal où elles sont diluées à des concentrations spécifiques. C'est de là que part le mélange nutritif, distribué aux plantes via une pompe et un réseau de goutteurs.

Le système fonctionne en boucle fermée : la solution non absorbée par les racines est récupérée (par gravité ou drainage) et retourne au réservoir. Ce circuit permet de réutiliser continuellement la solution nutritive, ce qui réduit le gaspillage d'eau et de nutriments. Ce mode de fonctionnement améliore l'efficacité agronomique et assure un contrôle précis du pH et de la conductivité électrique (EC), qui peuvent être ajustés en fonction des besoins des cultures.

II.8 Conclusion

Ce chapitre a présenté les fondations techniques du système hydroponique automatisé, en détaillant les choix matériels et logiciels retenus. L'ESP32 assure la gestion centralisée des capteurs et actionneurs dans une architecture optimisée, modulable et économique. Ces composants forment la base du système embarqué, qui sera ensuite simulé et validé avant sa mise en œuvre réelle dans le chapitre suivant.

Chapitre III

*Essais du système et analyse des
performances*

III.1 Introduction

Ce chapitre regroupe la phase de simulation ainsi que l'analyse des résultats obtenus lors de la mise en œuvre du système hydroponique vertical automatisé. Dans un premier temps, nous présentons la démarche de modélisation à l'aide d'outils comme Arduino IDE et Proteus, permettant de valider le comportement logique du système dans un environnement virtuel sécurisé. Cette étape de simulation expérimentale a permis de tester la lecture des capteurs, la commande des actionneurs et l'affichage des données, avant toute implémentation physique.

Dans un second temps, nous analysons les performances du système en conditions réelles, en évaluant l'efficacité du fonctionnement en mode automatique et manuel, ainsi que le comportement des différents composants (capteurs, pompes, ventilateurs, etc.). Enfin, des observations de terrain sont discutées, et des pistes d'amélioration sont proposées en vue d'une optimisation future du dispositif.

III.2 Simulation initiale sous Arduino IDE et Proteus

III.2.1 Objectif de la simulation

L'objectif principal de cette simulation est de valider le comportement logique du système hydroponique automatisé avant sa mise en œuvre physique. Elle permet de tester la lecture des capteurs, le déclenchement des actionneurs et l'affichage des données dans un environnement virtuel sécurisé. Cette version constitue une maquette de validation fonctionnelle ; la réalisation complète du système nécessitera par la suite un dimensionnement rigoureux de plusieurs composants, notamment de la pompe, afin de garantir un débit et une pression adaptés aux exigences agronomiques et aux contraintes techniques réelles.

III.2.2 Schéma électronique de simulation

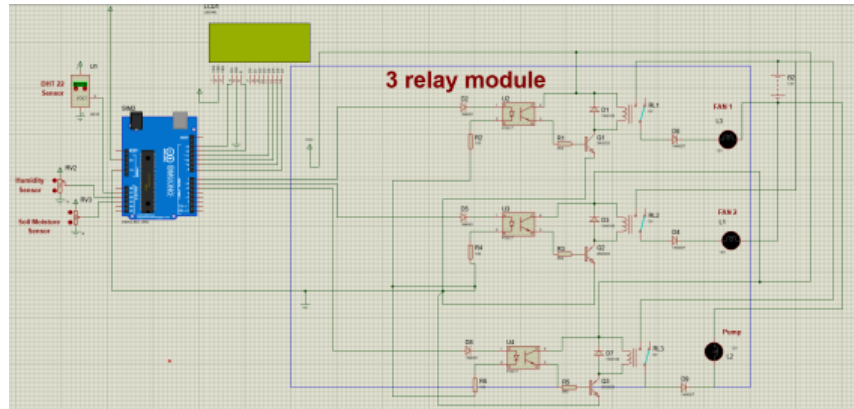


Figure III-1 simulation initiale sous Arduino IDE et Proteus.

III.2.3 Liste et configuration des composants simulés dans Proteus

Le premier tableau présente les composants simulés, et le deuxième montre comment ils sont connectés dans la simulation. Ils forment un bloc cohérent.

Tableau III-1 Liste des composants simulés dans Proteus.

N°	Composant	Rôle dans le projet
1	Arduino Uno (SIMULINO UNO)	Le cerveau du projet : reçoit les lectures des capteurs et contrôle les ventilateurs et la pompe via les relais.
2	Capteur DHT22 (U1)	Capteur numérique de température et d'humidité de l'air, envoie les données directement à l'Arduino.
3	Potentiomètres RV2 et RV3	Simulation de capteurs analogiques : • RV2 : simule l'humidité de l'air. • RV3 : simule l'humidité du sol.
4	LM35	Capteur de température analogique, convertit la température en tension lue par l'Arduino.
5	Écran LCD 20x4 (LM044L)	Affiche les valeurs des capteurs (température, humidité de l'air, humidité du sol) et l'état des dispositifs (ventilateurs, pompe).
6	Module 3 relais (Relay Module)	Commande des appareils à haute tension. Composé de : • RL1, RL2, RL3 : commandent les ventilateurs et la pompe. • PC817 : isolation optique. • Transistors 2N2222 : amplifient le signal. • R1,R2,R4,R5,R6 : Resistor 100 ohm et 2 k ohm • Diodes 1N4001 et 1N4148 : protègent contre la tension inverse.
7	FAN1 et FAN2 (L3, L1)	Ventilateurs 12V : • FAN1 : introduit de l'air frais. • FAN2 : expulse l'air chaud.
8	Pompe (L2)	Pompe à eau 220V utilisée pour l'irrigation automatique lorsque l'humidité du sol est faible.
9	Batterie 12V (B2)	Source d'alimentation pour les ventilateurs et les

		relais.
10	ALTERNATOR2	Source de courant alternatif simulée (220V) pour tester la pompe dans l'environnement Proteus.

Tableau III-2 Connexions des composants au microcontrôleur Arduino UNO.

Élément	Port / Connexion sur Arduino	Description
Alimentation du relais (Vcc)	5 V	Alimentation 5 V fournie par l'Arduino.
Masse (GND) du relais	GND	Masse commune entre le relais et l'Arduino.
Sortie capteur humidité de l'air	A1	Entrée analogique pour la lecture de l'humidité de l'air.
Données capteur humidité du sol	A2 et A3	Entrées analogiques pour la lecture de l'humidité du sol.
Masse des capteurs (GND)	GND	Masse commune pour tous les capteurs et l'Arduino.
Tension d'alimentation	3 à 5 V	Plage recommandée pour l'alimentation du système par l'Arduino.

❖ Remarques techniques importantes sur le câblage et le fonctionnement des relais :

Toutes les masses du circuit (GND Arduino, capteurs, relais, etc.) doivent être interconnectées pour garantir une référence de tension commune, à l'exception de la masse de la pompe. Cette dernière utilise une source d'alimentation séparée (220 V via alternateur simulé), ce qui impose une isolation pour éviter tout court-circuit ou dysfonctionnement.

III.2.3.1.1 Fonctionnement du relais :

Le relais agit comme un interrupteur électromécanique, contrôlé par un signal numérique de l'Arduino.

- Par défaut, il est en mode Normalement Ouvert (NO) : aucun courant ne passe, l'appareil est éteint.
- Lorsque l'Arduino envoie un signal LOW, la bobine magnétique du relais se ferme, permettant le passage du courant et l'activation de l'appareil connecté (ex. : pompe, ventilateur).
- Un signal HIGH renvoie le relais à l'état ouvert, coupant le circuit.
- Ce mécanisme offre une sécurité électrique en isolant le circuit de puissance (ventilateurs 12 V, pompe 220 V) du circuit de commande (5 V Arduino).

III.2.4 Développement du premier code de simulation (Arduino UNO)

Afin de valider le fonctionnement logique du système conçu, un programme en langage C++ a été développé et intégré dans le simulateur Proteus. Le code permet de surveiller en temps réel les conditions climatiques internes et de piloter automatiquement les actionneurs via des relais.

III.2.4.1 Installation des gestionnaires de cartes (Boards Managers) dans Arduino IDE

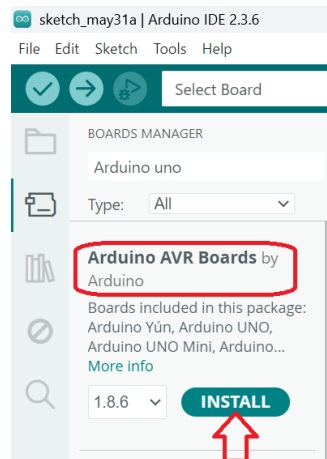


Figure III-2 Installation de la carte Arduino.

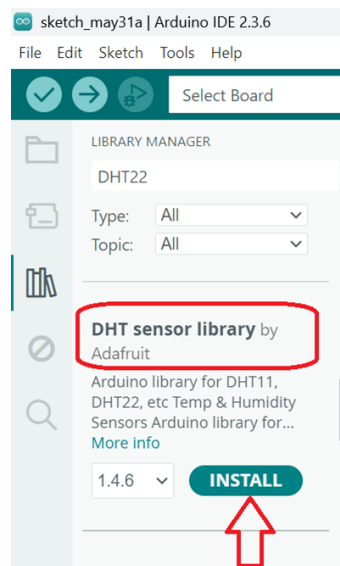


Figure III-3 Installation de la bibliothèque du DHT 22.

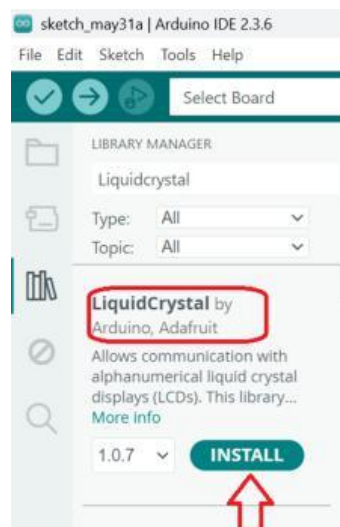


Figure III-4 Installation de la bibliothèque LCD.

III.2.4.2 Choix de la carte et du port

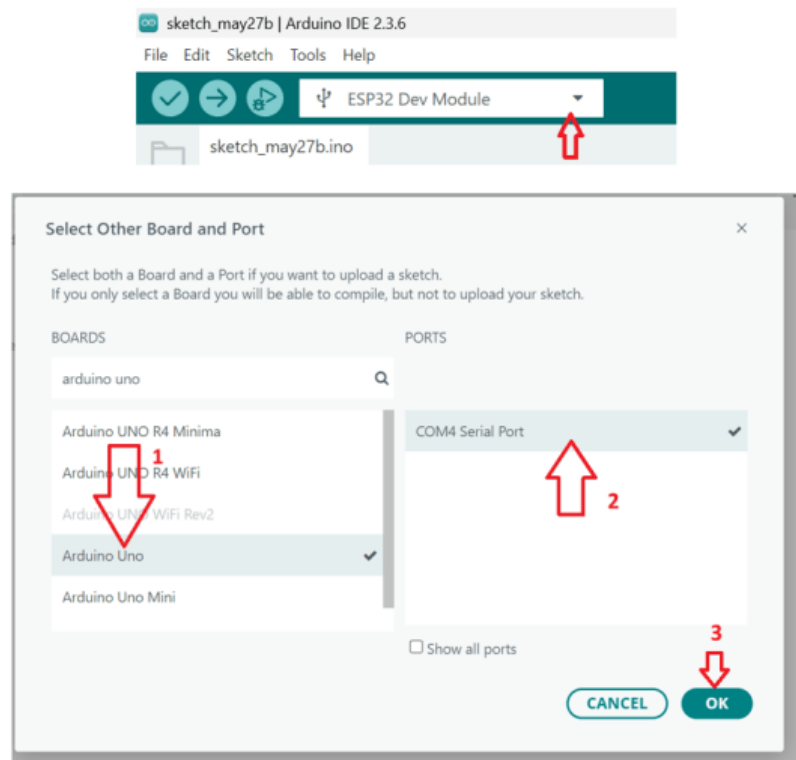


Figure III-5 Les étapes pour choisir la carte et le port.

III.2.4.3 Chargement du code sur la carte Arduino

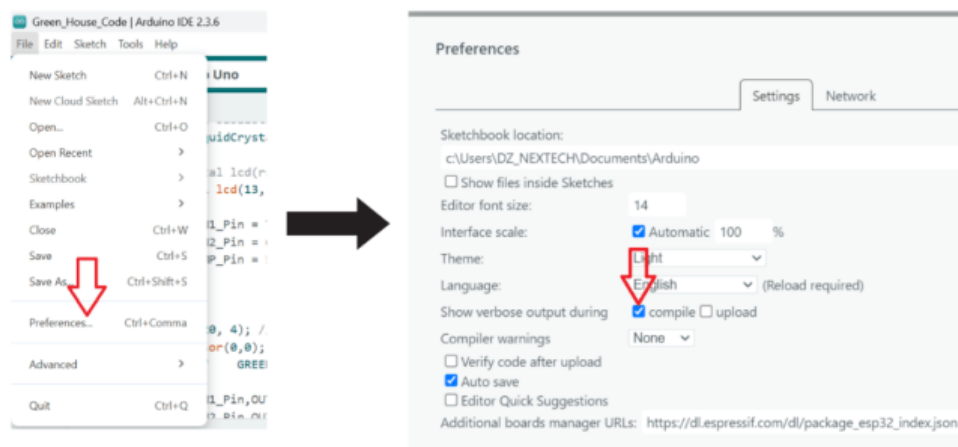


Figure III-6 Configuration des préférences de l'IDE Arduino.

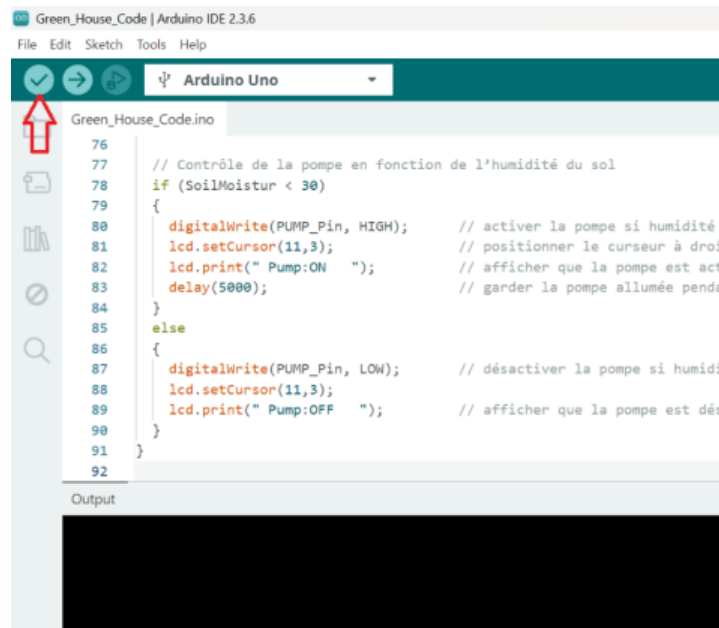


Figure III-7 Vérification et compilation du code dans l'IDE Arduino avant téléversement.

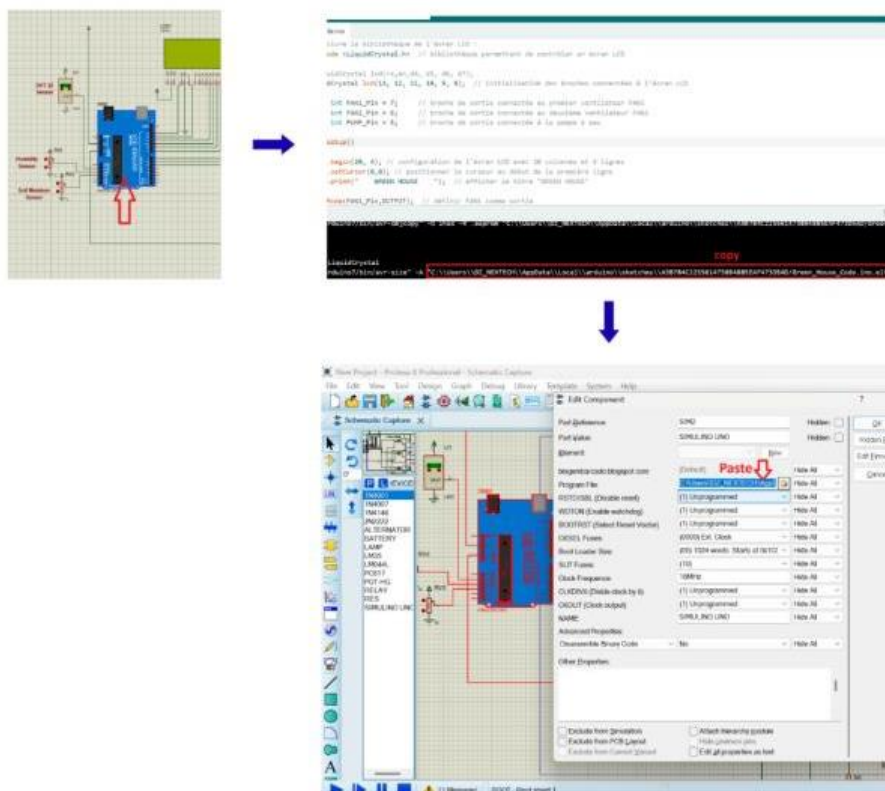


Figure III-8 Étapes de téléversement du code vers la carte Arduino.

III.2.5 Traitement des données capteurs

III.2.5.1 Convertisseur analogique-numérique (ADC)

- L'Arduino UNO dispose d'un ADC 10 bits, ce qui permet de convertir une tension analogique entre 0 et 5 V en une valeur numérique entre 0 et 1023 (soit $2^{10} = 1024$ niveaux).
- Chaque valeur numérique représente une fraction de la tension maximale de référence (souvent 5 V).
- Formule de conversion :

$$V = \left(\frac{N}{1023} \right) \times V_{ref}$$

Où N est la valeur numérique lue, et V_{ref} la tension de référence (5.0 V par défaut).

- La division se fait par 1023 (et non 1024), car ce sont les intervalles (et non les niveaux) qui déterminent la résolution.

Exemple : Si $N = 51$, alors

$$V = \left(\frac{51}{1023} \right) \times 5.0 \approx 0.249V$$

III.2.5.2 Interprétation du signal du capteur LM35 (température)

- `float voltage = rawTemp * 5.0 / 1023;`
- `float temperature = voltage * 100;`
- La sensibilité capteur LM35 : 10 mV/°C (0.01V/°C).
- En multipliant la tension par 100, on obtient directement la température en °C.

Exemple : Si `rawTemp = 51` et la tension ≈ 0.249 V

Donc $T = 0.249 \times 100 \approx 25$ °C .

III.2.5.3 Lecture de l'Humidité du Sol et de l'Air

- `rawHumidity = analogRead(A2) → Humidité de l'air.`
- `rawSoil = analogRead(A3) → Humidité du sol.`
- Les capteurs renvoient une valeur analogique brute comprise entre **0 et 1023**, correspondant à la résolution de l'ADC 10 bits de l'Arduino UNO.

- Plus cette valeur est élevée, plus le sol est considéré comme sec.
- La conversion approximative en pourcentage se fait selon :

$$\text{Humidité(\%)} = \frac{N_{raw}}{10}$$

Exemple : Si $N_{raw} = 650$ donc,

$$\text{Humidité(\%)} = 65\%$$

- Limite : Cette méthode suppose une linéarité du capteur (à calibrer en réalité).

III.2.5.4 Types de données utilisés dans le code Arduino

Tableau III-3 Types de données utilisés dans le code Arduino.

Type	Description	Taille mémoire	Plage typique	Exemple
int	Entier (sans virgule)	2 octets	-32 768 à 32 767	int x = 42;
float	Nombre à virgule flottante (réel)	4 octets	Décimaux simples	float t = 23.5;
bool	Booléen (vrai ou faux)	1 octet	true (1) ou false (0)	bool flag = true;

III.2.6 Logique de commande et fonctionnement du système simulé

Le système simulé dans Proteus repose sur une surveillance automatique des paramètres climatiques internes à la serre, pilotée par une carte Arduino UNO. Les différents actionneurs sont commandés à l'aide de modules relais, en réponse aux valeurs lues par les capteurs.

III.2.6.1 Logique de fonctionnement

- **Contrôle de la température (capteur DHT22)**
 - Lorsque la température dépasse 32 °C, le ventilateur 1 (broche D7) et le ventilateur 2 extracteur (broche D6) sont activés.

- Lorsque la température est inférieure à 32 °C, aucune action n'est engagée, les conditions sont considérées comme optimales.
- **Contrôle de l'humidité du sol (capteur analogique sur A3)**
 - Lorsque l'humidité du sol est inférieure à 30 %, la pompe (connectée à la broche D5) est activée pendant une durée de 5 secondes.
 - Si le niveau d'humidité reste insuffisant après ce cycle, la pompe est de nouveau activée après une pause de 5 secondes.
- **Affichage sur écran LCD 16x2 (via interface I2C)**
 - Les valeurs mesurées de température, d'humidité de l'air et d'humidité du sol sont affichées en temps réel sur l'écran LCD.

Voici un tableau récapitulatif de la logique de commande du système :

Tableau III-4 Synthèse des actions du système en fonction des seuils mesurés.

Condition	Action
$T < 32^{\circ}\text{C}$	Aucune action
$T \geq 32^{\circ}\text{C}$	Activation ventilateur 1 (D7) Activation ventilateur 2 (D6)
Humidité du sol $< 30\%$	Activation pompe (D5)
Humidité sol $\geq 30\%$	Pompe arrêtée après 5 s

III.2.6.2 L'organigramme

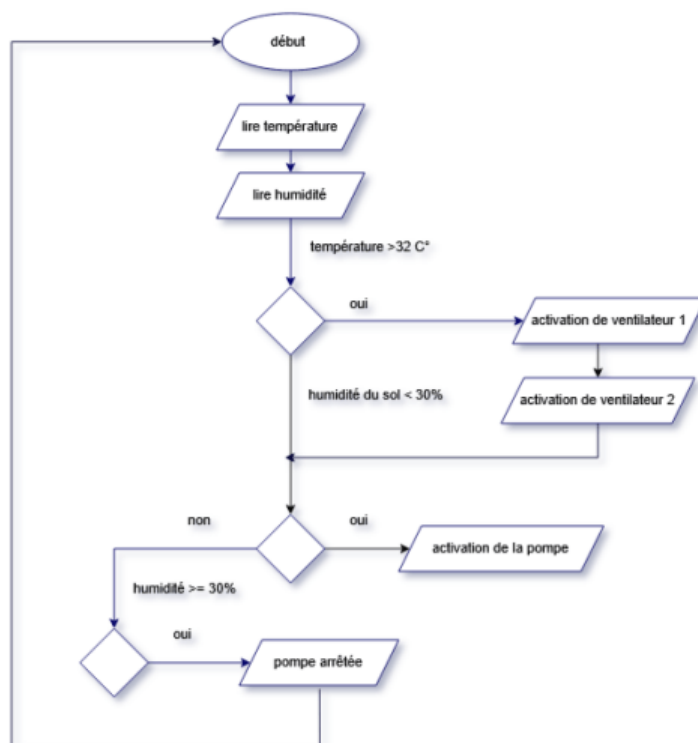


Figure III-9 L'organigramme du fonctionnement du système.

III.2.7 Résultats attendus et validation de la simulation

- 1) **État 1** : Activation du ventilateur 1 et ventilateur 2 ($T \geq 32^{\circ}\text{C}$)

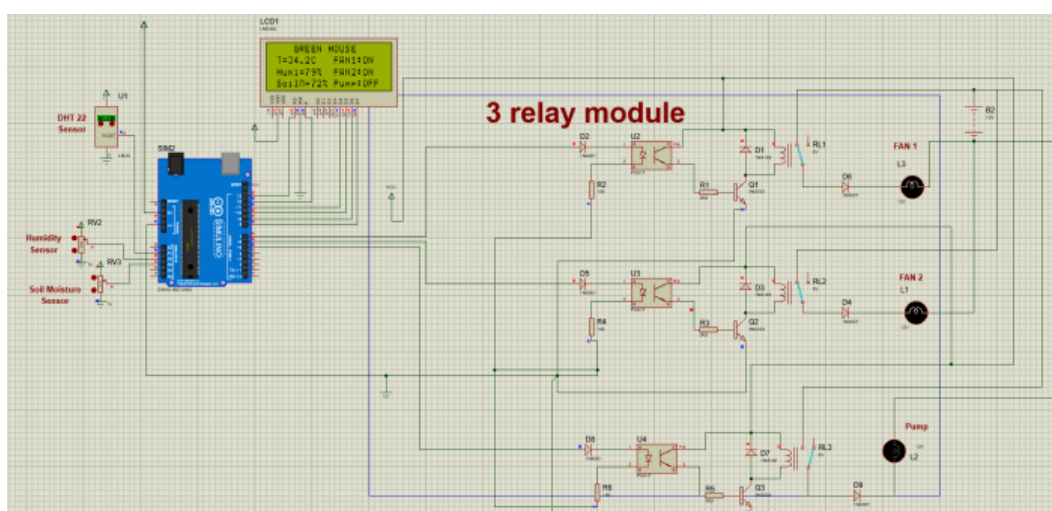


Figure III-10 Activation du ventilateur 1 et ventilateur 2 ($T \geq 32^{\circ}\text{C}$).

- a Affichage mesuré :

- Température : **34,2 °C**
- Humidité de l'air : **79 %**
- Humidité du sol : **72 %**

b Analyse technique :

- La température mesurée est de 34,2 °C, ce qui est supérieur à la consigne (32 °C). Une ventilation est nécessaire pour ramener la température à un niveau acceptable.
- L'humidité du sol est largement supérieure à 30 % : pas de besoin d'arrosage.
- L'humidité de l'air est élevée, favorable aux cultures.

c Action du système :

- Ventilateur 1 (D7) activé : assure la circulation d'air à l'intérieur de la serre pour abaisser la température ambiante.
- Ventilateur 2 activé : permet l'extraction de l'air chaud et humide vers l'extérieur pour favoriser le renouvellement de l'air et éviter l'accumulation de chaleur et d'humidité.
- Pompe désactivée : aucune irrigation nécessaire puisque le substrat est encore bien humide.

d Conclusion :

Le système réagit de manière adéquate à une température élevée en activant les deux ventilateurs, assurant ainsi la circulation et l'extraction de l'air chaud et humide. L'arrosage ne s'active pas, conformément au taux d'humidité du sol qui reste élevé. L'affichage sur l'écran LCD reflète fidèlement les valeurs mesurées par les capteurs.

2) **État 2 :** les trois actionneurs sont activés (ON)

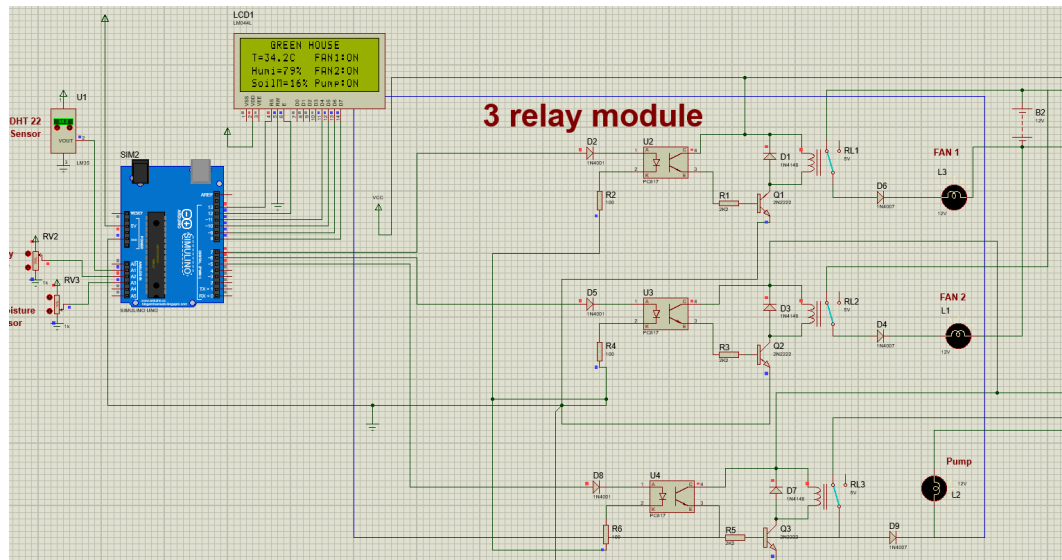


Figure III-11 Simulation sous Proteus en dehors des conditions climatiques optimales

a Affichage mesuré :

- Température : **34.2 °C**
- Humidité de l'air : **79 %**
- Humidité du sol : **16 %**

b Analyse technique :

- La température est supérieure à la consigne de 32 °C, ce qui justifie l'activation des ventilateurs pour évacuer l'air chaud.
- L'humidité du sol est inférieure au seuil critique de 30 %, indiquant un besoin d'irrigation.
- L'humidité de l'air est élevée, ce qui peut être bénéfique pour certaines cultures, mais à ce niveau de température, une aération reste nécessaire pour éviter un excès d'humidité stagnante.

c Action du système :

- Activation des deux ventilateurs pour la circulation et l'extraction de l'air chaud et humide.
- Activation de la pompe pour humidifier le substrat sec.

d Conclusion :

Le système réagit de manière conforme à la logique de programmation. Les actionneurs se déclenchent en réponse à des conditions climatiques non optimales, assurant à la fois l'irrigation et la ventilation. Le fonctionnement global est cohérent, contribuant à maintenir un environnement contrôlé favorable à la croissance végétale tout en répondant aux seuils critiques définis.

3) État 3 : les trois actionneurs sont désactivés (OFF)

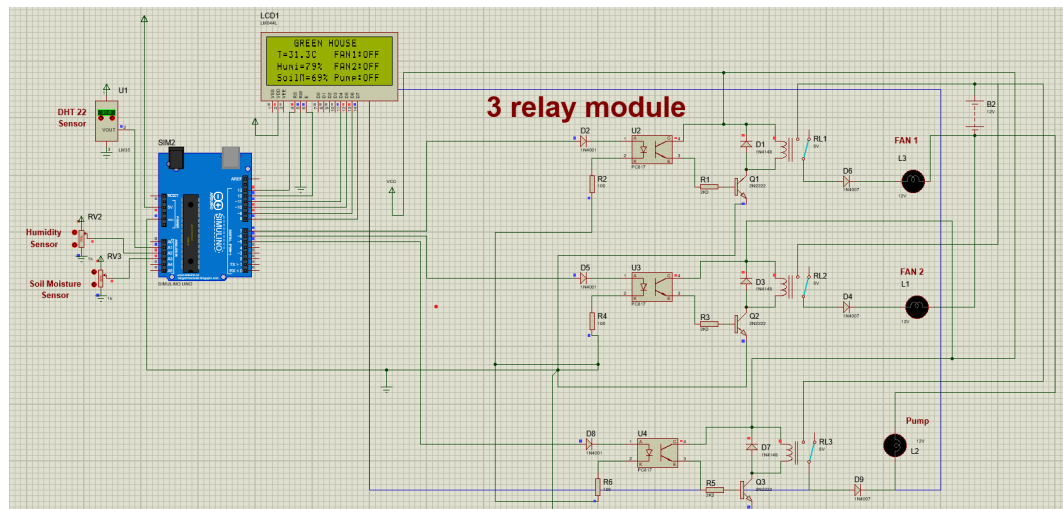


Figure III-12 Simulation sous Proteus dans des conditions climatiques optimales.

a Affichage mesuré :

- Température : **31.3 °C**
- Humidité de l'air : **79 %**
- Humidité du sol : **69 %**

b Analyse technique :

- La température est inférieure à la consigne de 32 °C, ce qui ne nécessite pas l'activation des ventilateurs.
- L'humidité du sol est bien au-dessus du seuil de 30 %, excluant tout besoin d'irrigation.
- L'humidité de l'air est élevée mais non problématique, et reste compatible avec

un bon développement végétal dans un environnement contrôlé.

c Action du système :

- Ventilateur 1 désactivé.
- Ventilateur 2 désactivé.
- Pompe désactivée.

d Conclusion :

Le système fonctionne conformément à la logique de contrôle. Aucune action corrective n'est engagée, les conditions climatiques étant optimales. L'écran LCD affiche correctement les mesures, et la désactivation des actionneurs traduit une gestion efficace et économe en énergie.

4) État 4 : Sécheresse du substrat : activation de la pompe

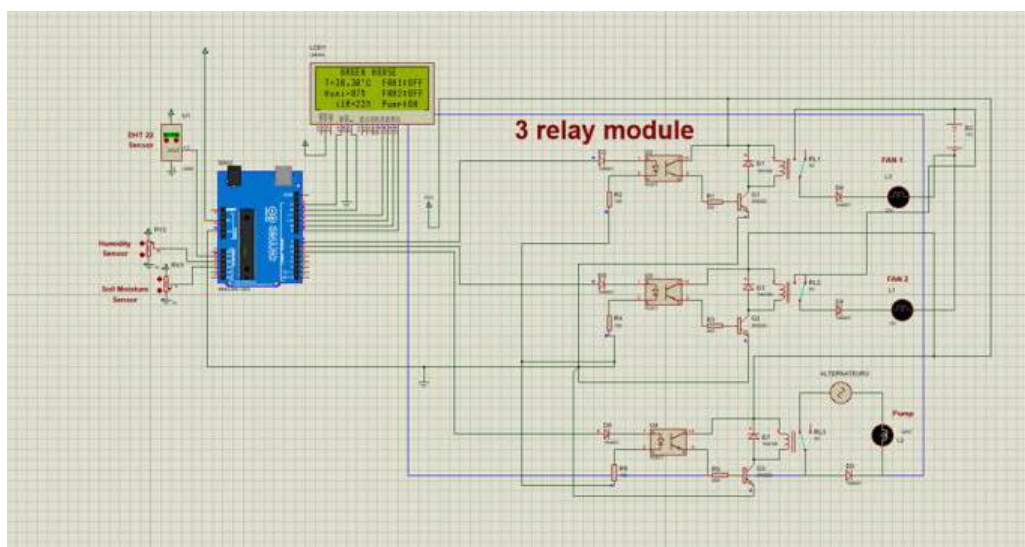


Figure III-13 Activation de la pompe (humidité du sol <30%).

a Affichage mesuré :

- Température : **30.30 °C**
- Humidité de l'air : **87 %**
- Humidité du sol : **22 %**

b Analyse technique :

- Température dans la plage optimale ($<32\text{ °C}$) : aucune ventilation nécessaire.
- Humidité du sol inférieure à 30 % : le substrat est considéré comme sec.
- Humidité de l'air élevée : conditions favorables à la culture.

c Action du système :

- Pompe activée automatiquement (D5) pendant 5 secondes pour réhydrater le substrat.
- Ventilateurs inactifs, car la température ne justifie pas de ventilation.

d Conclusion :

La pompe est déclenchée conformément à l'algorithme de contrôle basé sur un seuil critique d'humidité du sol. Ce comportement valide l'efficacité du système dans la gestion autonome de l'irrigation.

III.3 Migration vers ESP32

III.3.1 Justification du remplacement de l'Arduino par ESP32

La première phase du développement a été réalisée avec une carte Arduino UNO, largement compatible avec l'environnement de simulation Proteus, ce qui a facilité la validation initiale de la logique de commande. Cependant, pour la mise en œuvre réelle, cette carte a été remplacée par une ESP32, plus puissante, offrant une connectivité Wi-Fi intégrée, une capacité mémoire accrue et un plus grand nombre de GPIOs. Ces caractéristiques en font une plateforme idéale pour des projets embarqués nécessitant une interaction distante via une application mobile telle que Blynk.

III.3.2 Adaptation du code Arduino à ESP32

III.3.2.1 Installation des gestionnaires de cartes (Boards Managers) et des bibliothèques nécessaires dans Arduino IDE

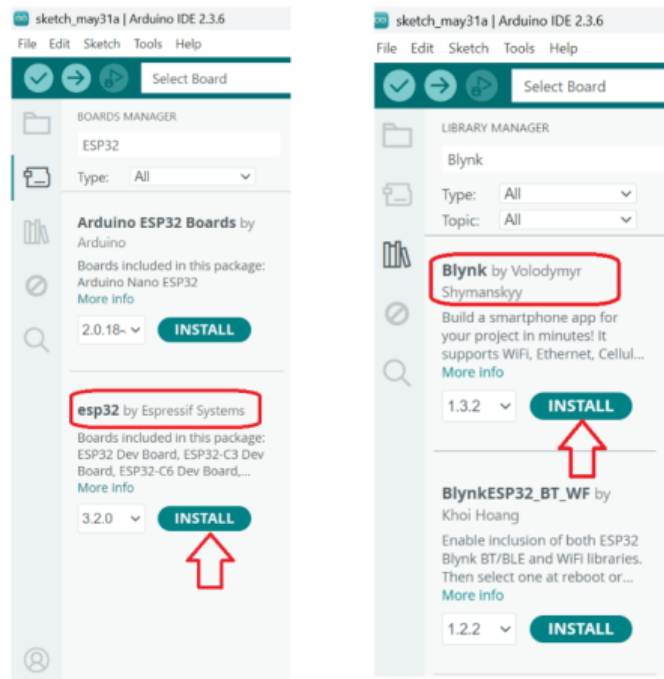


Figure III-14 Les bibliothèques nécessaires à installer dans Arduino IDE.

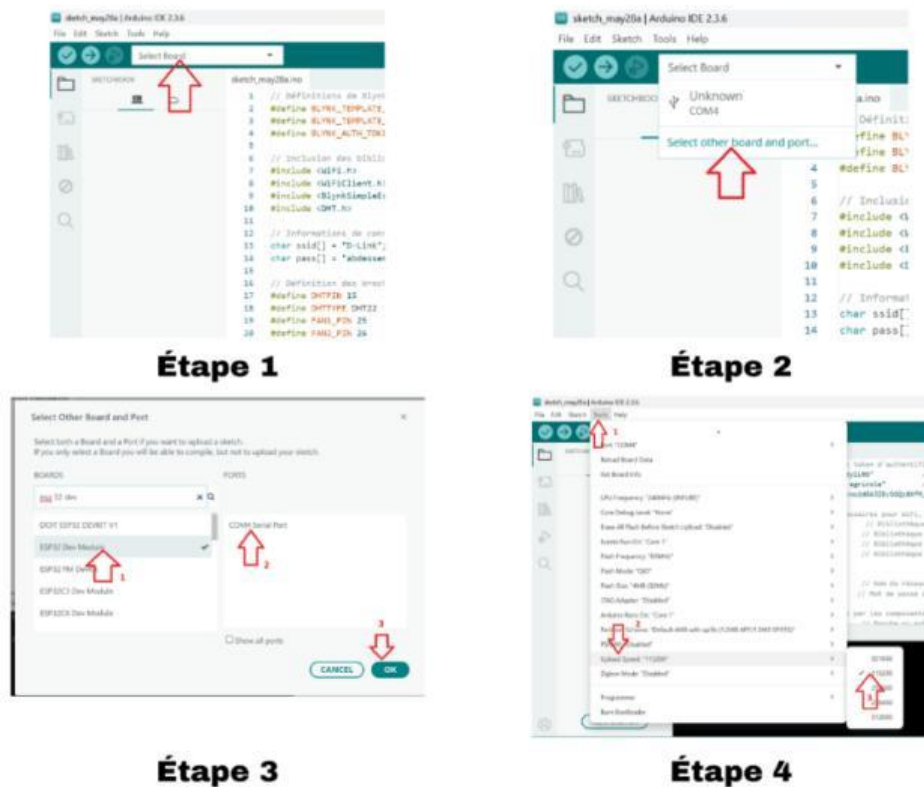


Figure III-15 Les étapes de choisir la carte et le port.

III.3.2.2 Code ESP 32

Le code développé pour le microcontrôleur ESP32 assure la lecture des paramètres environnementaux (température, humidité de l'air et du sol) à l'aide des capteurs DHT22 et d'humidité du sol, ainsi que le contrôle automatisé ou manuel des actionneurs (ventilateurs et pompe à eau) via l'application mobile Blynk, connectée au réseau Wi-Fi.

La gestion du mode de fonctionnement (manuel/automatique) permet à l'utilisateur, selon les besoins, d'activer ou de désactiver chaque actionneur à distance. Les données collectées sont transmises en temps réel à l'interface Blynk grâce aux broches virtuelles, assurant ainsi un suivi instantané de l'environnement de culture.

III.3.2.3 Description du fonctionnement automatisé et connecté avec l'ESP32 et Blynk

Le projet de la "serre agricole intelligente" repose sur l'utilisation d'une carte ESP32 pour lire les données de plusieurs capteurs (température, humidité de l'air, humidité du sol), et pour contrôler deux ventilateurs et une pompe à eau, soit automatiquement soit manuellement via l'application mobile Blynk.

❖ En mode automatique :

- Si la température est inférieure à 28°C, le premier ventilateur (air frais) est activé.
- Si la température est supérieure à 32°C, le deuxième ventilateur (évacuation d'air chaud) est activé.
- Si la température est entre 28°C et 32°C, aucun ventilateur n'est activé.
- Si l'humidité du sol est inférieure à 30%, la pompe à eau est activée

❖ En mode manuel, l'utilisateur peut :

- Activer ou désactiver chaque ventilateur ou la pompe indépendamment via des boutons dans l'application.
- Passer d'un mode à l'autre selon ses préférences.

Les données des capteurs sont affichées en temps réel dans l'application sous forme de jauges, et sont mises à jour chaque seconde.

III.3.2.4 Interprétation du traitement numérique de l'humidité du sol (ESP32)

Le programme utilise la broche 35 de l'ESP32, connectée à un capteur d'humidité du sol :

```
int soil = analogRead(SOIL_MOISTURE_PIN);
```

Cette instruction lit la tension du capteur convertie en valeur brute :

* 4095 $\approx$ sol très sec

* 1520 $\approx$ sol très humide

Pour faciliter l'interprétation, cette donnée brute est convertie en pourcentage d'humidité via la fonction map() :

```
int soilMoisture = map(soil, 4095, 1520, 0, 100) ;
```

❖ Détails techniques :

Le capteur produit une tension électrique variable en fonction de l'humidité présente dans le sol.

Cette tension est convertie en une valeur numérique comprise entre 0 et 4095 car l'ESP32 possède un convertisseur analogique-numérique (ADC) sur 12 bits ($2^{12} = 4096$ niveaux possibles).

Plus le sol est sec, plus la valeur est proche de 4095, tandis que plus le sol est humide, plus la valeur est basse (par exemple environ 1520).

Tableau III-5 Conversion des valeurs brutes de l'ADC de l'ESP32 en pourcentage d'humidité du sol.

Paramètre	Valeur
ADC (ESP32)	12 bits (0 à 4095)
Sol sec	4095 $\rightarrow$ 0 % d'humidité
Sol humide	1520 $\rightarrow$ 100 % humidité
Sortie affichable	Pourcentage (%)

❖ Exemple de conversion :

Pour une valeur lue du sol = 2800 :

$$\text{Humidité (\%)} = \frac{(4095 - 2800)}{(4095 - 1520)} \times 100 \approx 50.29\%$$

❖ Intérêt de la conversion :

- Permet une prise de décision automatisée (ex. : activer la pompe si $< 30\%$).
- Facilite l'affichage dans une interface utilisateur.
- Rend les données agronomiques compréhensibles.

III.4 Modélisation électronique avec Fritzing

Dans le cadre de la modélisation du système, cette figure générée avec Fritzing vise à représenter visuellement et avec précision le câblage réel du montage électronique. Le schéma montre l'interconnexion du microcontrôleur ESP32, des capteurs environnementaux (DHT22 pour la température et l'humidité de l'air, capteur d'humidité du sol), du module relais 4 canaux (commandant deux ventilateurs et une pompe), ainsi que du convertisseur abaisseur de tension (buck converter) 12V- 5V assurant l'alimentation des composants logiques. Cette modélisation facilite la visualisation de l'implémentation matérielle, la vérification des connexions, et sert de référence pour le câblage physique du prototype.

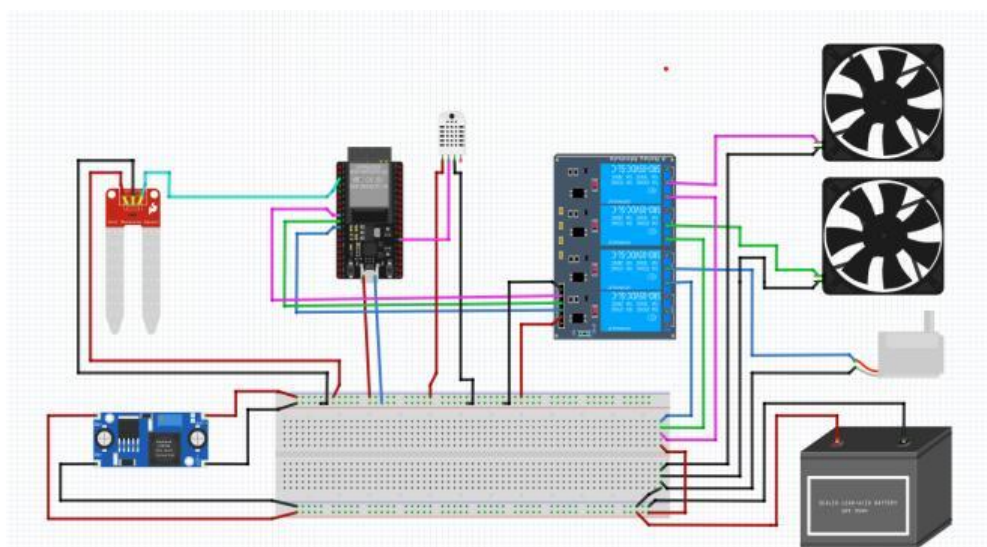


Figure III-16 Le schéma de câblage complet du système basé sur le microcontrôleur ESP32.

Ce diagramme fonctionnel illustre les connexions logiques entre l'ESP32, les capteurs, le module de relais, les actionneurs, et l'alimentation. Il met en évidence le rôle central de l'ESP32 dans la lecture des capteurs et la commande des relais selon les conditions environnementales.

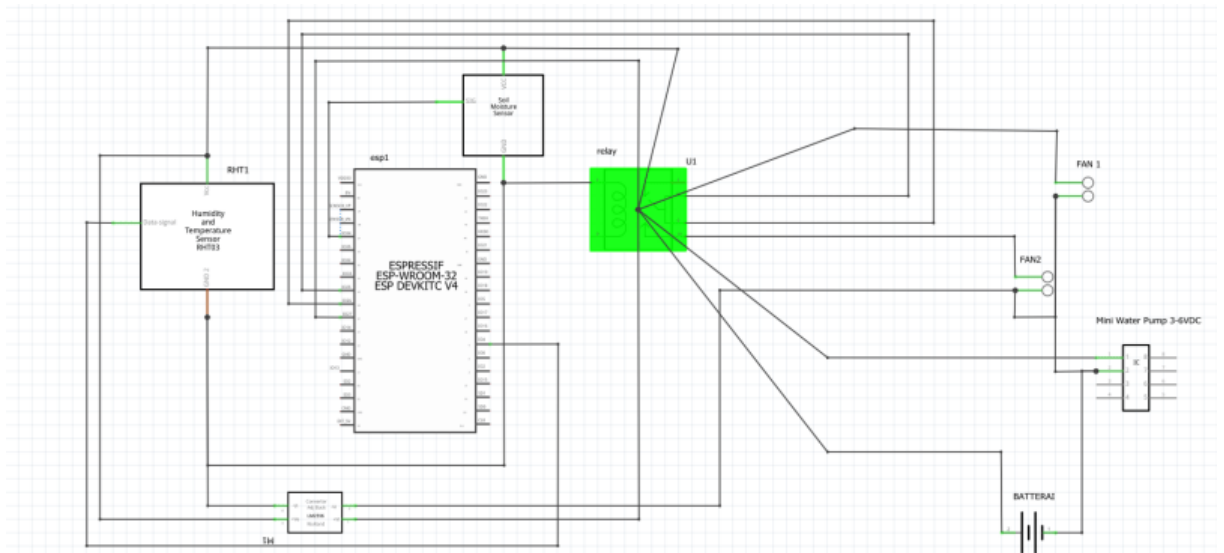


Figure III-17 Schéma électrique du système automatisé de gestion climatique et d'irrigation.

III.5 Développement de l'application mobile sur Blynk

I.1.1 Création du compte Blynk et configuration du projet via la plateforme web

Pour permettre à l'ESP32 de communiquer avec l'application mobile, il a fallu configurer la plateforme Blynk IoT. Cette plateforme propose une interface web facile à utiliser qui permet de créer un tableau de bord pour surveiller et contrôler le système à distance. Voici les étapes principales de cette configuration :

- 1) **Accès à la plateforme et création d'un compte Blynk** : Pour commencer, il faut se rendre sur le site officiel de Blynk [51]. Ensuite, un compte utilisateur est créé en renseignant une adresse e-mail valide et un mot de passe sécurisé.



Figure III-18 Interface de création de compte sur Blynk.

- 2) Création d'un nouveau projet dans l'application, en sélectionnant :
 - a) Le nom du projet : Serre agricole.
 - b) Le type de carte : ESP32 Dev Board.
 - c) Le mode de connexion : Wi-Fi.

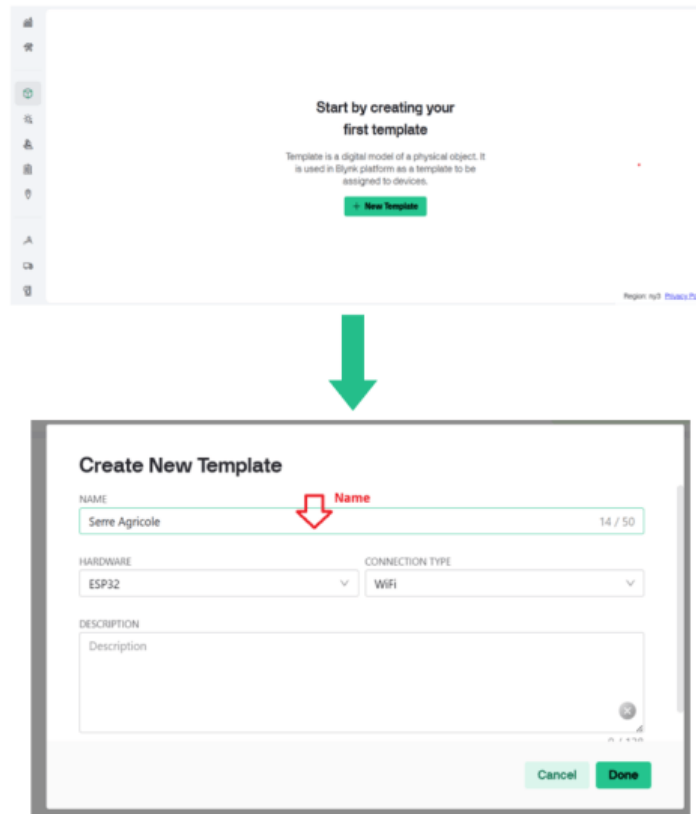


Figure III-19 Création d'un nouveau Template.

3) Création d'un nouvel appareil (Device) :

Après avoir défini le projet (template), l'étape suivante consiste à ajouter un nouvel appareil (device) dans Blynk afin de permettre la liaison entre la plateforme cloud et le microcontrôleur ESP32.

Cette opération se fait via l'interface web (onglet "Devices") en cliquant sur "Create New Device", puis en sélectionnant le template précédemment créé. Une fois validée, cette opération génère un Auth Token unique qui sera utilisé dans le code ESP32.

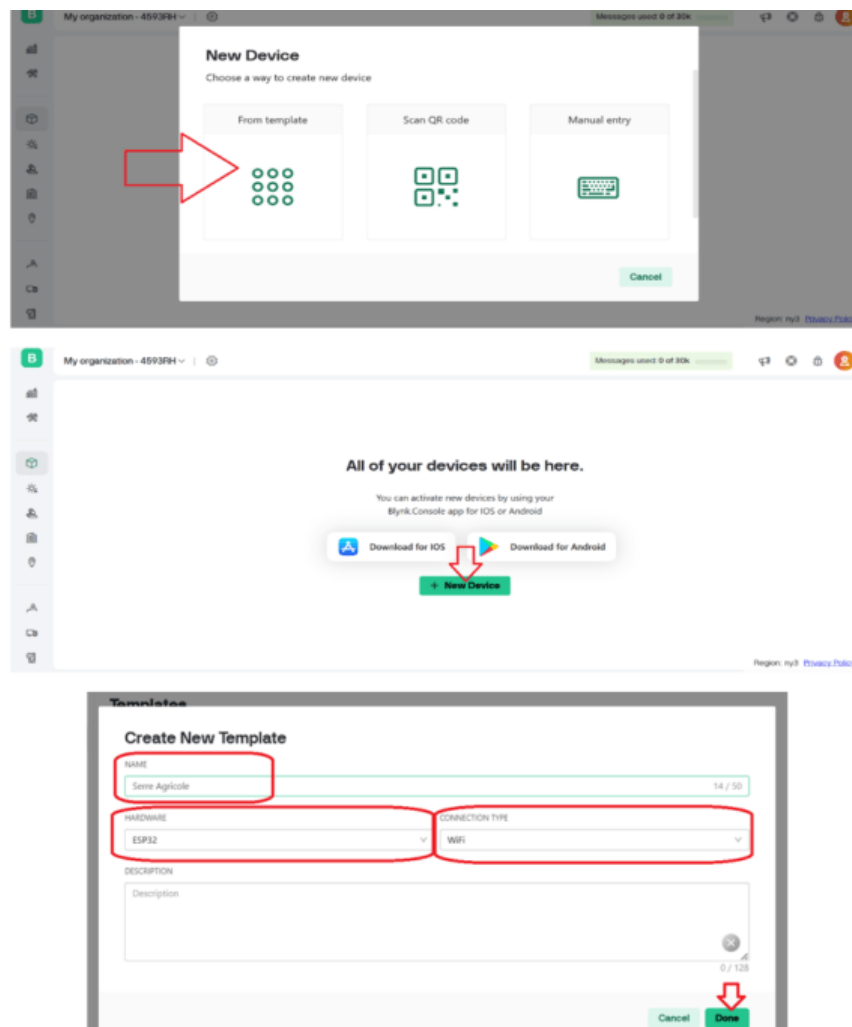


Figure III-20 Les étapes pour créer un nouvel appareil (Device).

4) Définir le DataStreams (température, humidité air/sol, commandes pompe/ ventilateurs) en précisant :

- Un type (Virtual Pin, GPIO, etc.).
- Un nom.
- Un Virtual Pin (Vx).
- Un type de données (int, float, bool...).
- Des valeurs minimales et maximales.
- Une unité si nécessaire (ex. : °C, %, ON/OFF...).

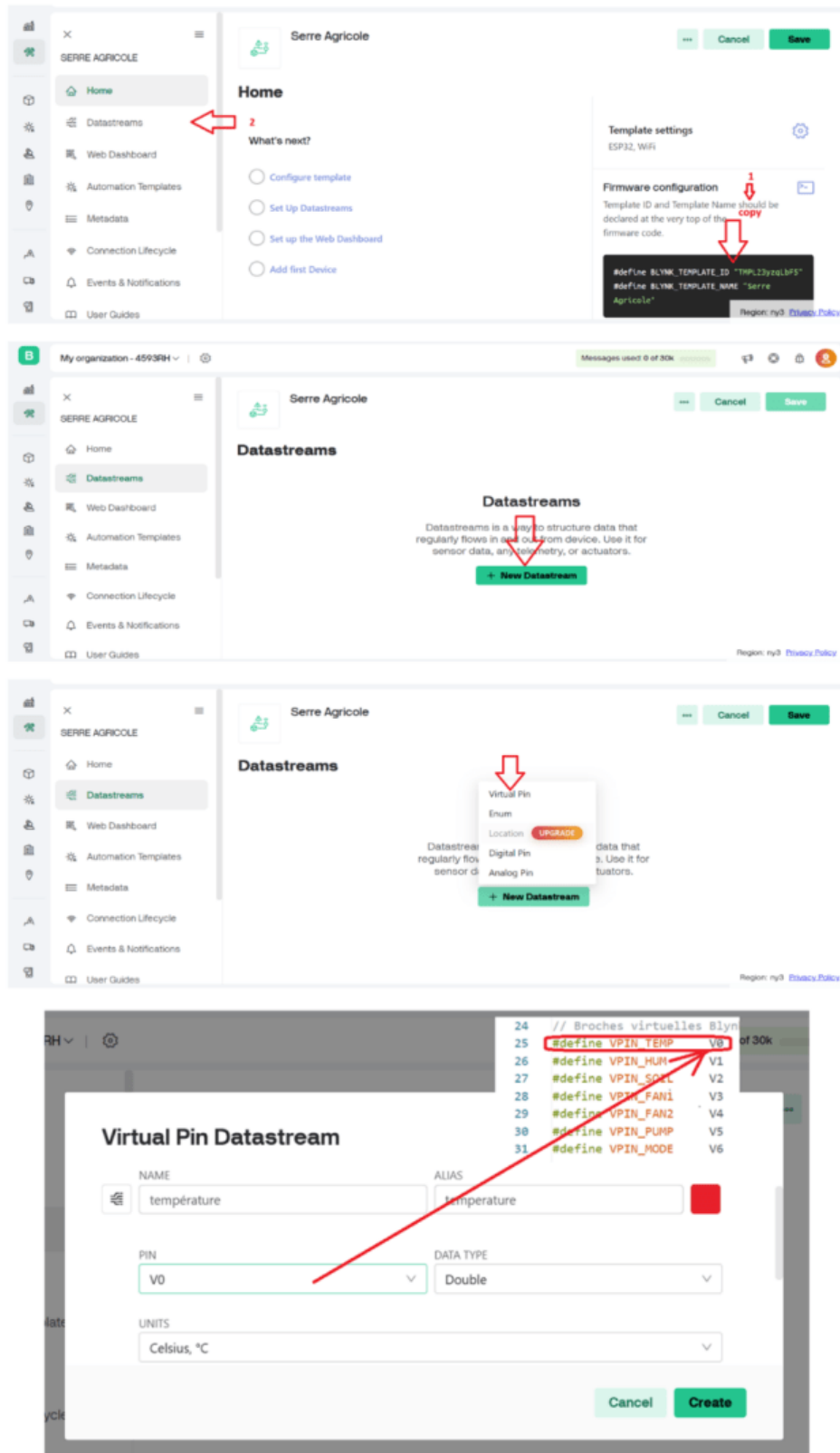


Figure III-21 Les étapes pour définir un flux de données (datastream).

La configuration du DataStream V0 pour la température a été réalisée comme illustré dans la figure.

De la même manière, des DataStreams spécifiques ont été créés pour chaque composant du système, tels que : l'humidité de l'air, l'humidité du sol, les ventilateurs (commandes ON/OFF), la pompe, ainsi que pour la sélection du mode de fonctionnement (manuel ou automatique).

Cette structuration permet d'assurer une communication bidirectionnelle efficace entre l'ESP32 et l'application Blynk, tout en respectant une organisation logique et modulaire du système.

- 5) La récupération de l'Auth Token (jeton d'authentification unique) du projet, indispensable pour lier le microcontrôleur à la plateforme cloud de Blynk.

```

1 // Définitions de Blynk (ID, nom et token d'authentification)
2 #define BLYNK_TEMPLATE_ID "TMPL123yzqLbF5" // ID du template Blynk
3 #define BLYNK_TEMPLATE_NAME "Serre Agricole" // Nom du template
4 #define BLYNK_AUTH_TOKEN "6JzGzzR-2M8Qo84fxLQIMnLYKrTFVqN" // Token d'authentification
5
6 // Inclusion des bibliothèques nécessaires pour WiFi, Blynk et DHT
7 #include <WiFi.h> // Bibliothèque WiFi pour ESP32
8 #include <WiFiClient.h> // Bibliothèque client TCP/IP
9 #include <BlynkSimpleEsp32.h> // Bibliothèque Blynk pour ESP32
10 #include <DHT.h> // Bibliothèque pour capteur DHT22
11
12 // Informations de connexion WiFi
13 char ssid[] = "D-Link"; // Nom du réseau WiFi
14 char pass[] = "abdessemed123"; // Mot de passe du réseau WiFi
15
16 // Définition des broches utilisées par les composants
17 #define DHTPIN 15 // Broche où est connecté le capteur DHT22
18 #define DHTTYPE DHT22 // Type du capteur DHT
19 #define FAN1_PIN 25 // Broche du ventilateur 1 (entrée d'air)
20 #define FAN2_PIN 26 // Broche du ventilateur 2 (sortie d'air)
21 #define SOIL_MOISTURE_PIN 35 // Broche analogique du capteur d'humidité du sol
22 #define PUMP_PIN 27 // Broche de la pompe à eau
23
24 // Broches virtuelles Blynk pour widgets (affichage et contrôle)
25 #define VPIN_TEMP V0 // Virtual pin pour afficher la température
26 #define VPIN_HUM V1 // Virtual pin pour afficher l'humidité de l'air
27 #define VPIN_SOIL V2 // Virtual pin pour afficher l'humidité du sol
28 #define VPIN_FAN1 V3 // Virtual pin pour contrôler ventilateur 1 (manuel)
  
```

Figure III-22 Insertion du Auth Token, du SSID et du mot de passe Wi-Fi dans le code.

- 6) Accès à l'onglet Web Dashboard pour concevoir l'interface utilisateur :

- Insertion des widgets (Gauge, Buttons, Switches...)

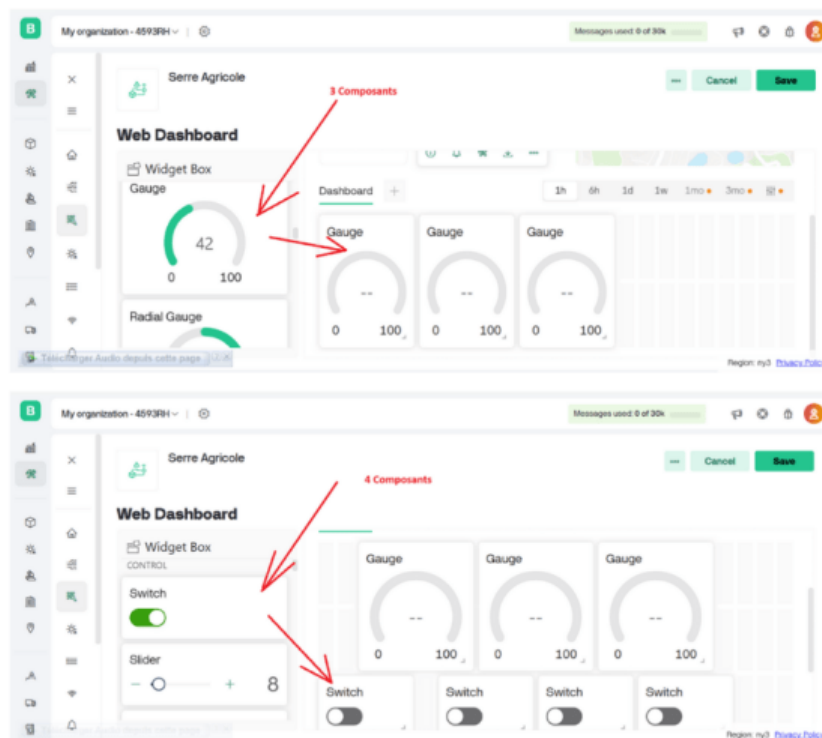


Figure III-23 Insertion des widgets.

- Liaison de chaque widget au DataStream défini et sauvegarde de l'interface graphique.

La liaison du widget au DataStream correspondant à la température (V0), suivie de la sauvegarde de l'interface graphique, constitue une étape essentielle de la configuration ; cette procédure est répliquée de manière identique pour les autres paramètres du système.

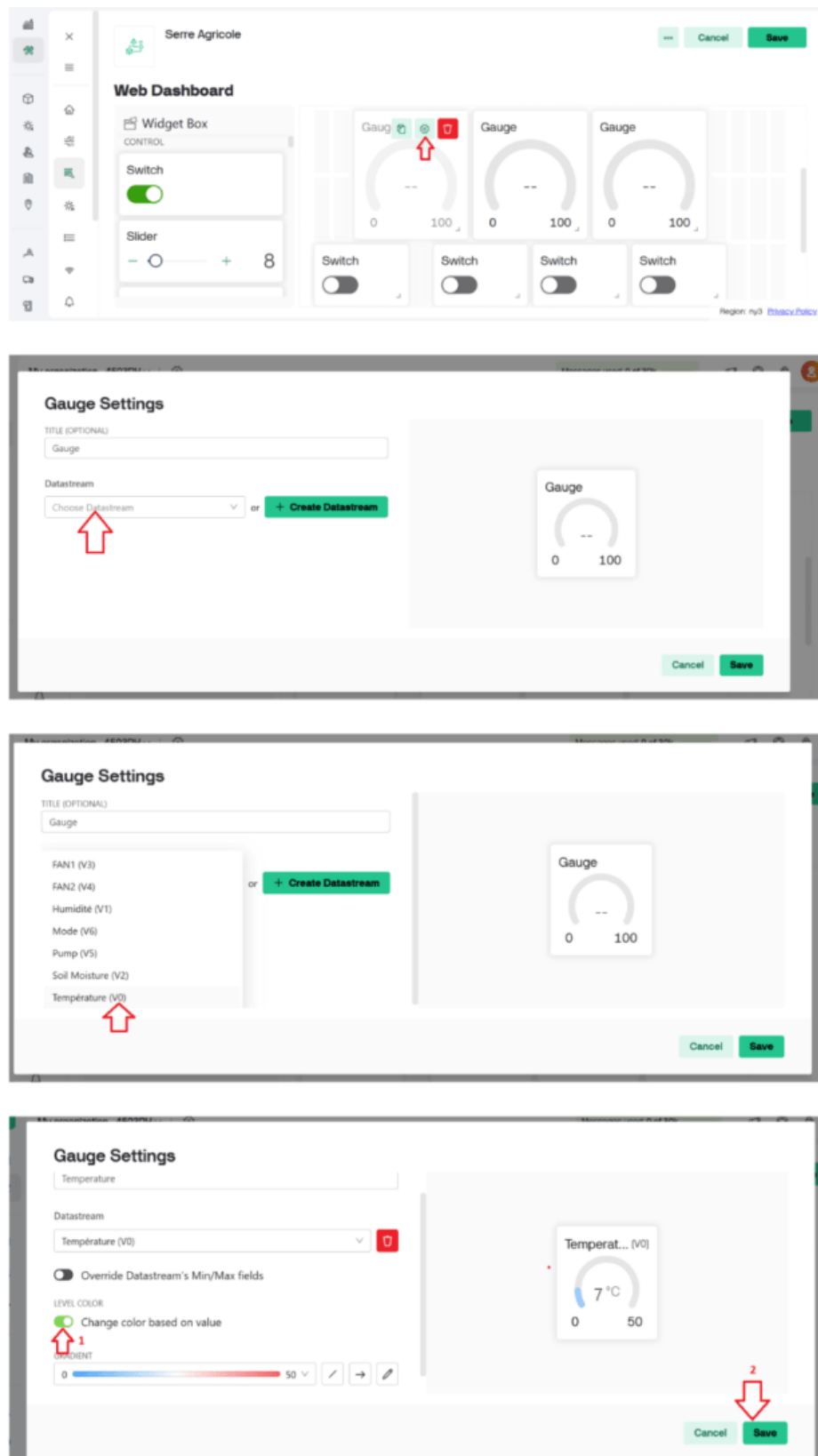


Figure III-24 Configuration des widgets Blynk liés aux DataStreams et sauvegarde du tableau de bord.

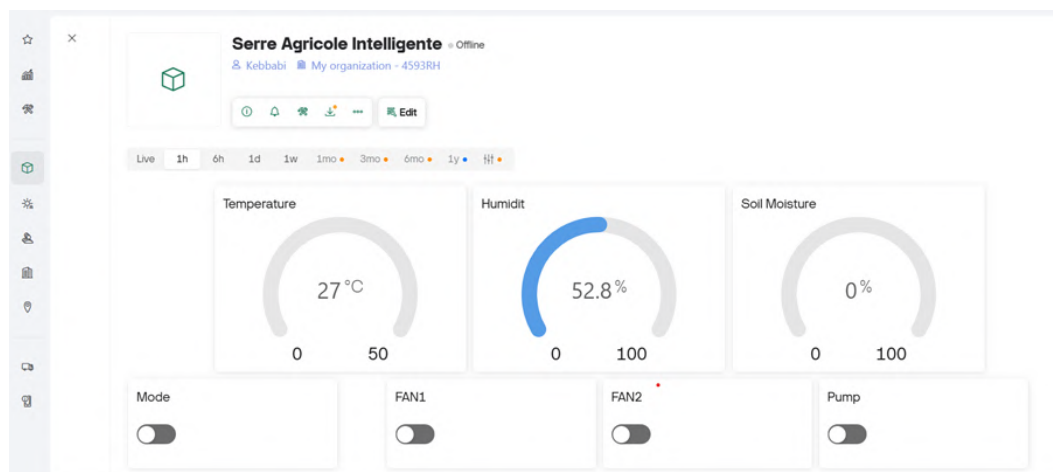


Figure III-25 Interface Web Dashboard complète configurée sur Blynk.

↳ **Remarque :** Il est également possible d'effectuer l'ensemble des étapes de création de compte, de configuration du projet, de définition des DataStreams, ainsi que la conception de l'interface (ajout et liaison des widgets) directement via l'application mobile Blynk, en suivant les mêmes principes que ceux appliqués sur la version web.

III.5.1 Accéder au projet Blynk Web depuis l'application mobile

Après la configuration complète du projet sur la plateforme web Blynk, il est possible de visualiser et de contrôler le même système depuis l'application mobile Blynk IoT, grâce à la synchronisation automatique des données via le cloud. Les étapes sont les suivantes :

- 1) Téléchargement et installation de l'application mobile Blynk IoT, disponible sur Android et iOS.



Figure III-26 L'installation de l'application Blynk IoT.

- 2) Connexion avec les mêmes identifiants que ceux utilisés sur la plateforme web (adresse e-mail et mot de passe).
- 3) Accès au projet (Device) : le périphérique créé sur le Web Dashboard est automatiquement détecté et affiché.

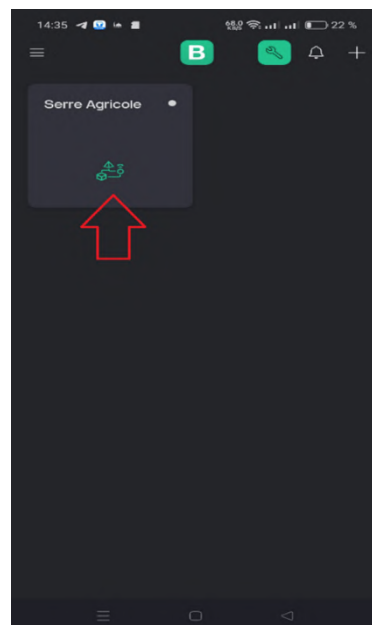


Figure III-27 Accès au projet via l'application mobile.

- 4) Affichage de l'interface : les widgets configurés (jauges, boutons, interrupteurs) sont accessibles en temps réel pour consulter les mesures des capteurs et commander les actionneurs.
- 5) Contrôle à distance : toutes les fonctionnalités du système (lecture des capteurs, activation des relais, sélection du mode) sont disponibles sur mobile avec une interaction fluide.

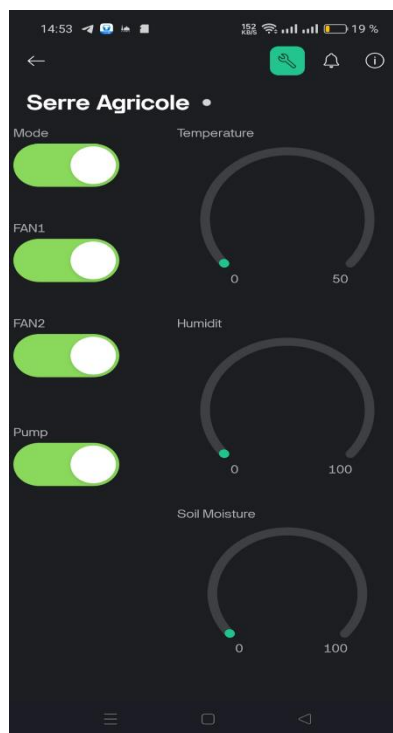


Figure III-28 Interface du projet via l'application Blynk IoT.

III.6 Intégration matérielle

III.6.1 Montage électrique

Dans la phase de simulation, l'alimentation des actionneurs avait été modélisée via un hacheur (convertisseur DC-DC), simulant une source continue issue d'une batterie. Lors du passage à la réalisation physique, l'architecture d'alimentation a été repensée afin d'assurer à la fois la fiabilité et la continuité de service du système.

Un convertisseur à découpage SMPS (Switch Mode Power Supply) a été intégré pour convertir le secteur 220 V AC en 12 V DC stabilisé, servant à alimenter le module relais et la pompe à eau. En parallèle, les ventilateurs 12 V restent directement alimentés par une batterie 12 V, garantissant leur fonctionnement continu, indépendamment de la disponibilité

du réseau électrique.

Le hacheur est maintenu dans l'architecture en tant que solution de secours, permettant d'assurer l'alimentation de l'ensemble du système en cas de coupure de courant, via basculement sur la batterie. Cette redondance permet de sécuriser le fonctionnement du système hydroponique, même dans des conditions d'instabilité électrique.

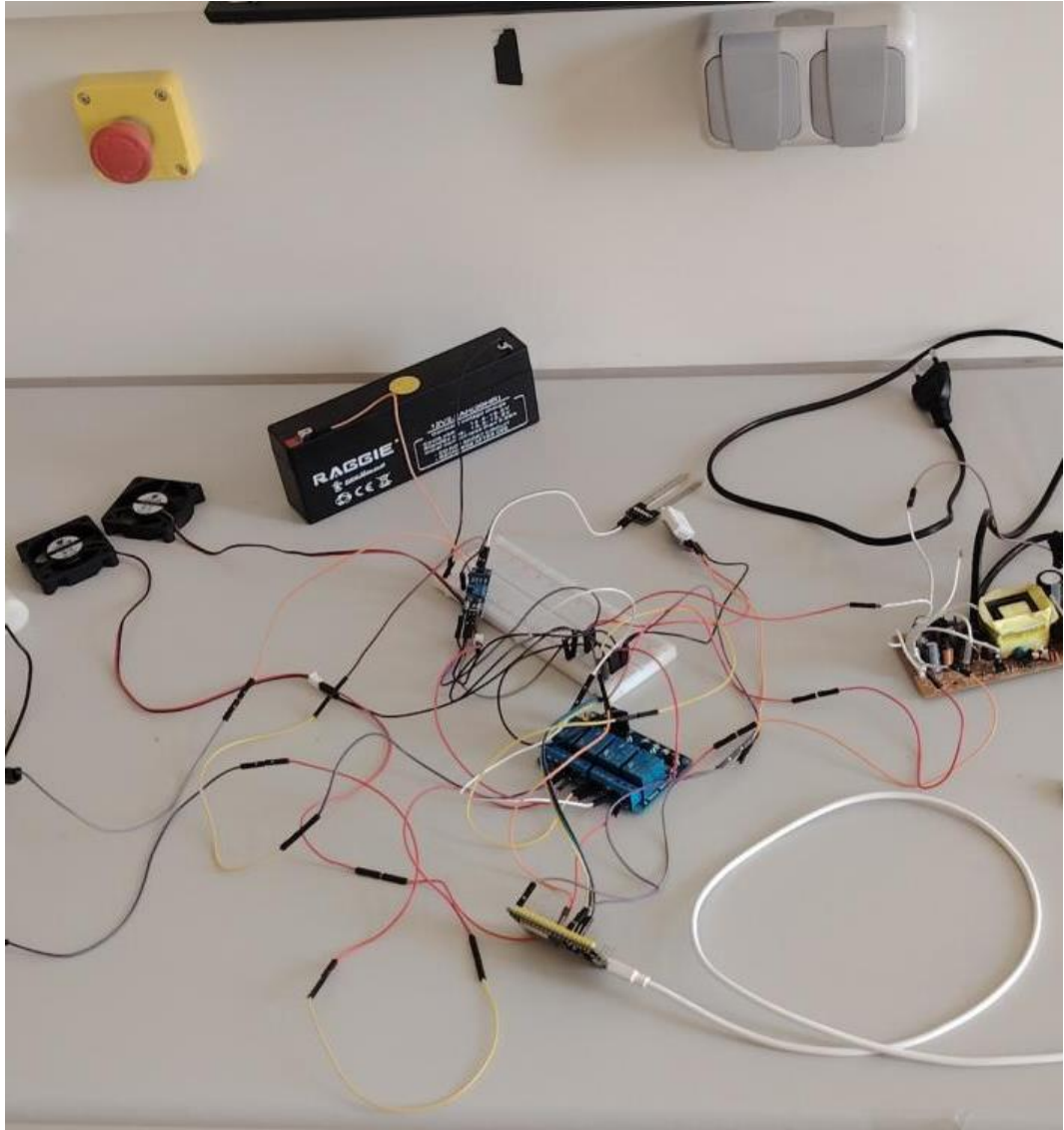


Figure III-29 Réalisation réelle de la partie électrique.

III.6.2 Réalisation du la serre agricole

Figure III-30 Serre agricole réalisée.

III.7 Présentation des résultats**III.7.1 Résultats du contrôle de la température**

Le capteur DHT22 a été connecté pour mesurer la température et relié au

microcontrôleur ESP32, qui active les deux ventilateurs lorsque la température est inférieure à la consigne prédéfinie (32°C).

Ce test vise à confirmer la fonctionnalité et la calibration initiale des capteurs. L'affichage des données brutes de température et d'humidité du DHT22 sur Arduino permet de vérifier la communication entre le capteur et le microcontrôleur. Les valeurs obtenues reflètent les conditions environnementales ambiantes non régulées. Ce processus constitue une étape de validation fondamentale avant d'intégrer le capteur dans une boucle de contrôle active.

```

sketch_jun20e.ino
99
100 // Fonction de démarrage
101 void setup() {
102   Serial.begin(115200);           // Initialisation de la communication série
103   dht.begin();                  // Initialisation du capteur DHT
104
105   pinMode(FAN1_PIN, OUTPUT);     // Définir la broche du ventilateur 1 comme sortie
106   pinMode(FAN2_PIN, OUTPUT);     // Définir la broche du ventilateur 2 comme sortie
107   pinMode(PUMP_PIN, OUTPUT);     // Définir la broche de la pompe comme sortie
108
109   Blynk.begin(BLYNK_AUTH_TOKEN, ssid, pass); // Connexion à Blynk via WiFi
110 }
111
112 void loop() {
113   // Lecture des données du capteur DHT22
114   float temperature = dht.temperature();
115   float humidity = dht.humidity();
116   int sol = 0;
117
118   // Affichage des données dans le moniteur série
119   Serial.print("Données des capteurs:");
120   Serial.print("Temp: ");
121   Serial.print(temperature);
122   Serial.print(" °C | Hum: ");
123   Serial.print(humidity);
124   Serial.print(" % | Sol: ");
125   Serial.print(sol);
126   Serial.print(" %");
127   Serial.println();
128
129   // Délai de 2 secondes entre deux lectures
130   delay(2000);
131 }
  
```

Output Serial Monitor X

Message (Enter to send message to 'ESP32 Dev Module' on 'COM3')

Données des capteurs:
Temp: 29.80 °C | Hum: 85.10 % | Sol: 0 %
Mode: Automatique

Données des capteurs:
Temp: 30.10 °C | Hum: 88.20 % | Sol: 0 %
Mode: Automatique

Données des capteurs:
Temp: 30.30 °C | Hum: 90.50 % | Sol: 0 %
Mode: Automatique

Figure III-31 Affichage des données dans des conditions climatiques optimales.

➤ Interprétation

Cette phase permet d'évaluer la capacité du système à maintenir une température ambiante inférieure à la consigne fixée de 32 °C. La stabilité des relevés dans ces conditions témoigne de l'efficacité du système de régulation thermique, assuré par les ventilateurs et extracteurs. Ces résultats valident la logique de commande et confirment l'aptitude du système à créer un environnement favorable à la croissance des cultures.

- La température $\geq 32^{\circ}\text{C}$

`bool fan1State = (temperature > 32); // Ventilateur 1 : ON si T°C > 32`

`bool fan2State = (temperature > 32); // Ventilateur 2 : ON si T°C > 32`

Donc :

`fan1State = true (car 33.3 > 32)`

`fan2State = true (car 33.3 > 32)`

Alors :

État Ventilateur 1 : ON

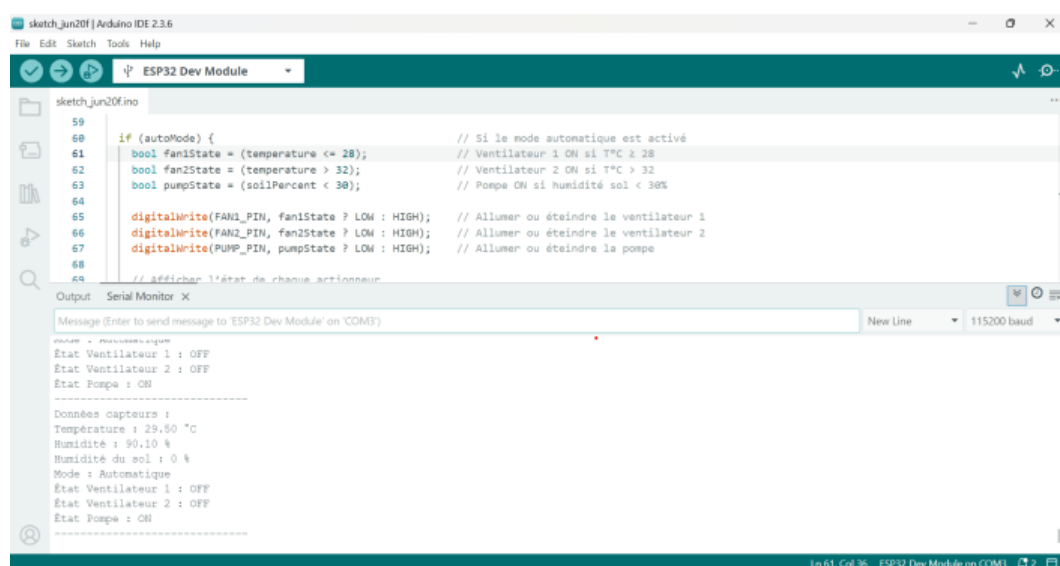
État Ventilateur 2 : ON

➤ Interprétation

Ce test évalue la capacité du système à réagir efficacement en situation de surchauffe. La température mesurée étant supérieure à la consigne de 32 °C, les deux ventilateurs sont activés simultanément, démontrant une détection précise du dépassement du seuil critique. La réponse immédiate des actionneurs témoigne de la bonne réactivité du système de régulation. La réduction progressive de la température vers des valeurs plus proches de l'optimum confirme l'efficacité du dispositif à maintenir un microclimat stable, limitant ainsi les risques de stress thermique pour les cultures.

III.7.2 Résultats du contrôle de l'humidité du sol

Un capteur d'humidité du sol de type résistif a été utilisé. Lorsque le niveau d'humidité descend en dessous d'un seuil critique (ex. 30%), une pompe est activée pour irriguer le sol.



```

59
60 if (autoMode) {
61   bool fan1State = (temperature <= 28); // Si le mode automatique est activé
62   bool fan2State = (temperature > 32); // Ventilateur 1 ON si T°C ≤ 28
63   bool pumpState = (soilPercent < 30); // Ventilateur 2 ON si T°C > 32
64                                     // Pompe ON si humidité sol < 30%
65
66   digitalWrite(FAN1_PIN, fan1State ? LOW : HIGH); // Allumer ou éteindre le ventilateur 1
67   digitalWrite(FAN2_PIN, fan2State ? LOW : HIGH); // Allumer ou éteindre le ventilateur 2
68   digitalWrite(PUMP_PIN, pumpState ? LOW : HIGH); // Allumer ou éteindre la pompe
69
70   // Afficher l'état de chaque actionneur
71 }
  
```

Output Serial Monitor X

Message (Enter to send message to 'ESP32 Dev Module' on 'COM3')

```

État Ventilateur 1 : OFF
État Ventilateur 2 : OFF
État Pompe : ON

Données capteurs :
Température : 29.50 °C
Humidité : 90.10 %
Humidité du sol : 0 %
Mode : Automatique
État Ventilateur 1 : OFF
État Ventilateur 2 : OFF
État Pompe : ON
  
```

Figure III-32 Humidité du sol inférieure au seuil minimal.

```

59
60 if (autoMode) {
61   bool fan1State = (temperature <= 28); // Ventilateur 1 ON si T°C > 28
62   bool fan2State = (temperature > 32); // Ventilateur 2 ON si T°C > 32
63   bool pumpState = (soilPercent < 30); // Pompe ON si humidité sol < 30%
64
65   digitalWrite(FAN1_PIN, fan1State ? LOW : HIGH); // Allumer ou éteindre le ventilateur 1
66   digitalWrite(FAN2_PIN, fan2State ? LOW : HIGH); // Allumer ou éteindre le ventilateur 2
67   digitalWrite(PUMP_PIN, pumpState ? LOW : HIGH); // Allumer ou éteindre la pompe
68
69   // Afficher l'état de chaque actionneur
70 }

```

Output Serial Monitor X

Message (Enter to send message to 'ESP32 Dev Module' on 'COM3')

État Ventilateur 1 : OFF
 État Ventilateur 2 : OFF
 État Pompe : OFF

Données capteurs :
 Température : 30.40 °C
 Humidité : 43.60 %
 Humidité du sol : 71 %
 Mode : Automatique
 État Ventilateur 1 : OFF
 État Ventilateur 2 : OFF
 État Pompe : OFF

Figure III-33 Humidité du sol au seuil optimal.

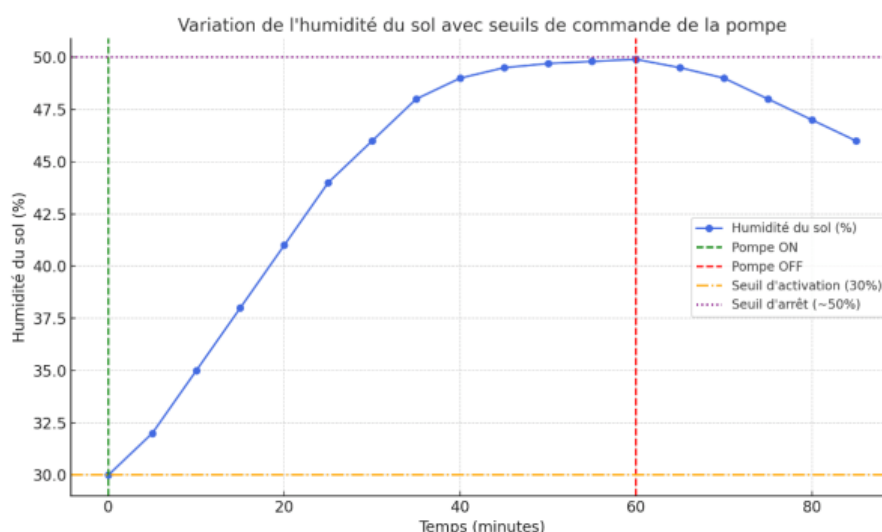


Figure III-34 Variation de l'humidité du sol avec seuils de commande de la pompe.

L'humidité est remontée à un niveau acceptable après activation de la pompe, prouvant l'efficacité du système.

III.7.3 Résultats du contrôle et de la surveillance à distance

Une interface a été conçue sur le téléphone mobile et l'ordinateur pour afficher les valeurs en temps réel de la température et de l'humidité du sol, avec la possibilité d'activer ou de désactiver les dispositifs manuellement.

Le contrôle à distance a été un succès, les commandes ont été exécutées rapidement, sauf quelques retards occasionnels dus à un faible signal Wi-Fi.



Figure III-35 Interface d'affichage des valeurs en temps réel sur le téléphone en mode automatique.



Figure III-36 Contrôle manuel depuis l'application mobile (mode manuel).

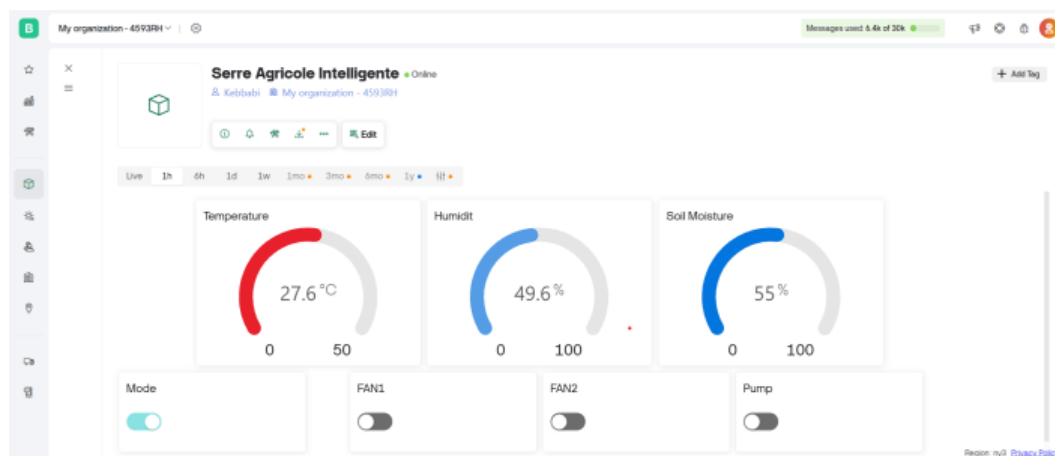


Figure III-37 Interface d'affichage des valeurs en temps réel sur l'ordinateur (mode automatique).

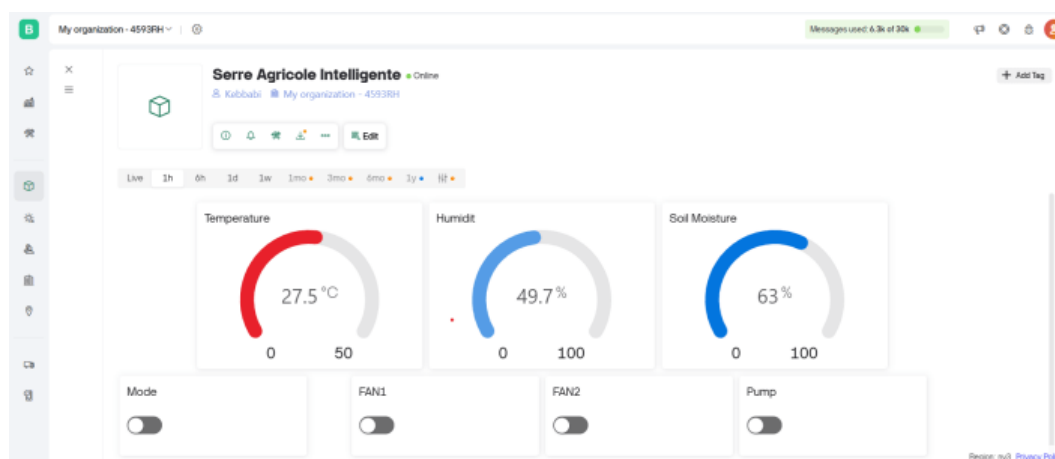


Figure III-38 Contrôle manuel du système depuis l'interface PC (mode manuel).

Le système a répondu correctement aux commandes, avec parfois un léger délai dû à la qualité du réseau Wi-Fi.

Analyse des résultats

Globalement, le système a montré une bonne réactivité et fiabilité. Les capteurs ont fourni des données précises, et les actionneurs ont bien fonctionné.

Cependant, certaines limites ont été observées :

- ✗ Des délais de réponse lors de la commande à distance (dépendance au Wi-Fi).
- ✗ Le capteur résistif est sensible à l'eau et peut se dégrader rapidement.
- ✗ Les composants nécessitent une meilleure protection contre l'humidité et la poussière.

➤ Comparaison avec les objectifs

Les objectifs fixés au début du projet étaient :

- ✓ Surveillance de la température et de l'humidité.
- ✓ Irrigation automatique du sol.
- ✓ Contrôle et surveillance à distance via une application mobile.

Tous ces objectifs ont été atteints, bien que certains aspects techniques puissent encore être optimisés.

➤ Suggestions d'amélioration

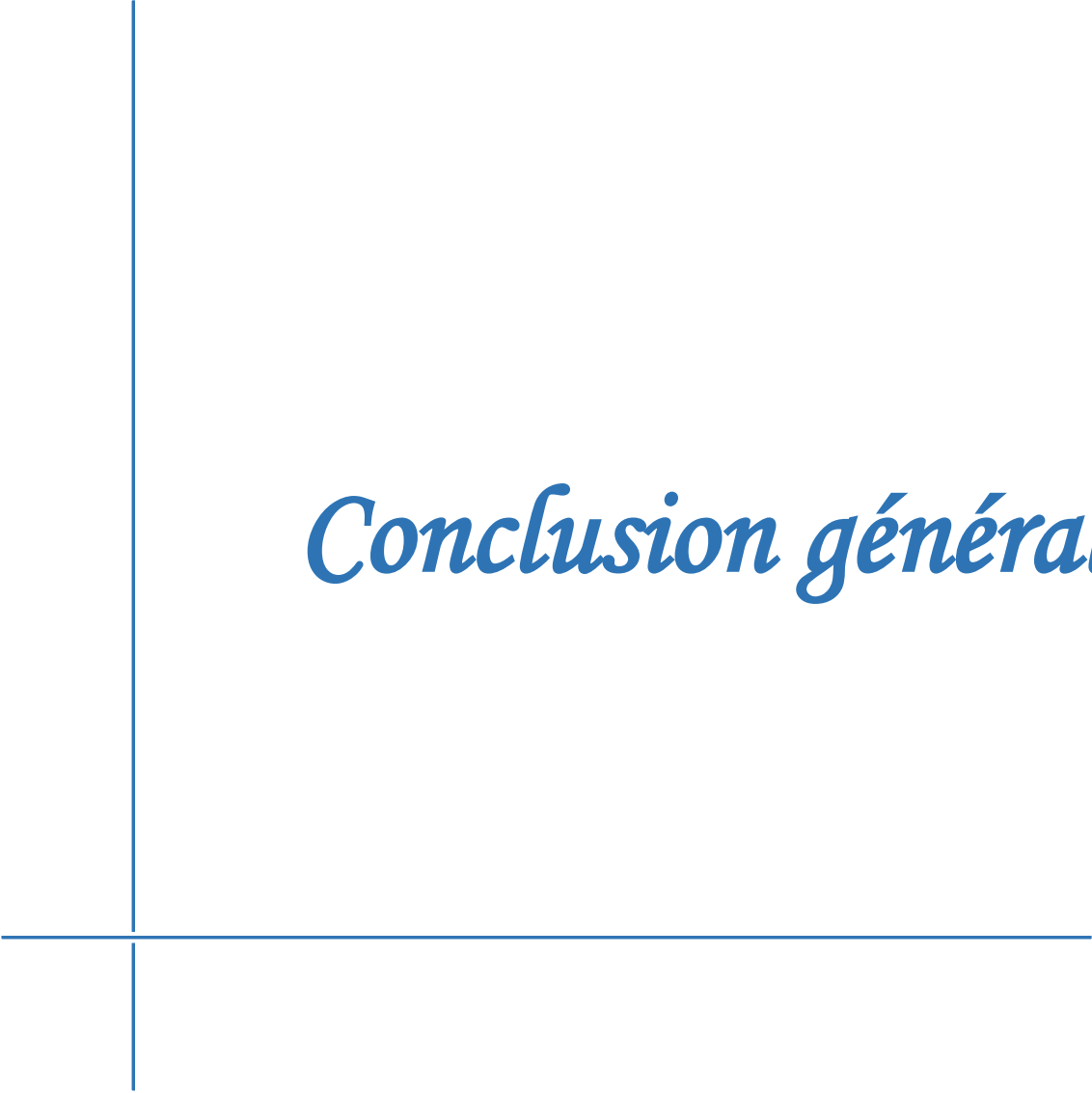
- ✚ Remplacer le capteur d'humidité du sol par un capteur capacitif plus fiable.
- ✚ Ajouter un écran OLED pour afficher les données localement.
- ✚ Améliorer l'isolation des composants électroniques.
- ✚ Utiliser une alimentation solaire pour plus d'autonomie.
- ✚ Développer une application mobile plus avancée avec alertes automatiques.

III.8 Conclusion

Ce chapitre a marqué la transition entre la phase conceptuelle et la validation fonctionnelle du système hydroponique automatisé. La simulation réalisée sous Proteus et Arduino IDE a permis de tester avec précision le comportement attendu des capteurs, des relais et des actionneurs. L'intégration de la carte ESP32 a élargi les fonctionnalités du système en apportant la connectivité Wi-Fi et le contrôle à distance via l'application mobile Blynk.

Parallèlement, la modélisation électronique à l'aide de Fritzing a facilité la conception du câblage et sa mise en œuvre réelle. L'assemblage matériel final a ainsi permis de concrétiser le prototype dans un environnement physique, validant la faisabilité technique de la solution proposée.

Les résultats obtenus confirment l'efficacité du système dans la gestion intelligente d'une serre agricole, en assurant un environnement optimal pour les cultures tout en réduisant l'intervention humaine. Cette approche s'inscrit pleinement dans une démarche d'agriculture moderne, efficiente et durable.



Conclusion générale

Conclusion générale

Le présent travail a porté sur la conception et la réalisation d'un système hydroponique vertical automatisé, reposant sur une approche semi-hydroponique en boucle fermée et basé sur une irrigation goutte à goutte, visant à répondre aux enjeux actuels d'optimisation de l'espace, de gestion de l'eau et d'amélioration de la productivité agricole. Grâce à l'utilisation d'un substrat comme support racinaire, ce système permet une réduction significative du volume de solution nutritive circulante, tout en garantissant un bon développement des cultures.

L'adoption d'une architecture verticale permet de maximiser l'utilisation de l'espace disponible, avec un gain estimé allant jusqu'à 10 fois par rapport à une culture en pleine terre, tout en réduisant la consommation d'eau de près de 95 % grâce au recyclage en circuit fermé.

L'implémentation d'un système de surveillance et de commande automatisé basé sur une carte ESP32, combiné à des capteurs environnementaux (température, humidité de l'air, humidité du sol) et des actionneurs (ventilateurs, pompe), a permis de maintenir les paramètres climatiques dans des plages favorables à la croissance des plantes. L'analyse des quatre états simulés a confirmé la robustesse de la logique de commande mise en place.

Les résultats expérimentaux ont validé la fiabilité du système, la précision des capteurs, et la réactivité des actionneurs, tout en confirmant la cohérence de l'affichage et du fonctionnement global, aussi bien en mode automatique qu'en mode manuel via l'application Blynk.

En définitive, ce projet représente une avancée concrète vers une agriculture intelligente, économe en ressources et adaptée aux petites surfaces urbaines ou périurbaines, tout en posant les bases pour des améliorations futures telles que l'intégration de capteurs plus précis, d'énergies renouvelables ou de mécanismes d'alerte automatisés.

Références bibliographiques

- [1] Douglas, James Sholto, *Advanced Guide to Hydroponics (Soilless Cultivation)*, 2^e éd., Londres : Michael Joseph, 1985, pp. 21–24.
- [2] Bakker, « Dernière tendance de culture des plantes d'intérieur : découvrez l'hydroponie », *Blog Bakker*, 15 décembre 2021. [En ligne]. Disponible sur : <https://fr-ch.bakker.com/blogs/plantes-dinterieur/l-hydroponie-la-derniere-tendance-de-culture> (consulté le 15 mars 2025).
- [3] Hershey, David R., « Solution Culture Hydroponics: History & Inexpensive pment », *The American Biology Teacher*, vol. 56, n° 2, février 1994, pp. 111– [En ligne]. Disponible sur : <https://doi.org/10.2307/4449764> (consulté le 8 2025).
- [4] Hoagland, Dennis Robert et Daniel Israel Arnon, *The Water-Culture Method for Growing Plants Without Soil*, rapport scientifique, Circular 347, California Agricultural Experiment Station, University of California, College of Agriculture, Berkeley, 1950.
- [5] Boufrah, Khadidja et Slimani, Nadia, *La culture hydroponique comme solution pour une meilleure utilisation de l'eau et des engrais*, mémoire de master, Université d'El Oued, 2019.
- [6] Guernine, Omar, *Les cultures hors sol : Hydroponie – Aquaponie – Bioponie – Aéroponie – Biodynamie – NFT...*, autoédition, 2021.
- [7] Cooper, A. J., *The ABC of NFT: Nutrient Film Technique*, London : Grower Books, 1979.
- [8] Dreschel, T., M. Nugent, O. Monje et L. Spencer, « *Hydroponics for Food Production in Space: History and Current Efforts* », communication présentée à la *2018 International Space Station Research and Development Conference (ISS R&D)*, San Francisco, Californie (États-Unis), 23 juillet 2018.

- Contributeurs de Wikipédia, « *Historical hydroculture* », *Wikipédia*, 4 juin 2024. [En ligne]. Disponible sur :
 [9] https://en.wikipedia.org/wiki/Historical_hydroculture (consulté le 8 mars 2025).
- Thiault, J., « La maîtrise de la culture hors sol », *Bulletin Détail*, n° 1215, 2004.
 [10]
- Habbas, Mahdjouba, *Essai de quelques cultures sous un système hydroponique dans la région de Biskra*, mémoire de master, Université Mohamed Khider de Biskra, 2018. [En ligne]. Disponible sur :
 [11] http://archives.univ-biskra.dz/bitstream/123456789/11036/1/HABBAS_Mahdjouba.pdf (consulté le 12 avril 2025).
- Belbachir, Mohammed Mehdi, *Production de fourrage par techniques hydroponiques : cas de l'orge à Sidi Mdjahed, commune de Beni Boussaïd*, mémoire de master, Université Abou Bekr Belkaïd – Tlemcen, 2017. [En ligne]. Disponible sur :
 [12] <http://dspace.univ-tlemcen.dz/bitstream/112/12022/1/Belbachir.pdf> (consulté le 5 mars 2025).
- Kasmi, Maroua et Fella Tayar, *Valorisation du Ghott par système hydroponique (cas de Kouinine)*, mémoire de master, Université Echahid Hamma Lakhdar – El Oued, 2019.
 [13]
- Bendiff, Abderrahmane, *Étude comparative de différents substrats pour la production de tomate hors sol*, mémoire de master, Université Abdelhamid Ibn Badis – Mostaganem, 2016. [En ligne]. Disponible sur :
 [14] <http://e-biblio.univ-mosta.dz/bitstream/handle/123456789/7231/BENDIFF%20Abderrahmane.pdf> (consulté le 22 mars 2025).
- Chouard, P. et V. Renaud, « Mise au point de cultures hydroponiques au Sahara : premiers résultats obtenus », *Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie d'Agriculture de France*, vol. 47, 1961, pp. 922–1013.
 [15]
- Ammari, Amina et Ikram Khelil, *Essai sur la culture de laitue (Lactuca sativa) sous un système hydroponique dans la région de Ouargla*, mémoire de master, Université Kasdi Merbah – Ouargla, 2020. [En ligne]. Disponible sur
 [16]

- : <https://dspace.univ-ouargla.dz/jspui/bitstream/123456789/28524/3/Ammari-Khelil.pdf> (consulté le 20 Mars 2025).
- [17] Resh, Howard M., *Hydroponic Food Production: A Definitive Guidebook for the Advanced Home Gardener and the Commercial Hydroponic Grower*, 8^e éd., Boca Raton (Floride) : CRC Press (Groupe Taylor & Francis), 2022.
- [18] Sonneveld, C. et W. Voogt, *Plant Nutrition of Greenhouse Crops*, 1^{re} éd., Dordrecht (Pays-Bas) : Springer, 2009.
- [19] Samarakoon, U. C., P. A. Weerasinghe et W. A. P. Weerakkody, « Effect of electrical conductivity (EC) of the nutrient solution on nutrient uptake, growth and yield of leaf lettuce (*Lactuca sativa* L.) in stationary culture », *Tropical Agricultural Research*, vol. 18, 2006, pp. 13–21.
- [20] Shelby, J. P., *Guide to Hydroponics*, 1^{re} éd., autoédition, 2020.
- [21] Bouhadj, H., *Amélioration et stimulation de la croissance végétative par le procédé fert-irrigation en arido-culture*, mémoire de magistère, INA (Algérie), 2008.
- [22] C. Levine et N. Mattson, « Potassium-deficient nutrient solution affects the yield, morphology, and tissue mineral elements for hydroponic baby leaf spinach (*Spinacia oleracea* L.) », *Horticulturae*, vol. 7, n° 18, juillet 2021, p. 213. [En ligne]. Disponible sur : <https://doi.org/10.3390/horticulturae7080213> (consulté le 7 Mai 2025).
- [23] Yang, T., U. Samarakoon, J. Altland et P. Ling, « Photosynthesis, biomass production, nutritional quality, and flavor-related phytochemical properties of hydroponic-grown arugula (*Eruca sativa* Mill.) ‘Standard’ under different electrical conductivities of nutrient solution », *Agronomy*, vol. 11, n° 7, juillet 2021, p. 1340. [En ligne]. Disponible sur : <https://doi.org/10.3390/agronomy11071340>.
- [24] Valentinuzzi, F., Y. Pii, G. Vigani, M. Lehmann, S. Cesco et T. Mimmo, « Phosphorus and iron deficiencies induce a metabolic reprogramming and affect the exudation traits of the woody plant *Fragaria × ananassa* », *Journal of Experimental Botany*, vol. 66, n° 20, septembre 2015, pp. 6483–6495. [En

ligne]. Disponible sur : <https://doi.org/10.1093/jxb/erv364>.

Trejo-Téllez, L. I., F. C. Gómez-Merino et T. Asao, « Nutrient solutions
[25] for hydroponic systems », in *Hydroponics: A Standard Methodology for Plant Biological Researches*, 1^{re} éd., Rijeka (Croatie) : InTech, 2007, pp. 1–22.

Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture
[26] (FAO), *Notions de nutrition des plantes et de fertilisation des sols*, rapport technique, Projet Intrants FAO, Rome (Italie), 2005.

Fevereau, J., « Culture en containers », *Revue Horticole*, n° 114, s. d.,
[27] pp. 68–75.

Freepik, « Images utilisées pour illustrer les substrats et systèmes
[28] hydroponiques, » 2024. [En ligne]. Available: <https://www.freepik.com>.
[Accès le 3 Mai 2025].

Green, R. *HYDROPONICS FOR BEGINNERS: Ultimate 2021 Guide To Grow Indoor Your Favorite Vegetables Without Soil. All Details to Build
[29] Your DIY Hydroponics System and Cuddle Your “LITTLE GIRLS”*. 1^{ère} édition. Auto-édition, 2021.

Bennett, M., *Hydroponics and Raised Bed Gardening: 2 Manuscripts in 1: The Essential Guide to Learn Everything You Need About Hydroponic
[30] Systems and Raised Bed Gardens for Home Growing Fresh and Healthy Vegetables, Herbs and Fruits*, 1^{re} éd., [s. l.] : [s. n.], 2020.

[31] Colton, M., *Hydroponics for Beginners*, 1^{re} éd., autoédition, 2021.

Velazquez-Gonzalez, R. S., A. L. Garcia-Garcia, E. Ventura-Zapata, J. D. O. Barceinas-Sanchez et J. C. Sosa-Savedra, « *A Review on Hydroponics
[32] and the Technologies Associated for Medium- and Small-Scale Operations* », *Agriculture*, vol. 12, n° 15, 2022, p. 646. [En ligne]. Disponible sur :
<https://doi.org/10.3390/agriculture12050646>.

Darling, L., *Hydro Aqua Aero Ponics: 3 Books in 1 — The Ultimate
[33] Guide to Grow Your Own Hydroponic, Aquaponic, Aeroponic Garden at Home*, 1^{re} éd., autoédition, 2019.

Goddek, S., A. Joyce, B. Kotzen et G. Burnell, *Aquaponics Food
[34] Production Systems: Combined Aquaculture and Hydroponic Production*

Technologies for the Future, Cham (Suisse) : Springer Nature, 2019.

- [35] Bhargava, G., « *Future Prospects of Vertical and Hydroponic Farming* », octobre 2022. [En ligne]. Disponible sur : https://www.researchgate.net/publication/364712866_Future_Prospects_of_Vertical_and_Hydroponic_Farming (consulté le 10 mai 2025).

- [36] Van Os, E., « *Comparison of Some Chemical and Non-Chemical Treatments to Disinfect a Recirculating Nutrient Solution* », in *International Symposium on Soilless Culture and Hydroponics*, 2009.

- [37] Guides, D., *Hydroponics: The Kratky Method. The Cheapest and Easiest Hydroponic System for Beginners Who Want to Grow Plants Without Soil*, [s. l.] : Publisher, 2020.

- [38] T. Staff, « *The Kratky Method – Grow Food the Passive Hydroponic Way (Step by Step Guide)* », 31 mai 2024. [En ligne]. Disponible sur : <https://www.trees.com/gardening-and-landscaping/the-gratky-method> (consulté le 20 avril 2025).

- [39] W. J. M. B. Semananda N., « *A semi-systematic review of capillary irrigation: the benefits, limitations, and opportunities* », *Horticulturae*, 2018.

- [40] G. Rajaseger, K. L. Chan, K. Y. Tan, S. Ramasamy, M. C. Khin, A. Amaladoss et K. H. Patel, « *Hydroponics: current trends in sustainable crop production* », *Bioinformation*, vol. 19, n° 19, p. 229, 30 septembre 2023.

- [41] N. Dubey et V. Nain, « *Hydroponic — The Future of Farming* », *International Journal of Environment, Agriculture and Biotechnology*, vol. 5, n° 13, 2020.

- [42] I. Boulhouache, *Optimisation des apports de biostimulants foliaires en système NFT (Nutrient Film Technique) : cas d'une plante herbacée*, mémoire de master, Université de Blida, 2020.

- [43] S. Elby, *Hydroponics: DIY Guide to Building a Complete and Cheap Hydroponics System*, autoédition, 2020.

- [44] S. Belsk, *Hydroponics: Collection Book*, [s. l.] : [s. n.], 2009.

- [45] A. Parr, *Hydroponics for Beginners : The Beginner's Guide to Building a Sustainable and Inexpensive Hydroponic System at Home – Learn How to Quickly Start Growing Plants in Water*, autoédition, 2022.

- [46] Schneider, J, et I Smalley. « Qu'est-ce qu'un microcontrôleur ? » IBM Think. Consulté le 8 avril 2025. <https://www.ibm.com/fr-fr/think/topics/microcontroller>.
- [47] Espressif Systems. « Module ». Document Web. Espressif Systems, 2023. Consulté le 25 Mai 2025. <https://www.espressif.com/en/products/modules>.
- [48] Espressif Systems, *ESP32 Technical Reference Manual*, version 5.4, manuel technique, 2023. [En ligne]. Disponible sur : https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_technical_reference_manual_en.pdf (consulté le 7 mai 2025).
- [49] E. Systems. « ESP32-WROOM-32 Datasheet v3.5 ». Fiche technique. Espressif Systems, 2023. Consulté le 07 Mai 2025. https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32-wroom-32_datasheet_en.pdf.
- [50] T. Liu. « DHT22 - Digital-output relative humidity & temperature sensor/module ». Fiche technique. Consulté le 1 juin 2025. <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/1132459/ETC2/DHT22.html>.
- [51] Blynk, « *Site officiel de Blynk* » [en ligne]. Disponible sur : <https://blynk.cloud> (consulté le 28 mai 2025).
- [52] J. Jones, *Hydroponics: A Practical Guide for the Soilless Grower*, 2^e éd., Boca Raton : CRC Press, 2014.
- [53] N. Gruda, « Soilless systems in urban areas », *Agronomy*, vol. 9, n° 6, p. 298, 2019.
- [54] A. a. K. P. Sani, « Role of Hydroponics in Improving Water-Use Efficiency and Food Security, » *International Journal of Environment and Climate Change*, pp. 123-134, 2024.

HydroponicShow. « 3 Steps To Accurately Measure Your Hydroponic Nutrient Solution ». Blog spécialisé en hydroponie. *HydroponicShow* (blog), [55] 26 février 2025. Consulté le 14 Avril 2025. <https://hydroponicshow.com/how-to-measure-hydroponic-nutrient-solution/>.

Raviv, M, et J. H Lieth. *Soilless Culture: Theory and Practice*. [56] Amsterdam: Elsevier, 2008.

Santosh, D. T, Sairam Masina, Dinkar J Gaikwad, et Sagar Maitra. *Advances in Hydroponic Systems: Types and Management*. New Delhi: New [57] Delhi Publishers, 2023.

Vitré, Alain, *Fondements et principes du hors-sol : Doc V 3.1 HRS 12* [58] *Ind A*, support pédagogique, 2003.

Letard, Michel, Pierre Erard, et Bernard Jeannequin. *Maîtrise de* [59] *l'irrigation fertilisante (tomate sous abris)*. Paris: CTIFL, 1995.

Simon, S, et J Minatchy. *Guide de la tomate hors sol à la Réunion*. [60] Montpellier: CIRAD, 2009.

Valérie, *Irrigation, substrats et fertilisation dans la culture hors-sol du* [61] *fraisier : des enjeux pour une production optimisée*, rapport technique, 2015.

William, T. *L'Hydroponie pour tous. 1ère édition. Paris, France:* [62] *Mama Éditions*, 2014.

A. Santos, L. Oliveira et C. Silva, « *Rice hulls and anaerobic digestion* [63] *residues as substrate components for soilless cultivation of geranium and rose* », *Agronomy*, vol. 10, n° 17, p. 950, 2020.

Zebar, Ahmed. *Influence du milieu de culture sur le rendement de la* [64] *pomme de terre : influence des milieux de cultures en hors sol sur le rendement de la pomme de terre*. Francophones, Presses Académiques, 2021.

[65] D. Titouna, *Étude numérique de la solution nutritive dans un milieu*

- poreux : cas de la laine de roche, thèse de doctorat, Université de Batna 2, 2011.
- J. Moinereau, P. Hermann, J. Favrot et L. Rivière, « *Les substrats : inventaires, caractéristiques, ressources* », in *Les cultures hors sol*, 1985, pp. 15–77.
- [66] P. Morard, *Les cultures végétales hors sol*, Toulouse : Publications agricoles, 1995.
- [67] D. Blanc, *Les cultures hors sol*, 1^{re} éd., Paris : INRA Éditions, 1987, 412 p.
- [68] H. M. Resh, *Hydroponic Food Production : A Definitive Guidebook of Soilless Food Growing Methods for the Professional and Commercial Grower and the Advanced Home Hydroponics Gardener*, 1^{re} éd., Santa Barbara : Woodbridge Press Publishing Company, 1978, 287 p.
- [69] E. H. Zaid, *Complément de cours de physiologie végétale*, Rabat : [s. n.], 2006.
- [70] F. B. Salisbury et C. W. Ross, *Plant Physiology*, 4^e éd., Belmont : Wadsworth Publishing Company, 1994.
- [71] Shutterstock, « *Growing watercress herbs in hydroponic system from seed* [photographie] », 2018. [En ligne]. Disponible sur : <https://www.shutterstock.com/image-photo/growing-watercress-herbs-hydroponic-system-seed-736143502> (consulté le 3 mai 2025).
- [72] W. Robert, « *Understanding pH for Hydroponics (A Complete Guide)* », 9 janvier 2022. [En ligne]. Disponible sur : <https://climatebiz.com/ph-for-hydroponics/> (consulté le 30 avril 2025).
- [73]

Résumé

Ce projet porte sur la conception et la réalisation d'une serre intelligente, capable d'être contrôlée manuellement ou automatiquement à l'aide de l'application mobile Blynk. L'objectif principal est de surveiller et de réguler les paramètres climatiques internes afin d'assurer un environnement optimal pour la croissance des plantes. Le système repose sur une unité de contrôle ESP32, reliée à des capteurs de température, d'humidité de l'air (DHT22) et d'humidité du substrat, permettant d'activer automatiquement une pompe d'irrigation, un ventilateur et un extracteur d'air selon les besoins.

Le projet s'appuie sur un modèle de culture semi-hydroponique verticale, reconnu pour sa capacité à augmenter la productivité jusqu'à 10 fois par rapport à l'agriculture conventionnelle, tout en réduisant la consommation en eau de 95 % grâce à un circuit de recyclage fermé. La programmation du microcontrôleur a été effectuée via Arduino, la simulation du système a été réalisée à l'aide du logiciel Proteus, et le schéma de câblage physique a été modélisé à l'aide de l'outil Fritzing.

Mots-clés : Agriculture intelligente, serre automatisée, ESP32, Arduino, Blynk, DHT22, pompe, ventilateur, extracteur d'air, Proteus, Fritzing, hydroponie verticale.

ملخص

يتناول هذا المشروع تصميم وإنجاز بيت محمي ذكي يمكن التحكم فيه يدويًا أو تلقائيًا باستخدام تطبيق الهاتف المحمول Blynk. يمثل الهدف الرئيسي في مراقبة وتنظيم المعايير المناخية الداخلية لضمان بيئة مثالية لنمو النباتات. يعتمد النظام على وحدة تحكم ESP32 متصلة بحساسات لدرجة الحرارة، ورطوبة الهواء (DHT22)، ورطوبة الوسط، مما يتيح التشغيل التلقائي لمضخة الري، والمروحة، ومستخرج الهواء عند الحاجة.

يرتكز المشروع على نموذج زراعة شبه مائية عمودية، يُعرف بقدرته على زيادة الإنتاجية بما يصل إلى 10 مرات مقارنة بالزراعة التقليدية، مع تقليص استهلاك المياه بنسبة 95% بفضل نظام تدوير مغلق. تمت برمجة وحدة ESP32 عبر Arduino، وتمت المحاكاة باستخدام برنامج Proteus، بينما تم تصميم مخطط التوصيلات الفيزيائي باستخدام أداة Fritzing.

الكلمات المفتاحية: الزراعة الذكية، بيت محمي آلي، ESP32، اردوينو، تطبيق Blynk، حساس DHT22، مضخة، مروحة، مستخرج هواء، بروتينوس، فريتزينغ، الزراعة المائية العمودية.

Abstract

This project focuses on the design and implementation of a smart greenhouse that can be controlled manually or automatically using the Blynk mobile application. The main

objective is to monitor and regulate internal climate parameters to ensure an optimal environment for plant growth. The system is based on an ESP32 control unit connected to sensors for temperature, air humidity (DHT22), and substrate moisture, allowing automatic activation of the irrigation pump, fan, and air extractor as needed.

The project adopts a vertical semi-hydroponic cultivation model, known for its ability to increase productivity up to 10 times compared to traditional farming, while reducing water consumption by 95% through a closed-loop recycling system. The ESP32 was programmed using Arduino , the system was simulated using Proteus, and the wiring layout was designed using Fritzing.

Keywords : Smart agriculture, automated greenhouse, ESP32, Arduino, Blynk, DHT22, pump, fan, air extractor, Proteus, Fritzing, vertical hydroponics.