



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Université Ghardaïa

de

Faculté des Sciences

et de la technologie



جامعة غرداية

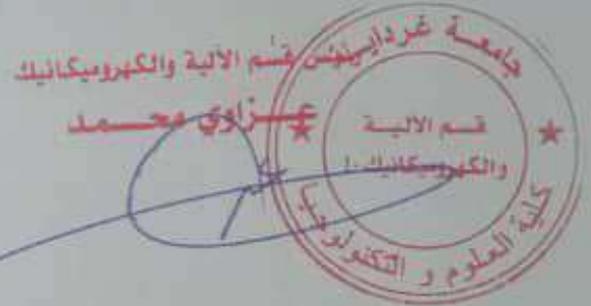
كلية العلوم والتكنولوجيا

قسم: الآلية

والكهروميكانيك

أشهد ان الطالب/الطالبة قد قام /قاموا بالتعديلات  
والتصحیحات المطلوبة من طرف لجنة المناقشة وقد تم التحقق من  
ذلك من طرفنا  
وقد استوفت جميع الشروط المطلوبة.

امضاء المسؤول عن التصحيح  
مصادقة رئيس القسم



Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur Et de La Recherche Scientifique



Université de Ghardaïa



Faculté des Sciences et Technologies  
Département de Automatique et électromécanique

Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de

## MASTER

**Domaine** : Sciences et Technologies

**Filière** : Automatique

**Spécialité** : Automatique et Systèmes

**Par** : BENKRID Mohammed Nadir

HADJ BRAHIM Moussa

## Thème

**Développement d'un Système Intelligent pour la Rationalisation de  
l'Irrigation Agricole**

Soutenu publiquement le : /06/2025

Devant le jury :

MOSBAH Said	MCB	Univ. Ghardaïa	<b>Président</b>
BELGACEM Bekkar	MCA	Univ. Ghardaïa	<b>Examineur</b>
MERRAKCHI Abdelhamid	MCA	Univ. Ghardaïa	<b>Examineur</b>
MOSBAH Charaf Abdelkarim	MCB	Univ. Ghardaïa	<b>Encadrant</b>
SAITI Aboubakr	MCA	Univ. Ghardaïa	<b>Co-Encadrant</b>

Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur Et de La Recherche Scientifique



Université de Ghardaïa

Faculté des Sciences et Technologies

Département de Automatique et électromécanique



Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de

## MASTER

**Domaine :** Sciences et Technologies

**Filière :** Automatique

**Spécialité :** Automatique et Systèmes

Mémoire de fin d'études pour l'obtention du diplôme de Master  
en Automatique et Systèmes, dans le cadre de l'arrêté ministériel

1275 – Diplôme de fin d'études -PME

## Thème

**Développement d'un Système Intelligent pour la Rationalisation de  
l'Irrigation Agricole**

**Soutenu publiquement le :30 /06/2025**

**Par :** BENKRID Mohammed Nadir  
HADJ BRAHIM Moussa

**Devant :** MOSBAH CHARAF ABDELKARIM

**Année universitaire 2024/2025**

---

# Remerciements

Avant tout, nous exprimons notre profonde gratitude à Allah, Le Très Miséricordieux, pour nous avoir accordé la force, la patience et la détermination nécessaires à l'accomplissement de ce modeste travail. Nous adressons nos sincères remerciements à nos encadrants, Dr. Mosbah Charaf Abdelkarim, Dr. Bouhoun Salah et Dr. Saiti Aboubakr, pour leur confiance, leur soutien constant et leurs conseils avisés, qui ont été essentiels à la réussite de ce projet. Nous remercions également les membres du jury pour l'intérêt porté à notre travail et pour l'avoir enrichi par leurs suggestions pertinentes. Nous exprimons aussi notre reconnaissance à l'ensemble des enseignants qui nous ont accompagnés tout au long de notre parcours académique, en partageant leur savoir et en nous soutenant avec bienveillance. Enfin, nous tenons à remercier toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce travail.

---

# Dédicace

Nous dédions ce travail modeste à nos chers parents, qui ont toujours été notre véritable soutien et notre première source d'encouragement, par leur amour inconditionnel, leurs innombrables sacrifices et leurs prières constantes qui nous ont accompagnés à chaque étape. À notre cher frère et à nos deux sœurs bien-aimées, pour leur encouragement sincère et leur présence rassurante, toujours source de force et de réconfort. Nous exprimons également notre profonde gratitude à l'ensemble de notre famille, pour leur confiance indéfectible et leur fierté envers chacun de nos pas, aussi simples soient-ils. Nos remerciements les plus sincères vont aussi à nos fidèles amis, qui nous ont accompagnés dans les moments de labeur comme dans les périodes de doute, et dont la présence a toujours été d'un grand soutien. Enfin, nous adressons cet hommage à toutes les personnes qui nous aiment, et que nous portons dans nos cœurs, en leur exprimant notre reconnaissance la plus profonde et notre gratitude la plus sincère

Moussa et Nadir

## الملخص :

يعرض هذا البحث تطوير وتنفيذ نظام ذكي يهدف إلى ترشيد عملية الري الزراعي. وانطلاقاً من التحديات المرتبطة بالإدارة المستدامة للمياه، يسعى هذا العمل إلى تصميم حل ذاتي التشغيل، اقتصادي، ومتكيف مع الاحتياجات الفعلية للميدان. يعتمد النظام على المتحكم الدقيق **ESP32**، ومستشعرات بيئية لقياس درجة الحرارة ورطوبة التربة والهواء، إضافة إلى واجهة تحكم عبر الهاتف المحمول باستخدام منصة **Blynk** لتتبع البنية المطورة جمع البيانات ومعالجتها في الزمن الحقيقي لتفعيل عملية الري تلقائياً وفق عتبات محددة مسبقاً. وقد أظهرت النتائج فعالية النموذج الأولي واستقراره، فضلاً عن أهميته في السياق الزراعي. ويتميز النهج المقترح بسهولة التطبيق، وانخفاض استهلاك الطاقة، وقابلية التكيف مع أنماط مختلفة من المحاصيل. وعليه، يندرج هذا المشروع في إطار تحديث القطاع الزراعي عبر دمج حلول تكنولوجية ذكية.

**الكلمات المفتاحية:** الري الذكي، **ESP32**، المستشعرات، الزراعة المستدامة، الأتمتة، إنترنت الأشياء (IoT) ، **Blynk**، ترشيد استهلاك المياه.

---

## Résumé

Ce mémoire présente le développement et la mise en œuvre d'un système intelligent destiné à la rationalisation de l'irrigation agricole. Face aux défis posés par la gestion durable de l'eau, notre travail vise à concevoir une solution autonome, économique et adaptée aux besoins réels du terrain. Le système repose sur l'utilisation du microcontrôleur ESP32, de capteurs environnementaux (température, humidité du sol et de l'air), ainsi que d'une interface mobile permettant un contrôle à distance via la plateforme Blynk. L'architecture développée permet de collecter et de traiter les données en temps réel afin de déclencher automatiquement l'irrigation selon des seuils préétablis. Les résultats obtenus démontrent l'efficacité du prototype, sa stabilité, ainsi que sa pertinence dans un contexte agricole. L'approche retenue allie simplicité de mise en œuvre, faible consommation énergétique et potentiel d'adaptation à différents types de cultures. Ce projet s'inscrit ainsi dans une perspective de modernisation de l'agriculture à travers l'intégration de solutions technologiques intelligentes. Mots-clés : Irrigation intelligente, ESP32, capteurs, agriculture durable, automatisation, Internet des objets (IoT), Blynk, économie d'eau

**Mots-clés :** Irrigation intelligente, ESP32, capteurs, agriculture durable, automatisation, Internet des objets (IoT), Blynk, économie d'eau.

## Abstract

This thesis presents the development and implementation of an intelligent system designed to optimize agricultural irrigation. In response to the growing challenges of sustainable water management, our work aims to provide an autonomous, cost-effective, and field-adapted solution. The system is based on the ESP32 microcontroller, environmental sensors (temperature, soil and air humidity), and a mobile interface for remote control using the Blynk platform. The proposed architecture enables real-time data acquisition and processing to automatically trigger irrigation based on predefined thresholds. The results demonstrate the prototype's effectiveness, stability, and relevance in an agricultural context. The approach combines ease of implementation, low power consumption, and flexibility to suit different crop types. This project contributes to the modernization of agriculture through the integration of intelligent technological solutions.

**Keywords :** Smart irrigation, ESP32, sensors, sustainable agriculture, automation, Internet of Things (IoT), Blynk, water-saving.

# Table des matières

<b>Remerciements</b>	<b>ii</b>
<b>Dédicace</b>	<b>iii</b>
<b>Résumé</b>	<b>iv</b>
<b>Table des figures</b>	<b>viii</b>
<b>Liste des tableaux</b>	<b>x</b>
<b>Introduction Generale</b>	<b>1</b>
<b>1 Défis de la gestion durable de l'eau en agriculture</b>	<b>3</b>
1.1 L'eau, une ressource vitale pour l'humanité.....	4
1.1.1 Disponibilité mondiale et pressions croissantes .....	5
1.1.2 Enjeux pour les générations futures .....	7
1.1.3 Le rôle de l'eau dans le développement durable .....	7
1.2 La sécurité alimentaire et l'enjeu de l'irrigation.....	9
1.2.1 Dépendance agricole vis-à-vis de l'eau .....	9
1.2.2 Irrigation traditionnelle vs. irrigation moderne.....	11
1.2.3 Conséquence du gaspillage de l'eau sur la production agricole	11
1.3 Agriculture intelligente (Smart Agriculture).....	12
1.3.1 Capteurs, IoT et systèmes de monitoring.....	13
1.3.2 Big Data et aide à la décision .....	13
1.4 Automatisation dans le secteur agricole.....	14
1.4.1 Rôle de l'automatique dans la gestion de l'eau.....	14
1.4.2 Technologies de contrôle pour l'irrigation .....	15
1.4.3 Systèmes autonomes en irrigation .....	16
1.5 Conclusion.....	18

---

<b>2</b>	<b>Contexte et problématique</b>	<b>19</b>
2.1	Contexte spécifique de l'étude . . . . .	20
2.1.1	Problèmes rencontrés dans les systèmes d'irrigation locaux .	20
2.1.2	Contraintes climatiques, économiques et techniques . . . . .	21
2.2	Déficiences des systèmes d'irrigation conventionnels . . . . .	24
2.2.1	Manque de contrôle en temps réel . . . . .	25
2.2.2	Gaspillage d'eau et faible rendement . . . . .	26
2.2.3	Absence d'adaptabilité aux conditions changeantes . . . . .	28
2.3	Intérêt d'une approche basée sur l'automatique . . . . .	29
2.3.1	Apports du contrôle automatique dans la régulation de l'irri- gation . . . . .	29
2.3.2	Exemples d'applications et résultats attendus . . . . .	31
2.4	Objectifs du mémoire . . . . .	31
2.5	Conclusion . . . . .	32
<b>3</b>	<b>Conception du Système Intelligent</b>	<b>33</b>
3.1	Description du système proposé . . . . .	34
3.2	Besoins fonctionnels et contraintes techniques . . . . .	34
3.3	Matériel utilisé . . . . .	37
3.4	Logique d'interconnexion des composants . . . . .	47
3.4.1	Spécifications de performance attendues . . . . .	49
3.5	Aspect logiciel du système intelligent . . . . .	49
3.5.1	Environnement de développement Arduino . . . . .	50
3.5.2	Plateforme Blynk . . . . .	52
3.6	Traitement des données des capteurs . . . . .	53
3.6.1	Lecture analogique des capteurs d'humidité . . . . .	53
3.6.2	Lecture numérique du capteur DHT22 . . . . .	53
3.7	Commande des actionneurs . . . . .	55
3.7.1	Contrôle des relais via GPIO ESP32 . . . . .	55
3.7.2	Gestion du temps d'activation des pompes . . . . .	56
3.8	Interface utilisateur mobile (Blynk) . . . . .	57
3.9	Flexibilité et adaptabilité du système . . . . .	58
3.9.1	Possibilité de modifier les seuils via Blynk . . . . .	58
3.9.2	Passage entre mode manuel et automatique . . . . .	59
3.9.3	Mise à jour du firmware (optionnelle) . . . . .	59
3.10	Conclusion . . . . .	59
<b>4</b>	<b>Réalisation et mise en œuvre du système</b>	<b>61</b>
4.1	Introduction . . . . .	62
4.2	Architecture générale du système . . . . .	62
4.3	Partie matérielle . . . . .	62

4.3.1	Schéma de câblage.....	63
4.3.2	Montage des composants .....	63
4.3.3	Alimentation électrique.....	65
4.4	Environnement de développement : .....	65
4.4.1	Arduino IDE.....	65
4.4.2	Interface web via ordinateur : Blynk Console.....	66
4.5	Tests et validation du système.....	69
4.5.1	Objectifs des tests .....	70
4.5.2	Scénarios de test .....	70
4.5.3	Observations techniques générales.....	71
4.5.4	Perspectives futures et développement du projet.....	72
4.6	Conclusion.....	73
	<b>Conclusion Générale</b>	<b>74</b>
	<b>Bibliographie</b>	<b>76</b>

# Table des figures

1.1	L'eau au service de la vie et de la planète [1].....	6
1.2	Alliance entre l'homme et la nature pour un développement durable [2]	8
1.3	Application d'un système d'irrigation pivot dans un champ cultivé [3]	10
1.4	Conséquence d'une irrigation non maîtrisée [4] .....	12
1.5	Surveillance de l'humidité du sol à l'aide d'un capteur intelligent [5]	14
1.6	Technologies numériques au service de l'irrigation [6].....	16
2.1	Fuites d'eau dans un réseau d'irrigation [7] .....	21
2.2	Interactions entre écologie, technologie et innovation pour un développement durable.....	23
2.3	Impact de l'excès d'humidité du sol sur l'intégrité du couvert végétal	24
2.4	Systèmes d'irrigation : traditionnel vs intelligent .....	26
2.5	Le gaspillage de l'eau .....	27
2.6	Système de contrôle intelligent de l'irrigation dans le champ agricole	30
3.1	ESP32-WROOM-32 .....	37
3.2	Capteur d'humidité de sol (Soil Moisture Sensor).....	38
3.3	Capteur DHT22 .....	39
3.4	afficheur LCD I2C.....	41
3.5	relais de 1 canal .....	42
3.6	POMPE 5V.....	43
3.7	Cellules solaires en silicium polycristallin .....	44
3.8	Module de charge de batterie au lithium pour panneaux solaires 5V 12V élévateur .....	45
3.9	Pile au lithium rechargeable 18650 3.7V ULTRAFIRE 4800mAh .	47
3.10	Montage physique du système d'irrigation intelligent, incluant les capteurs, l'ESP32, les relais, les pompes et l'alimentation. ....	48
3.11	ARDUINO IDE.....	51
3.12	Les bibliothèques .....	51
3.13	BLYNK.....	53

---

3.14	Processus de contrôle automatique des pompes par l'ESP32 selon l'humidité du sol .....	55
3.15	Diagramme de prise de décision basé sur la température mesurée par capteur DHT22 (géré par l'ESP32) .....	56
3.16	BLYNK MOBILE .....	57
4.1	ESP32 WROOM 32E PINOUT .....	64
4.2	créer un nouveau compte .....	67
4.3	Créer un Device .....	68
4.4	Gestion des flux de données (Datastreams) .....	68
4.5	Configuration du tableau de bord web (Web Dashboard).....	69
4.6	Activation automatique de la pompe lorsque le sol est sec .....	70
4.7	Les deux LED allumées indiquent le fonctionnement des pompes.....	70
4.8	LED rouge éteinte lorsque la température est inférieure à 35°C .....	71
4.9	LED rouge activée en cas de surchauffe .....	71

# Liste des tableaux

1.1	Comparaison entre l'irrigation traditionnelle et moderne.....	11
2.1	Comparaison entre irrigation traditionnelle et irrigation intelligente adaptative.....	28
4.1	Connexion des composants avec l'ESP32 .....	64

# Introduction Generale

L'agriculture représente un pilier fondamental de l'économie dans de nombreux pays, en particulier dans les régions semi-arides et arides où les ressources en eau sont limitées. Face à une demande croissante en denrées alimentaires et à une pression accrue sur les ressources naturelles, il devient impératif d'optimiser l'utilisation de l'eau dans le secteur agricole. L'irrigation, bien qu'essentielle à la productivité des cultures, est souvent pratiquée de manière inefficace, entraînant des gaspillages importants. L'essor des technologies numériques et de l'intelligence embarquée offre aujourd'hui des opportunités prometteuses pour rationaliser cette pratique. L'intégration de capteurs, de microcontrôleurs et de plateformes de communication permet de concevoir des systèmes intelligents capables de surveiller et de contrôler automatiquement les besoins en eau des cultures. Ces dispositifs permettent une irrigation plus précise, basée sur des données en temps réel telles que l'humidité du sol, la température ambiante ou les prévisions météorologiques. Ainsi, l'adoption de telles technologies constitue un levier stratégique pour promouvoir une agriculture durable et efficiente. Cette approche est d'autant plus pertinente dans un contexte de changement climatique où la rareté de l'eau devient un enjeu majeur. C'est dans ce cadre que s'inscrit notre travail, qui vise à développer un système intelligent d'aide à la décision pour une gestion optimisée de l'irrigation.

Dans le cadre de ce mémoire, nous proposons de concevoir et de mettre en œuvre un système matériel et logiciel combinant des composants électroniques accessibles (tels que Arduino) avec des outils de supervision mobile (tels que Blynk). Ce système a pour objectif de collecter des données environnementales via des capteurs placés sur le terrain agricole, de les analyser automatiquement et de déclencher l'irrigation en fonction de critères préétablis. Une telle solution permet non seulement de réduire la consommation d'eau, mais également de diminuer les interventions humaines répétitives, sources d'erreurs et de perte de temps. Le recours à des technologies peu coûteuses et open-source rend ce système applicable à grande échelle, y compris dans les exploitations agricoles de taille modeste. Par ailleurs, la visualisation à distance des données via une application mobile permet à l'agriculteur de suivre l'état de ses cultures en temps réel. Cette flexibilité représente

---

un atout majeur, surtout dans les zones rurales où la mobilité et l'accès rapide à l'information peuvent faire défaut. Le système conçu s'appuie sur une architecture modulaire facilitant sa maintenance et son extension future. Il est également pensé pour être économe en énergie et résilient aux conditions extérieures. En somme, notre projet ambitionne de démontrer que l'innovation technologique peut être mise au service de la rationalisation des pratiques agricoles.

Ce mémoire est structuré en quatre chapitres principaux. Le premier chapitre est consacré à une revue de littérature présentant le contexte général de l'irrigation agricole, les technologies existantes, ainsi que les travaux similaires réalisés à l'échelle nationale et internationale. Le deuxième chapitre expose la problématique spécifique que nous cherchons à résoudre, en mettant en lumière les limites des approches actuelles et les motivations de notre solution. Le troisième chapitre décrit en détail la conception matérielle du système, incluant les choix technologiques, les schémas électroniques et l'intégration des capteurs. Enfin, le quatrième chapitre aborde la partie logicielle, en détaillant le codage sous Arduino, la logique de prise de décision et la configuration de l'interface Blynk. L'ensemble du mémoire illustre ainsi une démarche complète allant de la définition du besoin à la réalisation d'un prototype fonctionnel. Ce travail s'inscrit dans une dynamique d'innovation technologique au service de l'agriculture de précision. Nous espérons qu'il contribuera à sensibiliser sur les avantages des systèmes intelligents dans le domaine agricole et à encourager leur adoption. À travers cette étude, nous souhaitons également démontrer la faisabilité d'un projet low-cost, reproductible et adaptable à différents contextes climatiques et géographiques. Enfin, notre ambition est d'ouvrir la voie à d'éventuelles perspectives d'amélioration et de généralisation de ce type de solutions dans le futur.

# **Chapitre 1**

## **Défis de la gestion durable de l'eau en agriculture**

---

## **Introduction :**

L'eau constitue l'une des ressources les plus vitales pour la survie de l'humanité et le fonctionnement des écosystèmes [8]. Cependant, sa disponibilité est de plus en plus menacée par des facteurs tels que la croissance démographique, les changements climatiques, la pollution et une gestion souvent inefficace. Dans ce contexte, une utilisation optimale de l'eau, notamment dans le secteur agricole – qui représente près de 70 % de la consommation mondiale d'eau douce – devient un enjeu stratégique pour assurer la sécurité alimentaire et le développement durable [9].

Face à ces défis, les nouvelles technologies, telles que l'Internet des Objets (IoT), l'intelligence artificielle (IA) et les systèmes automatisés, offrent des solutions prometteuses pour une gestion rationnelle de l'eau. L'émergence de l'agriculture intelligente (Smart Agriculture) et de l'irrigation de précision permet de réduire le gaspillage, d'optimiser les rendements agricoles et de préserver les ressources hydriques pour les générations futures [10]. Ce chapitre propose un état des lieux structuré des connaissances actuelles en lien avec la gestion durable de l'eau dans le secteur agricole. Il met en lumière les enjeux, les limites des pratiques traditionnelles et les solutions innovantes en cours d'émergence, à travers les axes suivants :

- L'importance stratégique de l'eau en tant que ressource vitale, ainsi que les pressions croissantes liées aux changements climatiques, à la croissance démographique et aux usages concurrents ;
- Les défis majeurs rencontrés dans l'irrigation agricole, notamment le gaspillage hydrique et ses conséquences sur la sécurité alimentaire et la résilience des exploitations ;
- Les avancées technologiques dans le champ de l'agriculture intelligente, incluant l'usage de capteurs, l'automatisation des systèmes d'irrigation et l'exploitation des données environnementales ;
- Les tendances récentes en matière de gestion automatisée de l'eau, mettant l'accent sur l'intégration de plateformes de contrôle, la modélisation prédictive et les dispositifs de prise de décision autonome.

L'objectif de ce chapitre est de fournir une base solide pour comprendre les enjeux actuels et les solutions technologiques disponibles, tout en identifiant les lacunes de la recherche afin de poser les fondements de la problématique qui sera approfondie dans les chapitres suivants.

### **1.1 L'eau, une ressource vitale pour l'humanité**

L'eau est l'un des éléments naturels les plus essentiels à la vie sur Terre. Elle est non seulement indispensable à la survie de l'être humain, mais elle constitue

---

également une composante fondamentale de toutes les activités biologiques, agricoles, industrielles et écologiques [11]. L'eau entre dans la composition du corps humain, soutient les processus physiologiques des plantes et des animaux, et joue un rôle central dans la production alimentaire, la génération d'énergie et diverses applications industrielles.

L'agriculture est de loin le secteur le plus consommateur d'eau à l'échelle mondiale, ce qui confère à cette ressource un rôle crucial dans la réalisation de la sécurité alimentaire [12]. De plus, les écosystèmes naturels — tels que les forêts, les rivières et les zones humides — dépendent du cycle de l'eau pour leur équilibre et leur pérennité.

Cependant, malgré son importance vitale, la ressource en eau est aujourd'hui gravement menacée par plusieurs facteurs, notamment :

- la surexploitation des nappes phréatiques et des ressources en eau de surface ;
- la pollution issue des activités agricoles, domestiques et industrielles ;
- les effets du changement climatique sur la répartition et la disponibilité de l'eau ;
- la croissance démographique qui intensifie la pression sur les infrastructures hydrauliques.

Face à ces défis, il devient impératif d'adopter des politiques de gestion durable de l'eau, basées sur des pratiques de rationalisation, de réutilisation, et sur l'intégration des technologies modernes. L'eau ne doit plus être perçue uniquement comme une ressource naturelle, mais comme un **enjeu stratégique** pour le développement durable, la stabilité socio-économique et la résilience des sociétés humaines.

### **1.1.1 Disponibilité mondiale et pressions croissantes**

Bien que 71 % de la surface de la Terre soit recouverte d'eau, cette abondance est trompeuse, car seule une infime portion de cette ressource est réellement exploitable par l'humanité. En effet, à peine 2,5 % de l'eau présente sur la planète est de l'eau douce, et moins de 1 % de cette fraction est accessible sous forme liquide dans les rivières, les lacs ou les nappes phréatiques peu profondes. Cette répartition inégale des ressources hydriques constitue une contrainte majeure, en particulier pour les régions arides ou semi-arides où les besoins en eau sont pourtant les plus élevés. Cette rareté relative de l'eau douce, conjuguée à une mauvaise répartition géographique, limite l'accès à l'eau potable pour des millions de personnes dans le monde. L'augmentation rapide de la population mondiale aggrave cette situation en exerçant une pression continue sur les réserves disponibles, notamment pour satisfaire les besoins domestiques, industriels et surtout agricoles, qui représentent à eux seuls plus de 70 % de la consommation mondiale d'eau douce.



FIGURE 1.1 – L'eau au service de la vie et de la planète [1]

Par ailleurs, plusieurs facteurs viennent accentuer les tensions sur les ressources hydriques déjà fragiles. La croissance démographique, en constante augmentation, nécessite davantage d'eau pour l'alimentation, l'hygiène et l'irrigation, ce qui entraîne une forte sollicitation des ressources naturelles. Le changement climatique constitue également un facteur de déstabilisation majeur, provoquant des sécheresses prolongées, des inondations plus fréquentes et une perturbation générale du cycle hydrologique. À cela s'ajoute la pollution croissante des ressources disponibles, notamment à travers les rejets industriels, les effluents domestiques et les intrants agricoles tels que les pesticides et les engrais, qui dégradent la qualité de l'eau. La surexploitation des nappes phréatiques, due à un pompage intensif non régulé, accélère leur épuisement, comme en témoigne l'exemple préoccupant de la nappe fossile du Sahara. Un cas emblématique de cette dégradation est celui du Lac Tchad, dont la surface a diminué de plus de 90 % en six décennies, conséquence directe de l'irrigation massive, des prélèvements incontrôlés et du réchauffement climatique. Ces pressions convergentes appellent à une gestion plus raisonnée et intelligente des ressources hydriques à l'échelle mondiale.

---

### **1.1.2 Enjeux pour les générations futures**

Les ressources en eau douce, déjà sous pression, représentent un défi majeur pour les générations futures. Selon l'Organisation mondiale de la santé, 2,2 milliards de personnes dans le monde n'ont toujours pas accès à une eau potable gérée en toute sécurité. Cette situation risque de s'aggraver si aucune mesure significative n'est prise, car d'ici 2050, près de 5 milliards d'individus pourraient être exposés à un stress hydrique sévère. Au-delà des enjeux sanitaires, la rareté de l'eau soulève également des tensions géopolitiques croissantes. Environ 60 % des cours d'eau à travers le monde sont transfrontaliers, tels que le Nil, le Tigre ou l'Euphrate, ce qui génère des conflits d'intérêts entre pays riverains. Des exemples récents, comme les différends autour du barrage de la Renaissance (GERD) en Éthiopie, illustrent les risques de conflits liés au contrôle de l'eau. Par ailleurs, l'insécurité alimentaire constitue une autre conséquence directe du manque d'eau, dans la mesure où l'agriculture représente environ 70 % de la consommation mondiale d'eau douce. Si des solutions efficaces ne sont pas mises en œuvre, les rendements agricoles pourraient diminuer de 30 % d'ici 2030, compromettant gravement la sécurité alimentaire mondiale.

Face à ces défis, plusieurs pistes de solutions émergent pour assurer une gestion durable et équitable de l'eau. La réutilisation des eaux usées, déjà pratiquée avec succès dans certains pays comme Israël qui recycle plus de 90 % de ses eaux usées, représente une alternative prometteuse. De même, l'adoption de technologies d'irrigation intelligente, telles que les systèmes goutte-à-goutte ou les dispositifs pilotés par des capteurs connectés (IoT), permet une utilisation ciblée et efficace des ressources hydriques. Ces innovations contribuent à limiter les pertes, à améliorer les rendements et à garantir une meilleure résilience des systèmes agricoles. Enfin, la mise en place de politiques de gestion intégrée des ressources en eau, à l'échelle nationale et internationale, constitue une condition indispensable pour prévenir les conflits et assurer une répartition équitable. Des cadres de coopération comme la Convention des Nations Unies sur les cours d'eau transfrontaliers offrent des mécanismes de gouvernance partagée et durable. Ces approches, si elles sont soutenues politiquement et techniquement, pourraient garantir aux générations futures un accès sécurisé à une ressource aussi vitale que l'eau.

### **1.1.3 Le rôle de l'eau dans le développement durable**

L'eau occupe une place centrale dans les stratégies de développement durable, en raison de son rôle transversal dans les domaines environnementaux, sociaux et économiques. Son importance est particulièrement soulignée dans les Objectifs de Développement Durable (ODD) adoptés par les Nations Unies [1]. L'ODD 6,

---

intitulé « Eau propre et assainissement », vise à garantir l'accès universel à l'eau potable et à des services d'assainissement d'ici 2030, condition essentielle à la santé publique, à la dignité humaine et à la cohésion sociale. Par ailleurs, l'ODD 2, « Faim Zéro », met en lumière la nécessité d'une irrigation durable pour accroître la productivité agricole et assurer la sécurité alimentaire mondiale. L'eau contribue également à l'ODD 13, relatif à la lutte contre le changement climatique, en raison de son rôle dans la régulation des écosystèmes et des cycles naturels, notamment par les zones humides, les nappes phréatiques et les cours d'eau. Ainsi, la gestion rationnelle de l'eau constitue un levier stratégique pour répondre aux défis globaux liés à la pauvreté, à la résilience climatique et à la durabilité des écosystèmes.



FIGURE 1.2 – Alliance entre l'homme et la nature pour un développement durable [2]

Sur le plan économique, les impacts d'une mauvaise gestion de l'eau sont considérables. Selon la Banque Mondiale, les pertes économiques annuelles dues au manque d'accès à une eau potable de qualité s'élèveraient à environ 260 milliards de dollars, affectant principalement les pays en développement. De plus, près de 75% des emplois à l'échelle mondiale dépendent directement ou indirectement de l'eau, notamment dans les secteurs de l'agriculture, de l'énergie, du tourisme et de l'industrie. Pour relever ces défis, plusieurs innovations ont vu le jour, contribuant à une gestion plus durable et intelligente de la ressource. Le dessalement,

---

par exemple, représente une solution technologique adoptée par des pays à forte contrainte hydrique comme l'Arabie Saoudite, qui produit près de 50% de son eau douce à partir de cette technique. D'autres approches émergentes, telles que l'agriculture intelligente basée sur l'usage de drones, de capteurs et d'intelligence artificielle, permettent d'optimiser les volumes d'eau utilisés pour l'irrigation. Enfin, la gouvernance de l'eau tend à se démocratiser à travers des modèles de gestion participative, intégrant les communautés locales dans la planification et la prise de décision. Ces dynamiques innovantes témoignent d'un engagement croissant vers une gestion intégrée, équitable et durable de la ressource hydrique, élément-clé pour bâtir un avenir résilient et inclusif.

## **1.2 La sécurité alimentaire et l'enjeu de l'irrigation**

La sécurité alimentaire dépend largement de l'irrigation pour assurer une production agricole continue, notamment dans les zones arides. Cependant, l'utilisation intensive de l'eau pour l'irrigation fait face à d'importants défis en raison de la rareté des ressources hydriques et des effets du changement climatique [2]. Il est donc essentiel d'adopter des systèmes d'irrigation plus efficaces comme le goutte-à-goutte, tout en améliorant la gestion des ressources en eau pour équilibrer production alimentaire et préservation de l'eau [13]. L'avenir exige des solutions intelligentes pour relever les défis climatiques et garantir une alimentation suffisante pour tous.

### **1.2.1 Dépendance agricole vis-à-vis de l'eau**

L'agriculture est l'un des secteurs les plus dépendants de la disponibilité en eau douce, tant pour l'irrigation des cultures que pour l'élevage [14]. Cette dépendance est particulièrement marquée dans les régions arides et semi-arides, où les précipitations sont insuffisantes pour assurer une production agricole stable. L'eau est indispensable à toutes les étapes du cycle végétatif : germination, croissance, floraison, et fructification. Sans apport hydrique adéquat, les rendements agricoles chutent considérablement, menaçant à la fois la sécurité alimentaire et les revenus des exploitants. La figure 1.3 illustre un système d'irrigation pivot, utilisé pour répondre à cette exigence constante en eau, notamment dans les grandes cultures [15]. Cette forte corrélation entre l'eau et la productivité rend les exploitations vulnérables face aux sécheresses, aux pénuries d'eau, et aux aléas climatiques. À cela s'ajoutent des problèmes de gestion inefficace des ressources hydriques, d'infrastructures vieillissantes et d'accès inéquitable à l'eau, exacerbant les inégalités et les tensions autour de cette ressource vitale. Dans ce contexte, la résilience de

---

l'agriculture dépend largement de la capacité à garantir un accès fiable, maîtrisé et durable à l'eau.



FIGURE 1.3 – Application d'un système d'irrigation pivot dans un champ cultivé [3]

Face à ces défis, plusieurs solutions émergent pour réduire la vulnérabilité du secteur agricole. Parmi les approches les plus prometteuses figure l'irrigation de précision, notamment le goutte-à-goutte, qui permet de cibler l'apport hydrique au plus près des besoins réels des plantes tout en réduisant les pertes. La réutilisation des eaux usées traitées, particulièrement dans les zones urbaines périphériques, constitue une autre alternative intéressante pour soulager la pression sur les ressources conventionnelles. De même, une meilleure planification de l'usage de l'eau, appuyée par des outils d'aide à la décision et des politiques publiques efficaces, est essentielle pour optimiser la répartition entre les différents usages : agricole, domestique et industriel. À cela s'ajoute l'importance de la sensibilisation des agriculteurs aux pratiques durables, et de leur implication dans la gestion participative des ressources hydriques. L'adoption de technologies intelligentes, intégrant capteurs, plateformes numériques et prévisions climatiques, joue un rôle clé dans cette transition vers une agriculture plus efficiente et résiliente. Ainsi, la dépendance de l'agriculture vis-à-vis de l'eau, bien qu'inévitable, peut être transformée en levier d'innovation et de durabilité grâce à des solutions techniques, organisationnelles et

---

politiques adaptées.

### 1.2.2 Irrigation traditionnelle vs. irrigation moderne

L'agriculture dépend fondamentalement de l'eau, et les méthodes d'irrigation jouent un rôle crucial dans l'efficacité de la production agricole et la durabilité des ressources hydriques. Il existe deux principales méthodes d'irrigation : traditionnelle et moderne.

<b>Critère</b>	<b>Irrigation traditionnelle</b>	<b>Irrigation moderne</b>
<b>Techniques utilisées</b>	Inondation, canaux à ciel ouvert, seguias	Goutte-à-goutte, aspersion, bulles, systèmes intelligents
<b>Efficacité hydrique</b>	Faible (40–60%) due à l'évaporation et l'infiltration	Élevée (75–95%), eau dirigée vers les racines
<b>Coût financier</b>	Faible (coûts d'exploitation bas)	Élevé initialement, mais économique à long terme
<b>Adaptation aux cultures</b>	Riz, blé	Légumes, arbres, cultures de précision
<b>Impact sur le sol</b>	Risque de salinisation / érosion	Maintient la fertilité, réduit l'érosion
<b>Énergie consommée</b>	Gravité (faible consommation)	Pompes / systèmes électriques (plus gourmands)
<b>Impact environnemental</b>	Gaspillage, pollution par ruissellement	Économie d'eau, protection des ressources

TABLE 1.1 – Comparaison entre l'irrigation traditionnelle et moderne

### 1.2.3 Conséquence du gaspillage de l'eau sur la production agricole

Le gaspillage de l'eau dans le secteur agricole constitue l'un des défis les plus graves pour la sécurité alimentaire et la durabilité environnementale. L'utilisation excessive de l'eau, notamment à travers les méthodes d'irrigation traditionnelles, entraîne une surexploitation rapide des ressources hydriques, en particulier dans les régions arides, compromettant ainsi la capacité des générations futures à satisfaire leurs besoins. Du point de vue de la production, ce gaspillage se traduit par des

---

pertes considérables : l'efficacité de l'utilisation de l'eau diminue et la qualité des cultures se détériore en raison du stress hydrique ou de la salinisation due à un drainage inefficace. Les conséquences économiques sont également préoccupantes, car le gaspillage augmente les coûts de production tout en réduisant les rendements, menaçant ainsi la viabilité des exploitations agricoles. Sur le plan environnemental, le pompage excessif de l'eau dégrade les écosystèmes, tandis que le rejet des eaux d'irrigation contaminées par des pesticides contribue à la pollution des rivières et des nappes phréatiques. Par conséquent, la résolution de cette problématique exige une transition vers des systèmes d'irrigation intelligents et l'adoption de politiques durables de gestion des ressources en eau, un investissement essentiel pour garantir l'avenir de l'agriculture et la sécurité alimentaire.



FIGURE 1.4 – Conséquence d'une irrigation non maîtrisée [4]

### **1.3 Agriculture intelligente (Smart Agriculture)**

L'agriculture intelligente est une approche moderne du domaine agricole qui repose sur l'intégration des technologies avancées à différentes étapes de la chaîne de production, dans le but d'améliorer la productivité, d'optimiser l'utilisation des ressources et de réduire les coûts opérationnels, tout en respectant les dimensions environnementales et économiques [4].

Cette approche mobilise diverses technologies telles que :

- l'Internet des objets (IoT),
- l'intelligence artificielle (IA),

- 
- les systèmes embarqués (comme ESP32, Arduino),
  - les capteurs intelligents,
  - l'analyse des données massives (Big Data),
  - le GPS et les drones.

Elle permet aux agriculteurs de prendre des décisions précises et basées sur des données en temps réel, telles que le choix du moment optimal pour l'irrigation ou la fertilisation, contribuant ainsi à une gestion rationnelle de l'eau, de l'énergie et des intrants agricoles [16].

L'agriculture intelligente ne se limite pas à l'automatisation, elle comprend également la capacité de prédire les maladies agricoles, de surveiller la croissance des cultures, d'améliorer la qualité des récoltes, et de connecter les systèmes agricoles à des plateformes cloud ou à des applications mobiles pour un suivi à distance. .

### **1.3.1 Capteurs, IoT et systèmes de monitoring**

Dans le cadre de l'agriculture intelligente, les capteurs jouent un rôle central en fournissant des données précises et en temps réel sur différents paramètres agro-environnementaux tels que l'humidité du sol, la température, la luminosité, ou encore le niveau de nutriments [17]. Ces capteurs, intégrés à des dispositifs connectés via l'Internet des objets (IoT), permettent une surveillance continue des conditions de culture. Les données collectées sont transmises à des systèmes de monitoring et de gestion centralisés qui les analysent afin de prendre des décisions automatisées ou assistées, comme l'activation de l'irrigation ou l'ajustement de la fertilisation [18]. Grâce à cette approche, il devient possible d'optimiser l'utilisation des ressources, de prévenir les maladies, et d'améliorer significativement la productivité agricole tout en réduisant les impacts environnementaux.

### **1.3.2 Big Data et aide à la décision**

Dans le cadre de l'agriculture intelligente, le Big Data représente une véritable révolution. Il ne s'agit pas seulement de collecter de grandes quantités de données, mais aussi de les transformer en informations utiles pour orienter les actions agricoles. Les capteurs installés dans les champs mesurent en temps réel l'humidité du sol, la température, ou encore la salinité [19]. Les drones et les satellites fournissent des images haute résolution permettant de surveiller l'état de santé des cultures sur de grandes surfaces. De plus, les stations météorologiques locales apportent des prévisions précises qui aident à anticiper les événements climatiques extrêmes [20].

Une fois ces données centralisées, des outils d'analyse basés sur l'intelligence artificielle et l'apprentissage automatique les traitent pour détecter des tendances, faire des prédictions, ou recommander des interventions ciblées. Par exemple, le



FIGURE 1.5 – Surveillance de l’humidité du sol à l’aide d’un capteur intelligent [5]

système peut suggérer de démarrer l’irrigation dans certaines zones spécifiques d’un champ, ou signaler un risque élevé de maladie. Cette capacité à prendre des décisions basées sur des données fiables améliore considérablement la réactivité et l’efficacité des pratiques agricoles.

En résumé, le Big Data permet non seulement d’augmenter les rendements et la rentabilité, mais aussi de minimiser les gaspillages d’eau, d’engrais et de produits phytosanitaires, tout en respectant l’environnement

## **1.4 Automatisation dans le secteur agricole**

### **1.4.1 Rôle de l’automatique dans la gestion de l’eau**

L’automatique joue un rôle fondamental dans l’optimisation de la gestion des ressources en eau dans le secteur agricole. Face à la rareté croissante de l’eau et à la pression liée à l’augmentation de la demande alimentaire mondiale, le recours à des systèmes intelligents et automatisés s’impose comme une solution incontournable [21].

Ces systèmes permettent un pilotage précis et dynamique de l’irrigation, grâce à une collecte continue de données issues du terrain. Parmi les paramètres surveillés,

---

on retrouve :

- le taux d'humidité du sol ;
- les conditions météorologiques (température, évaporation, précipitations) ;
- les besoins hydriques spécifiques des cultures selon leur stade de développement.

En se basant sur ces informations en temps réel, le système peut prendre des décisions autonomes, telles que l'activation ou l'arrêt de l'irrigation, ou encore l'ajustement des volumes d'eau distribués [22]. Cela permet de réaliser une économie significative en eau, tout en assurant une production agricole de qualité.

Par ailleurs, l'intégration des technologies de communication modernes comme l'Internet des Objets (IoT) et les réseaux sans fil permet un contrôle à distance, une supervision continue, et l'analyse des données à grande échelle [23]. Ainsi, l'automatique constitue un levier stratégique pour une agriculture plus durable, plus résiliente et technologiquement avancée. Le secteur agricole, en fournissant des solutions avancées pour faire face aux défis de la rareté de l'eau et de l'augmentation de la demande en production alimentaire. Ces systèmes reposent sur des technologies de contrôle automatisé intelligentes qui permettent une gestion précise des opérations d'irrigation grâce à une surveillance continue des niveaux d'humidité du sol, des conditions météorologiques et des besoins des cultures.

#### **1.4.2 Technologies de contrôle pour l'irrigation**

Les technologies de contrôle de l'irrigation occupent aujourd'hui une place centrale dans le développement de l'agriculture de précision [6]. Les systèmes modernes reposent sur l'intégration harmonieuse de plusieurs composants : capteurs environnementaux, microcontrôleurs programmables, plateformes de gestion à distance et algorithmes intelligents de prise de décision. Cette combinaison permet d'automatiser les processus d'irrigation en s'adaptant continuellement aux conditions réelles du terrain. Les données mesurées, telles que l'humidité du sol à différentes profondeurs, la température de l'air, l'ensoleillement ou la vitesse du vent, sont analysées en temps réel pour déterminer les besoins hydriques précis des cultures.

Grâce à ces technologies, il devient possible de délivrer l'eau de manière ciblée, uniquement là où elle est nécessaire et au moment le plus opportun. Cette irrigation différenciée, parfois ajustée à l'échelle d'une parcelle ou même d'une plante individuelle dans les systèmes les plus avancés, permet une réduction significative du gaspillage d'eau. En optimisant les apports hydriques, ces systèmes contribuent également à prévenir les phénomènes de stress hydrique ou d'excès d'humidité, nuisibles à la croissance végétale. En parallèle, l'automatisation diminue la charge

---

de travail des agriculteurs, en réduisant les tâches répétitives et en libérant du temps pour des activités à plus forte valeur ajoutée, telles que l'analyse agronomique ou la gestion des intrants.

Un autre avantage majeur réside dans la connectivité de ces dispositifs, qui peuvent être surveillés et contrôlés à distance via des interfaces mobiles ou web. Grâce à des protocoles de communication sans fil comme le Wi-Fi, le GSM ou le LoRa, l'agriculteur peut consulter les données collectées, ajuster les paramètres d'irrigation et accéder à un historique détaillé des actions menées.



FIGURE 1.6 – Technologies numériques au service de l'irrigation [6]

### Avantages principaux

- Jusqu'à **60% d'économie d'eau**, en évitant l'irrigation inutile.
- **40% d'augmentation de la productivité**, car les plantes reçoivent exactement ce dont elles ont besoin.
- Une **réduction significative des coûts de main-d'œuvre et d'énergie**, grâce à l'automatisation.

#### 1.4.3 Systèmes autonomes en irrigation

Les systèmes d'irrigation autonomes constituent une solution intelligente et pratique pour la gestion des ressources en eau dans le secteur agricole [24]. Ces systèmes reposent sur des technologies avancées comprenant des capteurs pour surveiller l'humidité du sol, les températures et les conditions météorologiques, ainsi

---

que des systèmes de contrôle automatique qui prennent des décisions d'irrigation de manière autonome sur la base des données collectées.

Ces solutions offrent de nombreux avantages, dont les plus importants sont la réalisation d'économies d'eau importantes pouvant atteindre 70%, une augmentation de la productivité des cultures, tout en réduisant la dépendance à l'effort humain dans les opérations d'irrigation quotidiennes. Ces systèmes se caractérisent par une facilité de contrôle à distance, ce qui les rend particulièrement adaptés aux zones souffrant de pénurie d'eau ou de coûts d'irrigation traditionnelle élevés [25].

Ces technologies aident les agriculteurs à améliorer l'utilisation des ressources en eau, à augmenter leurs profits, tout en préservant l'environnement grâce à la réduction du gaspillage et de la surconsommation d'eau.

Un facteur essentiel à considérer dans le développement des systèmes d'irrigation autonomes est leur besoin en alimentation énergétique. En effet, les dispositifs électroniques embarqués, les capteurs, les modules de communication ainsi que les pompes de distribution nécessitent une source d'énergie fiable et continue. Dans de nombreuses régions agricoles, en particulier dans les zones rurales isolées ou dans les pays en développement, l'accès à l'électricité du réseau est souvent limité, instable, ou totalement inexistant. Cette contrainte freine l'adoption à grande échelle des technologies modernes d'irrigation.

C'est dans ce contexte que l'intégration de l'énergie solaire apparaît comme une solution à la fois durable, économique et techniquement viable. Grâce aux progrès réalisés dans le domaine du photovoltaïque, il est aujourd'hui possible d'alimenter des systèmes agricoles entiers à partir de panneaux solaires. Ces systèmes convertissent directement l'énergie solaire en électricité pour alimenter les microcontrôleurs (comme les cartes ESP32 ou Arduino), les relais, les capteurs de sol, ainsi que les pompes submersibles ou de surface.

L'énergie solaire présente de nombreux avantages dans le contexte de l'agriculture intelligente : elle est renouvelable, disponible localement, silencieuse, et gratuite à l'usage après installation. Elle permet de garantir l'autonomie énergétique des installations agricoles, en particulier dans les zones semi-arides ou désertiques où l'ensoleillement est abondant et régulier. L'adoption de modules solaires offre ainsi une double valeur ajoutée : elle favorise la transition vers une agriculture numérique, tout en réduisant la dépendance aux sources d'énergie fossiles ou onéreuses.

De plus, l'alimentation solaire peut être facilement couplée à des batteries de stockage, permettant au système de fonctionner la nuit ou pendant les périodes nuageuses. Cette résilience énergétique constitue un élément clé de la viabilité des projets d'irrigation intelligente. En résumé, l'association entre technologies d'automatisation et énergie solaire forme un modèle innovant, reproductible, et

---

parfaitement adapté aux contraintes des territoires agricoles modernes

## 1.5 Conclusion

Ce premier chapitre a permis d'établir les fondements du contexte général lié à la gestion de l'eau dans le secteur agricole, en soulignant son rôle vital pour l'humanité et les enjeux majeurs liés à sa disponibilité. L'analyse a mis en évidence les pressions croissantes exercées par la croissance démographique, les changements climatiques, ainsi que les pratiques agricoles intensives, qui rendent indispensable une gestion plus efficace et durable de cette ressource. L'agriculture, en tant que principal secteur utilisateur d'eau douce à l'échelle mondiale, est confrontée à des défis critiques en matière de sécurité alimentaire et de durabilité. Nous avons également souligné les limites persistantes des méthodes d'irrigation traditionnelles, souvent inefficaces et responsables d'un gaspillage important des ressources hydriques.

Dans cette optique, l'agriculture intelligente émerge comme une alternative technologique prometteuse, reposant sur l'utilisation de capteurs, de systèmes de surveillance, d'outils de communication et d'analyse de données. Ces innovations permettent de piloter l'irrigation de façon plus ciblée, en fonction des besoins réels des cultures et des conditions environnementales. L'automatisation, quant à elle, renforce cette dynamique en réduisant les interventions humaines, en améliorant la précision des actions et en maximisant les rendements tout en économisant l'eau. Cependant, bien que ces solutions aient prouvé leur efficacité, leur intégration dans les systèmes agricoles reste encore limitée, notamment dans les régions à faibles ressources techniques et économiques.

L'ensemble de cette synthèse met en évidence un fort potentiel d'innovation pour répondre aux enjeux actuels de gestion de l'eau en agriculture. Elle constitue un socle essentiel pour formuler la problématique centrale de ce mémoire, qui guidera l'ensemble de notre démarche de recherche et de conception. Ainsi, la question que nous nous proposons d'explorer est la suivante : *comment concevoir un système intelligent et autonome de gestion de l'irrigation qui soit à la fois efficace, économique et adapté au contexte agricole local ?*

## **Chapitre 2**

### **Contexte et problématique**

---

## **Introduction**

Dans un contexte mondial marqué par le changement climatique, la raréfaction des ressources en eau et la pression croissante sur les systèmes agricoles, l'optimisation de la gestion de l'irrigation représente un enjeu stratégique pour assurer la sécurité alimentaire tout en préservant les ressources naturelles. Dans les zones à stress hydrique, comme c'est le cas dans de nombreuses régions agricoles, l'irrigation constitue souvent la principale garantie de production. Cependant, l'absence d'un pilotage précis basé sur les besoins réels des cultures conduit fréquemment à des gaspillages importants, à une baisse de l'efficacité hydrique et parfois à une dégradation des sols par lessivage ou salinisation. Ce constat met en lumière l'urgence de mettre en place des mécanismes intelligents capables de guider les décisions d'irrigation de manière adaptée et réactive.

C'est dans cette dynamique que s'inscrit le développement d'un système intelligent pour la rationalisation de l'irrigation agricole. L'objectif est de concevoir une solution technologique capable de collecter, d'analyser et d'interpréter en temps réel des données environnementales et agronomiques, afin d'optimiser les volumes d'eau apportés aux cultures. Contrairement aux approches classiques, ce système vise à intégrer l'intelligence artificielle et les techniques de traitement de données pour modéliser le comportement hydrique du sol et les besoins spécifiques des plantes. Une telle approche permettrait non seulement de limiter le gaspillage d'eau, mais aussi de garantir un rendement agricole durable, en conciliant productivité et gestion raisonnée des ressources.

### **2.1 Contexte spécifique de l'étude**

#### **2.1.1 Problèmes rencontrés dans les systèmes d'irrigation locaux**

De nombreux territoires agricoles sont confrontés à des contraintes hydriques sévères, aggravées par des régimes pluviométriques faibles et irréguliers. Dans de telles conditions, la majorité des cultures dépend entièrement des apports d'eau par irrigation, tandis qu'une proportion relativement faible des terres cultivées est réellement équipée pour l'irrigation. Cette situation rend les exploitations vulnérables face aux aléas climatiques et à la disponibilité des ressources en eau. Par ailleurs, les infrastructures en place – telles que les réseaux de canaux, bassins de rétention et systèmes de pompage – sont souvent vieillissantes, mal entretenues et peu adaptées aux exigences actuelles. Il en résulte d'importantes pertes d'eau lors du transport et de la distribution, en raison de fuites, d'infiltrations ou encore de l'évaporation dans les canalisations non couvertes ou endommagées.

---

Sur le plan opérationnel, les systèmes d'irrigation traditionnels souffrent d'un manque de modernisation technologique. L'absence d'équipements de mesure (capteurs d'humidité, débitmètres, etc.) et de dispositifs de contrôle à distance oblige les agriculteurs à s'appuyer sur des méthodes empiriques, souvent basées sur l'expérience ou des calendriers fixes. Cette approche entraîne une grande variabilité dans les volumes d'eau réellement appliqués aux cultures, avec des risques fréquents de sous-irrigation ou de sur-irrigation. Par exemple, l'irrigation par aspersion sur de grandes surfaces génère fréquemment des zones hétérogènes, certaines recevant trop d'eau, d'autres pas assez. Cette imprécision est d'autant plus problématique qu'aucune rétroaction immédiate n'est disponible pour ajuster les apports en temps réel. En parallèle, les contraintes économiques – coûts élevés du matériel moderne, énergie nécessaire au pompage, capacité d'investissement limitée – freinent considérablement l'adoption de solutions performantes. Ce cumul de facteurs techniques et financiers maintient les exploitations dans un mode de gestion peu efficient, limitant le rendement et la durabilité de la production agricole.



FIGURE 2.1 – Fuites d'eau dans un réseau d'irrigation [7]

### **2.1.2 Contraintes climatiques, économiques et techniques**

Les contraintes climatiques pèsent fortement sur la gestion de l'irrigation agricole. La disponibilité en eau douce est structurellement limitée dans de nombreuses régions soumises à un stress hydrique chronique. À cela s'ajoute une forte variabilité des précipitations, accentuée par les effets du changement climatique. Des épisodes de pluies intenses peuvent survenir de manière imprévisible, entrecoupés de longues

---

périodes de sécheresse. Cette instabilité rend la planification des irrigations difficile : un arrosage anticipé peut devenir superflu en cas d'orage inattendu, tandis qu'un manque de précipitations en fin de saison peut compromettre le développement des cultures. L'irrigation doit donc s'adapter en permanence à des conditions météorologiques incertaines, sous peine de provoquer soit un stress hydrique, soit un excès d'eau dommageable pour les sols. Par ailleurs, la concurrence pour les ressources en eau s'intensifie avec la croissance démographique, l'urbanisation et le développement industriel, rendant indispensable une gestion rigoureuse et optimisée de chaque mètre cube mobilisé.

Sur le plan économique, le secteur agricole se heurte à des contraintes budgétaires importantes. La modernisation des équipements et des infrastructures d'irrigation suppose des investissements considérables, qui ne sont pas toujours accessibles aux exploitants. Le coût de l'énergie, nécessaire au fonctionnement des pompes et systèmes de distribution, reste élevé et pèse sur la rentabilité des exploitations. De plus, l'accès aux technologies modernes est souvent limité par un manque de financement, de soutien institutionnel ou de mécanismes d'incitation. Cette situation freine l'adoption de solutions performantes telles que l'irrigation automatisée ou pilotée par données.

Sur le plan technique, l'implantation de systèmes intelligents est également confrontée à plusieurs obstacles. L'absence de capteurs, de stations météo locales ou de dispositifs de supervision limite la capacité à collecter et analyser les données nécessaires à une irrigation de précision. Dans les zones rurales, la connectivité numérique est souvent insuffisante, rendant difficile l'exploitation de technologies basées sur l'Internet des objets ou le contrôle à distance. Par ailleurs, le manque de compétences techniques en électronique, automatisme ou informatique agricole constitue un frein à l'intégration de solutions avancées dans les pratiques courantes. L'ensemble de ces contraintes – climatiques, économiques et techniques – contribue à maintenir des pratiques d'irrigation empiriques, peu flexibles et souvent inefficaces au regard des défis actuels.



FIGURE 2.2 – Interactions entre écologie, technologie et innovation pour un développement durable

Outre les contraintes climatiques et économiques, un obstacle fondamental au développement des systèmes intelligents d'irrigation réside dans la disponibilité énergétique. En effet, l'automatisation et la numérisation des pratiques agricoles impliquent l'utilisation d'équipements électroniques sensibles, de pompes motorisées et de systèmes de communication à distance, qui exigent une source d'énergie constante. Dans les zones rurales ou semi-urbanisées, l'absence ou l'instabilité du réseau électrique empêche souvent la mise en œuvre de ces technologies, rendant les exploitations vulnérables à l'interruption des services.

Pour surmonter cette barrière, l'énergie solaire se présente comme une alternative stratégique et particulièrement adaptée au contexte agricole. Les régions confrontées à une rareté hydrique sont souvent caractérisées par un fort ensoleillement, ce qui crée des conditions idéales pour l'exploitation du photovoltaïque. L'installation de systèmes solaires autonomes permet non seulement d'alimenter en continu les équipements agricoles, mais aussi de réduire les coûts opérationnels liés à l'électricité. Ce choix technologique assure une indépendance énergétique totale, un critère fondamental dans une logique de durabilité et d'autonomie des exploitants.

En outre, l'investissement initial dans le solaire peut être amorti rapidement grâce aux économies réalisées sur les factures d'énergie et à la réduction des pannes. Plusieurs initiatives à l'échelle internationale ont démontré que les systèmes d'irrigation intelligents alimentés par énergie solaire permettent une amélioration

---

significative des rendements agricoles tout en réduisant de 30 à 60

Ce modèle technico-énergétique représente une solution intégrée capable de répondre simultanément aux enjeux climatiques, économiques et technologiques. Il s'inscrit dans une perspective de transition écologique, où l'agriculture devient à la fois plus résiliente, plus productive, et plus respectueuse de l'environnement

## 2.2 Déficiences des systèmes d'irrigation conventionnels

Malgré leur large diffusion dans les zones agricoles, les systèmes d'irrigation conventionnels présentent de nombreuses limites qui compromettent leur efficacité, leur durabilité et leur adaptabilité aux défis actuels. Conçus selon des logiques anciennes, souvent empiriques, ces dispositifs reposent sur des techniques de distribution d'eau peu précises, qui ne tiennent pas compte des besoins réels des cultures ni des conditions environnementales en temps réel[26]. Cette rigidité opérationnelle engendre des pertes hydriques importantes, un gaspillage énergétique, et une faible réactivité face aux variations climatiques ou aux contraintes spécifiques des sols.



FIGURE 2.3 – Impact de l'excès d'humidité du sol sur l'intégrité du couvert végétal

Sur le plan agronomique, ces systèmes ne permettent généralement pas d'opti-

---

miser le développement des cultures, car l'apport en eau est souvent soit insuffisant, soit excessif. Ce déséquilibre peut affecter négativement la croissance végétale, réduire les rendements, et favoriser l'apparition de maladies liées à l'humidité ou au stress hydrique [27]. De plus, l'absence d'automatisation, de capteurs ou d'analyse de données dans ces installations rend impossible toute régulation dynamique des volumes d'irrigation. En somme, les systèmes conventionnels souffrent d'un manque de précision, de souplesse et d'intelligence, ce qui limite leur capacité à répondre efficacement aux exigences d'une agriculture moderne, durable et économiquement viable.

### **2.2.1 Manque de contrôle en temps réel**

Dans la plupart des systèmes d'irrigation traditionnels, l'arrosage n'est pas piloté de manière dynamique. L'agriculteur déclenche l'irrigation selon un calendrier prédéfini, souvent basé sur une minuterie ou un planning journalier, sans disposer d'un retour direct sur l'état réel du sol. Aucun capteur ne transmet en continu le taux d'humidité ou le niveau d'eau, ce qui rend impossible la connaissance précise du moment optimal pour arrêter l'arrosage. En l'absence de boucle de rétroaction, la gestion reste rigide et peu réactive [28]. L'irrigant peut, par exemple, ouvrir une vanne pendant une durée fixe, mais sans mesure fiable, il ne peut savoir si l'eau apportée est insuffisante ou excessive. La répartition de l'eau sur le terrain est également souvent inégale : dans les grandes parcelles irriguées par aspersion, certaines zones peuvent recevoir trop d'eau tandis que d'autres restent sous-arrosées. Cette hétérogénéité résulte d'un manque d'informations en temps réel, empêchant toute correction rapide ou ciblée. L'absence d'outils de surveillance empêche l'agriculteur de vérifier l'efficacité de l'irrigation sur l'ensemble de la surface cultivée, ce qui aboutit à une gestion approximative et peu efficiente.



FIGURE 2.4 – Systèmes d’irrigation : traditionnel vs intelligent

À l’inverse, un système moderne et automatisé repose sur des capteurs capables de mesurer en continu l’humidité du sol. Ces données alimentent une unité de commande qui compare les niveaux mesurés aux seuils définis, ajustant l’irrigation en conséquence. Ce type de régulation, basé sur une boucle de contrôle en temps réel, permet de mieux faire correspondre les apports d’eau aux besoins effectifs des cultures. Des électrovannes motorisées peuvent ainsi être activées ou désactivées automatiquement, sans intervention humaine, selon les conditions relevées. L’agriculteur peut également surveiller l’ensemble du processus à distance grâce à une interface numérique. Ce mode de gestion intelligent, souvent désigné sous le terme d’irrigation de précision, améliore considérablement la réactivité et la fiabilité du système, tout en réduisant les pertes et en augmentant la performance globale.

### **2.2.2 Gaspillage d’eau et faible rendement**

L’absence de contrôle précis dans les systèmes d’irrigation conventionnels se traduit souvent par un gaspillage massif d’eau. Bien que l’agriculture représente l’un des secteurs les plus consommateurs d’eau douce à l’échelle mondiale, une proportion importante de cette ressource n’est pas effectivement utilisée par les plantes [29]. Dans les systèmes traditionnels, une partie de l’eau s’évapore, s’infiltré en profondeur ou ruisselle sans être absorbée par les racines, réduisant ainsi l’efficacité globale du processus. Lorsque le débit d’irrigation n’est pas ajusté aux capacités

---

de rétention du sol et aux besoins réels des cultures, les pertes deviennent inévitables.

Ce gaspillage a un impact direct sur le rendement hydrique. Autrement dit, pour chaque mètre cube d'eau utilisé, la quantité de biomasse produite reste faible. L'eau excédentaire, loin de favoriser la croissance, peut même entraîner des effets indésirables tels que le lessivage des éléments nutritifs ou la dégradation de la structure du sol. Dans un contexte de raréfaction des ressources, cette inefficacité constitue un frein majeur au développement agricole durable. En comparaison, des systèmes d'irrigation de précision permettent une régulation fine des apports, ce qui améliore considérablement le taux d'utilisation réelle de l'eau et renforce la productivité à ressources égales.



FIGURE 2.5 – Le gaspillage de l'eau

Par ailleurs, une répartition inégale de l'eau aggrave ces problèmes. Les zones sur-arrosées sont exposées à la saturation du sol, à l'asphyxie racinaire et au ruissellement des nutriments, tandis que les zones sous-arrosées subissent un stress hydrique qui limite la croissance végétative [30]. L'absence d'adaptation spatiale et temporelle des apports hydriques conduit à une hétérogénéité des rendements sur une même parcelle. En résumé, les techniques conventionnelles d'irrigation conduisent à une surconsommation d'eau et à une performance agronomique inférieure au potentiel exploitable, accentuant le déséquilibre entre consommation

---

et production.

### 2.2.3 Absence d'adaptabilité aux conditions changeantes

Les méthodes d'irrigation traditionnelles manquent cruellement de flexibilité face aux aléas climatiques et aux évolutions rapides des conditions pédoclimatiques. Une fois le cycle d'irrigation lancé selon une heure et une durée préétablies, aucun ajustement n'est possible en cours d'exécution. Par exemple, si une pluie soudaine survient juste après le démarrage d'un arrosage, un système manuel continuera de pomper de l'eau jusqu'au terme du cycle, provoquant un excès inutile. À l'inverse, lors d'un épisode sec prolongé, un arrosage programmé peut s'avérer insuffisant, car aucun mécanisme ne déclenche de supplément d'irrigation pour compenser le déficit hydrique. Cette rigidité entraîne un décalage fréquent entre les apports hydriques et les besoins réels des plantes, ce qui nuit à la croissance. L'arrosage peut alors être trop abondant, provoquant la dilution des nutriments et des maladies racinaires, ou trop limité, exposant la culture à un stress hydrique dommageable.

<b>Critère</b>	<b>Irrigation traditionnelle</b>	<b>Irrigation intelligente adaptative</b>
Flexibilité	Programmation fixe, peu adaptable	Ajustement dynamique en temps réel
Réaction climatique	Pas de réponse aux imprévus	Réaction automatique via capteurs
Utilisation des capteurs	Rare ou absente	Sondes, météo, IoT intégrés
Précision	Estimative, peu fiable	Ajustée aux besoins réels
Efficacité hydrique	Risque de gaspillage	Optimisation des apports
Santé des cultures	Stress ou maladies possibles	Croissance équilibrée
Durabilité	Consommation excessive	Économie d'eau et d'énergie
Coût à long terme	Peu coûteux mais inefficace	Rentable sur la durée

TABLE 2.1 – Comparaison entre irrigation traditionnelle et irrigation intelligente adaptative

En revanche, un système intelligent permet une gestion dynamique et réactive, capable de s'adapter en temps réel aux variations de l'environnement. Grâce à l'intégration de capteurs météorologiques, de sondes d'humidité et de modèles de prévision, l'irrigation peut être ajustée automatiquement selon les besoins du moment. Par exemple, l'arrosage est suspendu ou réduit après un épisode pluvieux afin d'éviter tout apport excessif, tandis qu'il peut être intensifié lors

---

de fortes chaleurs ou de périodes de sécheresse prolongée. Ces mécanismes de régulation continue permettent d'optimiser chaque apport d'eau, garantissant ainsi une meilleure efficacité agronomique et une gestion rationnelle des ressources. Contrairement aux procédés conventionnels, les systèmes adaptatifs assurent une cohérence entre les apports et la demande réelle des cultures, à chaque instant du cycle de croissance.

## **2.3 Intérêt d'une approche basée sur l'automatique**

Face aux limites structurelles des systèmes d'irrigation conventionnels, une approche fondée sur l'automatique offre des perspectives concrètes et innovantes pour améliorer la gestion de l'eau en agriculture. L'irrigation, traditionnellement exécutée selon des schémas fixes et sans retour d'information, peut être repensée comme un processus dynamique, régulé en temps réel grâce à des technologies intelligentes. En intégrant des capteurs pour la collecte de données, des algorithmes de décision pour l'analyse et des actionneurs pour l'exécution, le système devient capable de s'adapter en continu aux besoins réels des cultures et aux conditions environnementales.

Cette transition vers un pilotage automatisé transforme profondément la logique d'irrigation. Le contrôle-commande permet non seulement de doser l'eau de manière précise et ciblée, mais aussi de réagir immédiatement à toute variation imprévue, qu'elle soit climatique, hydrique ou agronomique. Ainsi, chaque litre d'eau distribué peut être justifié, mesuré et optimisé. Une telle approche favorise à la fois la durabilité des ressources, l'efficacité énergétique, et l'amélioration du rendement agricole, tout en réduisant la charge cognitive et les interventions manuelles de l'agriculteur.

### **2.3.1 Apports du contrôle automatique dans la régulation de l'irrigation**

L'un des principaux apports du contrôle automatique dans l'irrigation réside dans sa capacité à assurer une régulation fine, continue et réactive des apports en eau. En intégrant des capteurs d'humidité du sol et des données environnementales, le système peut surveiller en temps réel l'état hydrique de la parcelle [31]. Ces informations sont traitées par une unité de commande qui compare les valeurs mesurées aux seuils définis selon les besoins de la plante [32]. En cas d'écart, des actionneurs comme des électrovannes ou des pompes à vitesse variable sont activés

---

automatiquement pour ajuster le débit. Ce fonctionnement en boucle fermée permet d'adapter avec précision l'arrosage aux conditions réelles, évitant les excès ou les manques. En parallèle, le système peut être piloté à distance via une interface connectée, ce qui permet à l'exploitant de surveiller et d'ajuster l'irrigation en quelques clics, tout en recevant des alertes en cas d'anomalie. Cette capacité de supervision centralisée améliore la cohérence de la gestion, même sur des exploitations étendues.

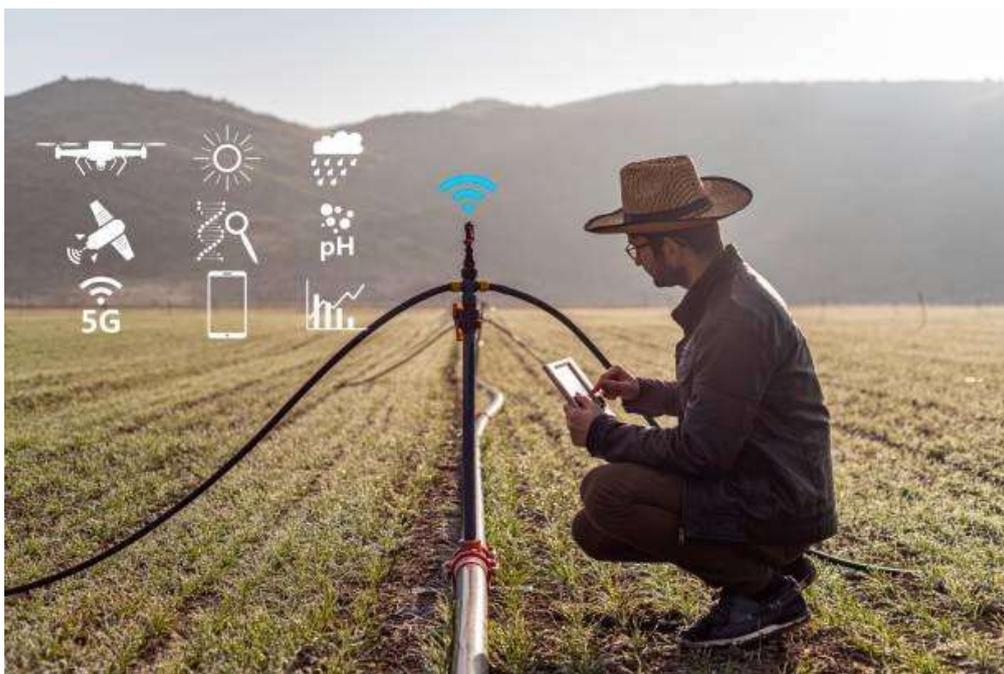


FIGURE 2.6 – Système de contrôle intelligent de l'irrigation dans le champ agricole

L'automatisation contribue également à une meilleure uniformité de la distribution de l'eau grâce à des dispositifs intelligents capables d'ajuster leur fonctionnement selon la topographie ou la structure de la parcelle. Les paramètres d'arrosage peuvent ainsi être modulés localement, ce qui optimise la quantité d'eau délivrée à chaque zone et améliore l'efficacité globale du système. En réduisant les pertes par surarrosage ou sous-arrosage, cette approche permet d'économiser une part significative des ressources en eau et en énergie [33]. Elle garantit aussi un meilleur rendement agronomique en stabilisant les apports hydriques autour des besoins réels des plantes. Ainsi, le recours au contrôle automatique rend l'irrigation plus précise, plus efficace et mieux adaptée aux exigences d'une agriculture moderne et durable [34].

---

### **2.3.2 Exemples d'applications et résultats attendus**

Dans différents contextes agricoles à travers le monde, l'adoption de systèmes d'irrigation intelligents a permis d'obtenir des résultats convaincants en matière d'économie d'eau et d'amélioration des rendements. Des exploitations agricoles équipées de dispositifs automatisés intégrant capteurs, unités de traitement et actionneurs ont enregistré des réductions significatives de la consommation hydrique, parfois de l'ordre de 30 à 50 %, sans compromettre la productivité. Ces systèmes permettent un arrosage ciblé et déclenché en fonction de données réelles telles que l'humidité du sol, la température ambiante ou le stade de croissance des cultures, ce qui limite les pertes par excès ou défaut d'irrigation. Cette précision accrue se traduit également par une réduction du stress hydrique et une meilleure assimilation des nutriments, contribuant ainsi à une croissance végétative plus homogène et à une récolte de qualité.

C'est dans cette optique que s'inscrit la démarche présentée dans ce mémoire. En intégrant une approche basée sur l'automatique, l'objectif est de concevoir un système capable de rationaliser l'irrigation tout en assurant une réactivité face aux besoins réels des plantes. Les résultats attendus reposent sur une double ambition : d'une part, réduire les volumes d'eau utilisés grâce à une gestion fine et adaptative ; d'autre part, maintenir voire améliorer les rendements agricoles en évitant les excès comme les insuffisances hydriques. La mise en œuvre et l'évaluation de ce système permettront de valider la faisabilité de l'approche proposée et d'en mesurer les bénéfices concrets, aussi bien sur le plan agronomique qu'économique.

## **2.4 Objectifs du mémoire**

Ce mémoire a pour objectif de concevoir une solution intelligente et automatisée pour améliorer la gestion de l'irrigation agricole, en réponse aux limites identifiées dans les systèmes conventionnels. L'approche proposée repose sur l'intégration de capteurs (humidité du sol, précipitations, température), d'une unité de traitement embarquée (microcontrôleur ou ordinateur compact), et d'actionneurs tels que des électrovannes ou des pompes. Le système visé devra être capable de mesurer les conditions environnementales en temps réel, d'analyser les besoins hydriques des cultures, et de piloter automatiquement les apports en eau selon une logique de régulation optimisée. L'objectif est de garantir une irrigation ciblée, réactive et efficiente, tout en réduisant le gaspillage et la dépendance à l'intervention humaine.

Pour atteindre ce but, plusieurs étapes seront nécessaires : analyser les pratiques d'irrigation locales et les contraintes techniques rencontrées sur le terrain ; étudier

---

les solutions existantes en matière de contrôle automatique et de modélisation hydrique ; concevoir l'architecture matérielle et logicielle du système ; développer le prototype et le tester dans des conditions simulées ou réelles ; puis évaluer ses performances par comparaison avec des méthodes traditionnelles. Le système devra démontrer sa capacité à économiser une part significative de l'eau utilisée, à améliorer la stabilité des rendements agricoles, et à réduire les coûts liés à l'énergie et à la maintenance. Au-delà de la démonstration technique, le projet s'inscrit dans une démarche de durabilité, visant à renforcer l'autonomie hydrique des exploitations, à préserver les ressources naturelles et à contribuer à une agriculture plus résiliente face aux changements climatiques.

## **2.5 Conclusion**

Ce chapitre a permis de poser les bases du travail en définissant précisément les objectifs poursuivis. Le mémoire s'inscrit dans une logique de réponse concrète aux limites des systèmes d'irrigation traditionnels, en proposant une approche automatisée et intelligente capable d'optimiser la gestion de l'eau en agriculture. L'enjeu ne se limite pas à l'innovation technologique, mais vise également une amélioration mesurable des pratiques agricoles, en conjuguant efficacité hydrique, stabilité des rendements et réduction des coûts d'exploitation.

Les différentes étapes prévues, de la conception à l'évaluation du prototype, visent à aboutir à une solution fonctionnelle et adaptée aux réalités du terrain. Le projet ambitionne ainsi de contribuer à la modernisation des exploitations agricoles tout en s'inscrivant dans une démarche durable et responsable. Le chapitre suivant présentera la méthodologie adoptée pour la mise en œuvre du système proposé, en détaillant les choix techniques, les outils utilisés et l'organisation des différentes phases de développement.

## **Chapitre 3**

# **Conception du Système Intelligent**

---

### **3.1 Description du système proposé**

L'intégration des technologies intelligentes dans le domaine agricole constitue aujourd'hui une avancée majeure vers une agriculture durable et performante. Le système que nous proposons vise à automatiser le processus d'irrigation grâce à une architecture matérielle simple, mais robuste et fonctionnelle. L'objectif principal est d'assurer une gestion optimisée de l'eau, en s'appuyant sur des données précises fournies par des capteurs d'humidité du sol, et en déclenchant l'irrigation uniquement lorsque cela est nécessaire. Ce système intelligent est conçu autour d'un microcontrôleur ESP32, reconnu pour sa puissance de calcul, sa faible consommation d'énergie et sa connectivité Wi-Fi intégrée. Le système comprend également un ou plusieurs capteurs d'humidité du sol de type capacitif, capables de détecter la teneur en eau de manière précise, ainsi que des modules relais pour le pilotage automatique de pompes à eau. Le choix d'un tel système répond à plusieurs défis rencontrés dans le secteur agricole, notamment le gaspillage de l'eau, le manque de main-d'œuvre spécialisée, et la difficulté de surveiller en permanence l'état des cultures. En automatisant ces tâches critiques, l'agriculteur gagne non seulement du temps, mais contribue aussi à préserver les ressources naturelles, tout en augmentant les rendements. Le système est conçu de manière modulaire, ce qui le rend facilement extensible et adaptable à différentes tailles d'exploitations. Il peut être alimenté par des sources d'énergie alternatives comme les panneaux solaires, afin de garantir une autonomie en zones rurales. Grâce à la connectivité offerte par l'ESP32, il est aussi possible de surveiller à distance l'état du sol et l'état de fonctionnement du système à travers une application mobile, telle que Blynk. Cette capacité de surveillance et de contrôle à distance constitue une véritable révolution dans la manière de gérer l'irrigation agricole. De plus, ce système est capable de prendre des décisions localement, sans dépendre d'un serveur externe, ce qui augmente sa fiabilité dans les zones où la connexion Internet est instable. La robustesse du matériel, la facilité de montage et la possibilité de calibration selon les cultures font de ce système une solution complète et accessible pour les agriculteurs soucieux de moderniser leurs pratiques. Cette section détaille les composants, les liaisons logiques entre eux, ainsi que leur rôle dans le bon fonctionnement global du système.

### **3.2 Besoins fonctionnels et contraintes techniques**

Le système intelligent d'irrigation agricole repose sur une architecture matérielle conçue pour fonctionner de manière autonome, efficace et adaptée aux conditions climatiques locales. Les besoins fonctionnels définissent les fonctions que le système doit assurer, tandis que les contraintes techniques déterminent les limites technolo-

---

giques et environnementales à respecter pour garantir le bon fonctionnement du dispositif. Pour cela, nous identifions les besoins suivants :

### **Carte de contrôle :**

- **Fonction :** Cœur du système embarqué qui assure la collecte, le traitement des données issues des capteurs, la prise de décision automatisée et la communication avec l'interface utilisateur via Internet.
- **Contraintes techniques :**
  - Double cœur haute performance (240 MHz) pour permettre l'exécution de tâches en parallèle.
  - Connexion Wi-Fi et Bluetooth intégrée.
  - Faible consommation d'énergie pour une alimentation solaire autonome.

### **Capteur d'humidité du sol :**

- **Fonction :** Mesure en temps réel du taux d'humidité du sol.
- **Contraintes techniques :**
  - Précision suffisante pour détecter les seuils critiques (<30 %, 50 %, >70 %).
  - Sortie analogique/numérique compatible la carte de contrôle.
  - Étanchéité à l'humidité et aux conditions extérieures.

### **Capteur de température et d'humidité de l'air :**

- **Fonction :** Fournit des données climatiques supplémentaires.
- **Contraintes techniques :**
  - Précision :  $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$  pour la température,  $\pm 2-5\%$  pour l'humidité.
  - Temps de réponse rapide.
  - Faible consommation énergétique.

### **Afficheur LCD (16x2) :**

- **Fonction :** Affichage en temps réel des données mesurées.
- **Contraintes techniques :**
  - Interface I2C pour simplifier le câblage.
  - Bonne lisibilité en plein jour.

---

## **Module Relais (2 canaux) :**

- **Fonction :** Contrôle de l'activation des deux pompes à eau.
- **Contraintes techniques :**
  - Supporte les charges DC compatibles avec les pompes.
  - Isolation optique pour protéger le contrôleur.

## **Actionneurs – Pompes à eau (x2) :**

- **Fonction :** Effectuer l'irrigation selon les besoins en eau détectés.
- **Contraintes techniques :**
  - Alimentation compatible avec le système solaire et les relais.
  - Débit adapté à la surface agricole.
  - Résistance aux environnements extérieurs.

## **Système d'alimentation solaire :**

### **Panneaux solaires polycristallins (x3) :**

- **Spécifications :** 5V, 400mA, 2W chacun.
- **Fonction :** Fournir l'énergie nécessaire à l'ensemble du système.
- **Contraintes :**
  - Orientation optimale pour maximiser l'exposition solaire.
  - Étanchéité et résistance aux conditions extérieures.

### **Module de charge solaire :**

- **Fonction :** Régulation de la charge des batteries à partir des panneaux solaires.
- **Contraintes :**
  - Intégration d'un contrôleur de charge (type MPPT recommandé).
  - Protection contre surcharge, court-circuit et décharge profonde.

### **Batteries lithium-ion rechargeables :**

- **Spécifications :** 3.7V, 4800mAh (ULTRAFIRE).
- **Fonction :** Stocker l'énergie pour assurer l'autonomie du système.
- **Contraintes :**
  - Intégration sécurisée avec boîtier de protection.
  - Longévité : plus de 500 cycles de charge/décharge.

---

### 3.3 Matériel utilisé

Une fois nos besoins matériels identifiés, nous avons acquis le matériel disponible sur le marché comme suit :

#### Le microcontrôleur ESP32 :

Le microcontrôleur **ESP32** est au cœur de notre système intelligent d'irrigation. Il s'agit d'un microcontrôleur moderne, très performant, qui intègre des fonctionnalités avancées telles que la connectivité Wi-Fi et Bluetooth, une capacité de calcul élevée, et plusieurs entrées/sorties numériques et analogiques. L'ESP32 est particulièrement adapté aux projets de l'Internet des objets (IoT), où il permet de collecter des données de capteurs, de prendre des décisions localement, et de transmettre les informations à distance via le réseau. Grâce à sa faible consommation énergétique, il peut fonctionner efficacement avec une alimentation solaire, ce qui le rend idéal pour des installations agricoles en milieux isolés.



FIGURE 3.1 – ESP32-WROOM-32

#### Caractéristiques essentielles de l'ESP32

- Processeur dual-core cadencé jusqu'à 240 MHz

- 
- Connectivité Wi-Fi et Bluetooth intégrée
  - Jusqu'à 36 broches GPIO multifonctionnelles
  - Faible consommation énergétique (Deep Sleep < 10  $\mu$ A)
  - Compatible avec Arduino IDE et MicroPython

## Capteur d'humidité du sol

Le capteur résistif d'humidité du sol est l'un des composants les plus simples et les plus utilisés dans les systèmes d'irrigation automatiques à faible coût. Il permet de détecter la teneur en eau dans le sol en mesurant la résistance électrique entre deux électrodes métalliques insérées dans la terre. Ce type de capteur est particulièrement adapté aux projets pédagogiques et aux applications ne nécessitant pas une précision très élevée. Malgré sa simplicité, il reste un outil efficace pour déclencher ou stopper l'irrigation automatiquement selon l'humidité détectée.

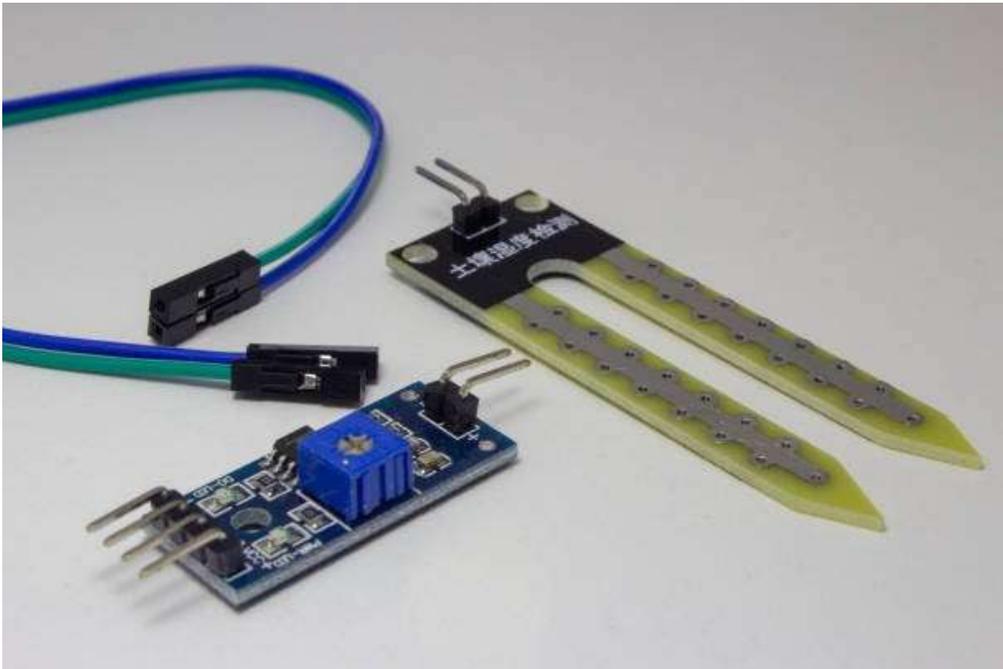


FIGURE 3.2 – Capteur d'humidité de sol (Soil Moisture Sensor)

### Caractéristiques essentielles du capteur d'humidité du sol

- Type : Capteur capacitif d'humidité du sol
- Tension de fonctionnement : 3.3V – 5V

- 
- Signal de sortie : Analogique
  - Haute résistance à la corrosion (pas d'oxydation)
  - Facile à interfacer avec les microcontrôleurs (ex. ESP32)

## Capteur DHT22

Le **DHT22**, également connu sous le nom *AM2302*, est un capteur numérique conçu pour mesurer la température et l'humidité avec une grande précision. Il est largement utilisé dans des projets liés à l'agriculture intelligente, les stations météorologiques et les systèmes de domotique. Ce capteur offre une plage de mesure étendue, une bonne stabilité et une sortie numérique facile à exploiter avec des microcontrôleurs comme l'ESP32.



FIGURE 3.3 – Capteur DHT22

---

### Caractéristiques principales :

- **Type** : Capteur numérique de température et d'humidité.
- **Plage de température** : de  $-40^{\circ}\text{C}$  à  $+80^{\circ}\text{C}$  avec une précision de  $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ .
- **Plage d'humidité** : de 0% à 100% d'humidité relative avec une précision de  $\pm 2\%$  à  $\pm 5\%$ .
- **Tension de fonctionnement** : entre 3.3V et 6V.
- **Sortie** : signal numérique (1 fil de données).
- **Fréquence d'échantillonnage** : 1 mesure toutes les 2 secondes (0.5 Hz).
- **Avantage** : grande précision, bonne stabilité et facilité d'intégration.

### Afficheur LCD I2C

L'afficheur **LCD I2C** est une version optimisée de l'écran LCD classique 16x2, qui intègre un module d'interface I2C permettant de simplifier considérablement les connexions avec un microcontrôleur comme l'ESP32. Contrairement à la version parallèle nécessitant jusqu'à 8 fils, l'interface I2C permet de communiquer avec l'écran en utilisant seulement deux lignes : SDA (données) et SCL (horloge). Cela permet non seulement de réduire l'encombrement du câblage mais aussi de libérer des broches pour d'autres capteurs ou modules dans un projet complexe. Il est largement utilisé dans les projets électroniques embarqués pour afficher des données comme la température, l'humidité, l'état de l'irrigation, ou toute autre information pertinente dans les systèmes agricoles intelligents.

### Caractéristiques principales :

- **Type** : Écran LCD 16x2 (16 caractères sur 2 lignes) avec module I2C intégré.
- **Interface** : I2C (SDA, SCL).
- **Adresse I2C par défaut** : généralement 0x27 ou 0x3F.
- **Tension de fonctionnement** : 5V (compatible avec 3.3V via convertisseur logique ou résistance).
- **Consommation** : faible consommation, adaptée aux systèmes basse énergie.
- **Contraste ajustable** : via potentiomètre intégré au module I2C.
- **Compatibilité** : facile à interfacer avec Arduino, ESP32, Raspberry Pi.
- **Avantages** : gain de broches, simplicité de câblage, idéal pour les projets embarqués.



FIGURE 3.4 – afficheur LCD I2C

## Module Relais

Le **module relais** est un composant électromécanique permettant de contrôler des charges électriques de puissance (telles que des pompes, moteurs ou lampes) à l'aide de signaux de faible puissance issus d'un microcontrôleur comme l'ESP32. Il joue un rôle essentiel dans les systèmes d'irrigation intelligente, en servant d'intermédiaire entre la commande numérique et l'activation de dispositifs électromécaniques. Grâce à sa capacité d'isoler le circuit de contrôle du circuit de puissance, le relais permet de garantir la sécurité et la stabilité du système. Il existe en différentes versions (1 canal, 2, 4 ou 8 canaux), selon le nombre d'éléments à contrôler.

### Caractéristiques principales :

- **Type** : Relais électromécanique avec déclenchement par signal logique.
- **Nombre de canaux** : généralement de 1 à 8 selon le modèle.
- **Tension d'activation** : 5V (compatible avec signal logique 3.3V via transistor ou adaptation).
- **Courant de commande** : faible (environ 20 mA par canal).
- **Tension de charge supportée** : jusqu'à 250V AC ou 30V DC selon le modèle.

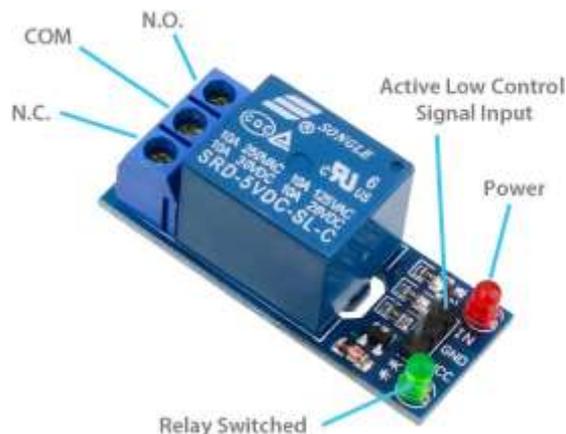


FIGURE 3.5 – relais de 1 canal

- **Courant de charge supporté** : généralement jusqu'à 10A.
- **Isolation** : optocoupleur intégré pour protéger le microcontrôleur.
- **Bornes de sortie** : NO (Normalement Ouvert), NC (Normalement Fermé), et COM (Commun).
- **Avantages** : sécurité électrique, contrôle de charges élevées, fiabilité.

### Pompe à eau :

La **pompe à eau** est l'un des actionneurs principaux dans un système agricole automatisé. Elle permet d'assurer l'arrosage des cultures en fonction des données de capteurs d'humidité. Son activation est généralement contrôlée par un relais, ce qui permet au système de déclencher l'irrigation uniquement lorsque cela est nécessaire, favorisant ainsi un usage rationnel de l'eau.

#### Caractéristiques principales :

- **Type** : Pompe à eau submersible ou de surface.
- **Tension de fonctionnement** : généralement 6V à 12V (DC).
- **Débit** : varie selon le modèle, généralement entre 1 et 3 L/min pour les mini-pompes.
- **Consommation** : entre 0.5A et 1.5A selon la charge.
- **Commande** : via relais ou MOSFET contrôlé par microcontrôleur.
- **Utilisation** : irrigation ponctuelle selon l'humidité du sol.
- **Avantages** : automatisation de l'irrigation, économie d'eau, gain de temps.



FIGURE 3.6 – POMPE 5V

## Panneaux solaires polycristallins

Les **panneaux solaires polycristallins**, aussi appelés *modules photovoltaïques polycristallins*, sont des dispositifs conçus pour convertir l'énergie solaire en électricité à courant continu (DC) à l'aide de cellules photovoltaïques constituées de **silicium polycristallin**. Ce type de panneau se distingue par la structure de ses cellules composées de multiples cristaux de silicium fondus ensemble, ce qui lui confère un aspect bleu marbré caractéristique.

### Caractéristiques principales :

- **Coût de fabrication réduit** : Les cellules polycristallines sont moins coûteuses à produire que les cellules monocristallines, car leur processus de fabrication est moins exigeant en énergie.
- **Bonne efficacité dans les climats chauds** : Même si leur rendement est légèrement inférieur à celui des panneaux monocristallins, les panneaux polycristallins offrent une performance plus stable à haute température.
- **Durabilité et longue durée de vie** : Ils peuvent fonctionner efficacement pendant 20 à 25 ans avec peu d'entretien, ce qui en fait une solution fiable pour les installations en milieu agricole.
- **Impact environnemental plus faible** : Leur production génère moins de pertes de matériau par rapport aux panneaux monocristallins.

Dans le cadre de ce système intelligent de gestion de l'irrigation, nous utilisons **trois panneaux solaires polycristallins**, chacun ayant les spécifications suivantes :

- 
- **Tension de sortie (V) : 5V**
  - **Courant nominal (I) : 400 mA**
  - **Puissance maximale (P) : 2W**

Ces panneaux sont choisis pour leur capacité à fournir une alimentation constante suffisante pour faire fonctionner les capteurs, le microcontrôleur (ESP32), l'afficheur LCD et les relais actionnant les pompes. En situation réelle sur le terrain, ces panneaux sont exposés au soleil durant la journée et connectés à un **système de charge solaire avec batteries lithium 18650**, permettant une alimentation autonome et durable du système, même en l'absence d'ensoleillement. L'énergie générée est régulée par un **module de charge solaire**, qui protège contre les surtensions et optimise la charge de la batterie. Cela garantit que le système continue de fonctionner la nuit ou pendant les jours nuageux. Cette configuration réduit la dépendance aux sources d'électricité classiques, ce qui est particulièrement avantageux dans les zones agricoles isolées, où l'accès au réseau est limité ou inexistant.



FIGURE 3.7 – Cellules solaires en silicium polycristallin

---

## Module de charge de batterie

Le module de charge de batterie au lithium pour panneaux solaires joue un rôle essentiel dans les systèmes embarqués autonomes, notamment dans les solutions d'irrigation intelligente. Il permet de gérer efficacement la charge d'une *batterie au lithium de type 18650* à partir d'une source d'énergie renouvelable comme un *panneau solaire polycristallin*. Ce module intègre généralement un *convertisseur élévateur de tension* (boost converter) qui permet de fournir une tension de sortie stable et suffisante (souvent 5V ou 12V) pour alimenter les composants électroniques tels que les microcontrôleurs, les capteurs ou encore les actionneurs (pompes, relais, etc.). L'intérêt de ce module réside dans sa capacité à *convertir et stabiliser l'énergie solaire*, en assurant à la fois la *protection* de la batterie contre les surtensions, les décharges profondes et les courts-circuits, tout en maintenant une alimentation continue pour le système, même en l'absence de lumière solaire directe.

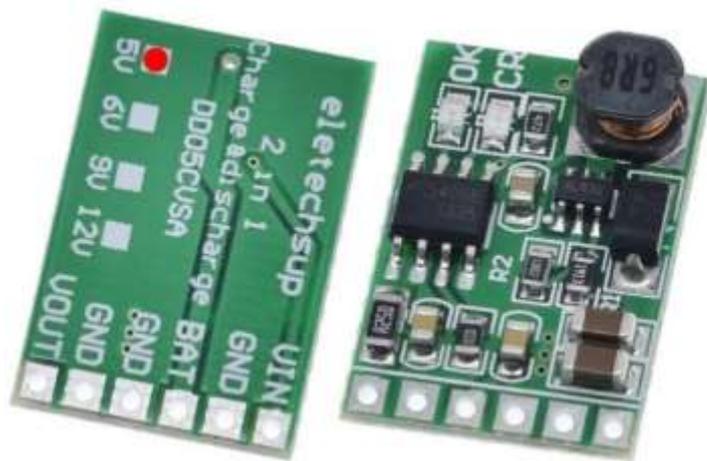


FIGURE 3.8 – Module de charge de batterie au lithium pour panneaux solaires 5V 12V élévateur

### Caractéristiques principales :

- **Tension d'entrée** : de 5V à 12V, adaptée aux panneaux solaires ou à d'autres sources DC.
- **Tension de sortie** : ajustable selon les besoins (souvent fixée à 5V ou 12V).
- **Courant de charge** : jusqu'à 1A, selon le modèle utilisé.
- **Compatibilité** : batteries lithium-ion 3.7V de type 18650.

- 
- **Protection intégrée :**
    - contre la surcharge,
    - contre la décharge excessive,
    - contre les courts-circuits.
  - **Indicateurs LED :** pour le suivi de l'état de charge et de l'activité du module.
  - **Convertisseur élévateur (boost) :** permet d'élever la tension de la batterie pour alimenter les composants plus gourmands.
  - **Efficacité énergétique :** entre 85 % et 95 %, ce qui garantit une bonne conversion d'énergie.
  - **Dimensions compactes :** facilite l'intégration dans les boîtiers des systèmes embarqués.
  - **Plage de température de fonctionnement :** de -20 °C à +70 °C, adaptée aux conditions agricoles.

Ce module représente ainsi un élément clé pour garantir *l'autonomie énergétique* du système d'irrigation intelligente, en maximisant l'exploitation de l'énergie solaire et en assurant la continuité du service même dans des conditions environnementales difficiles.

## **Pile au lithium rechargeable 18650 3.7V**

La pile au lithium de type **18650** est l'une des sources d'alimentation les plus couramment utilisées dans les projets électroniques embarqués, en raison de sa haute densité énergétique, sa longue durée de vie, et sa capacité de recharge. Le modèle ULTRAFIRE 18650 3.7V 4800mAh est particulièrement apprécié pour alimenter des dispositifs portables ou autonomes tels que les systèmes d'irrigation intelligents, où une alimentation stable et durable est nécessaire. Elle est idéale pour les systèmes intégrés à énergie solaire, car elle permet de stocker l'énergie collectée par les panneaux pendant la journée, et de la restituer de manière fiable pour faire fonctionner les microcontrôleurs (comme l'ESP32), les capteurs, les modules relais et les pompes, même en l'absence d'ensoleillement. Sa capacité élevée assure une autonomie prolongée, ce qui est essentiel dans les applications agricoles en milieu isolé.

### **Caractéristiques principales :**

- **Type :** Batterie lithium-ion rechargeable 18650
- **Tension nominale :** 3.7 Volts
- **Capacité :** jusqu'à 4800 mAh (variable selon le modèle réel)



FIGURE 3.9 – Pile au lithium rechargeable 18650 3.7V ULTRAFIRE 4800mAh

- **Tension de charge maximale** : 4.2 V
- **Courant de décharge continu recommandé** : généralement entre 1A et 2A
- **Durée de vie** : environ 500 à 1000 cycles de charge/décharge
- **Temps de charge** : 3 à 6 heures selon le courant de charge
- **Poids moyen** : environ 45 g
- **Température de fonctionnement** :
  - en charge : de 0 °C à 45 °C
  - en décharge : de -20 °C à 60 °C
- **Sécurité** :
  - Protection contre la surcharge (via BMS externe)
  - Protection contre les courts-circuits (selon l'usage)

Cette pile, combinée à un *module de charge et un panneau solaire*, constitue une solution énergétique fiable, renouvelable et adaptable aux contraintes des zones rurales, contribuant ainsi à une agriculture plus durable et autonome.

### 3.4 Logique d'interconnexion des composants

La logique d'interconnexion des composants repose sur une architecture simplifiée permettant une séparation fonctionnelle entre la collecte des données, le traitement, le contrôle et la communication. Les capteurs d'humidité du sol sont connectés aux entrées analogiques de l'ESP32, tandis que le capteur DHT22 est relié à une broche numérique. Tous les capteurs et composants sont alimentés

---

directement en 5V à partir d'une seule source d'alimentation, sans utilisation de condensateurs ni d'éléments supplémentaires pour la stabilisation des signaux.

Le contrôle des pompes est assuré à l'aide de relais commandés par les broches numériques (GPIO) de l'ESP32, fonctionnant également en 5V. Le système a été conçu de manière simple, sans recourir à des fusibles thermiques, diodes de roue libre, ni convertisseurs abaisseurs de tension, en se basant sur une alimentation unique pour tous les composants. L'ensemble du système est ainsi alimenté par une seule source de 5V partagée entre l'ESP32, les capteurs, les relais et les pompes, ce qui facilite l'assemblage et réduit la complexité du câblage. La figure 3.10 présente le montage complet du système d'irrigation intelligent, intégrant l'ensemble des composants matériels nécessaires à son fonctionnement.

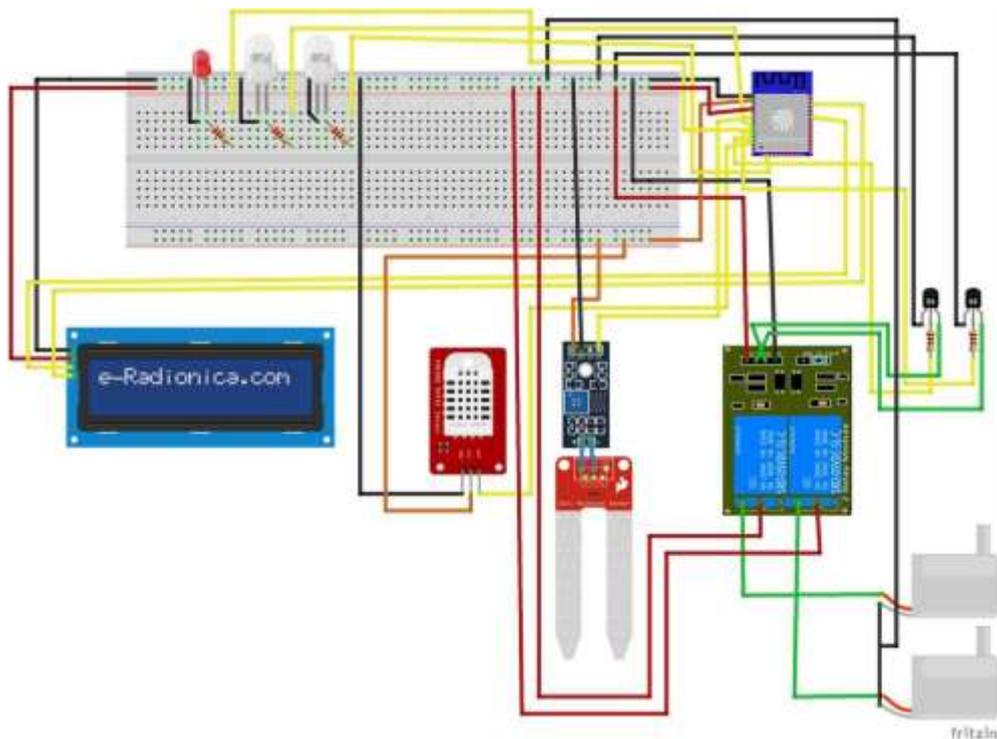


FIGURE 3.10 – Montage physique du système d'irrigation intelligent, incluant les capteurs, l'ESP32, les relais, les pompes et l'alimentation.

Enfin, la communication avec l'utilisateur est assurée via la connectivité Wi-Fi de l'ESP32, permettant l'envoi des données vers l'application mobile *Blynk* ou vers un serveur cloud pour la visualisation et l'analyse à distance.

---

### 3.4.1 Spécifications de performance attendues

Afin de garantir la fiabilité, l'efficacité et la robustesse du système dans un environnement réel, plusieurs spécifications techniques ont été définies. Ces critères servent à guider le choix des composants et à valider leurs performances après intégration.

Les capteurs d'humidité du sol doivent présenter une précision minimale de  $\pm 5\%$  afin d'assurer un déclenchement pertinent du système d'irrigation. Une mesure fiable de l'état hydrique du sol est essentielle pour éviter à la fois le sous-arrosage et le gaspillage d'eau.

Concernant le microcontrôleur **ESP32**, il est attendu qu'il soit capable de lire simultanément plusieurs capteurs, de traiter les données via des algorithmes embarqués, et de gérer la communication sans fil en temps réel via Wi-Fi. En parallèle, une faible consommation énergétique est exigée, notamment en mode veille, avec une consommation inférieure à  $10\mu A$ , afin d'optimiser l'autonomie énergétique, surtout en cas d'alimentation par panneau solaire.

Les **modules relais** doivent permettre la commutation de charges électriques comprises entre 5 et 10A, avec un temps de réponse inférieur à 100ms. Ils doivent être fiables et capables de supporter des cycles de commutation fréquents sans défaillance.

Les  **pompes à eau**  utilisées doivent assurer un débit minimal de 2 à 3 litres par minute, fonctionner en continu pendant au moins 30 minutes sans surchauffe, et être certifiées IP55 ou plus pour garantir leur résistance à l'humidité et à la poussière dans un usage extérieur.

Enfin, le **système d'alimentation** doit délivrer des tensions stables adaptées à chaque sous-système : 3.3V pour l'ESP32, 5V pour les relais, et 12V pour les pompes. Il est aussi primordial qu'il intègre des dispositifs de sécurité comme des protections contre les surtensions, les surintensités et les courts-circuits afin d'assurer la longévité et la sécurité du système global.

## 3.5 Aspect logiciel du système intelligent

L'aspect logiciel constitue la pierre angulaire de tout système embarqué intelligent, en particulier dans le domaine de l'agriculture de précision. Dans le cadre de notre projet, la programmation joue un rôle essentiel dans l'automatisation des processus d'irrigation et dans la transformation des données environnementales en

---

actions concrètes et optimisées. Grâce à des algorithmes implémentés sur la carte ESP32, le système est capable d'interpréter les informations issues de différents capteurs (humidité du sol, température, etc.), de prendre des décisions autonomes basées sur des seuils prédéfinis, et de déclencher les actionneurs (comme les pompes) de manière efficace. La programmation permet ainsi de gérer dynamiquement les cycles d'irrigation, de réagir en temps réel aux changements des conditions climatiques, et de fournir à l'utilisateur une interface de visualisation et de contrôle via une application mobile, ici Blynk.

### 3.5.1 Environnement de développement Arduino

L'**Arduino IDE** (Environnement de Développement Intégré) constitue l'outil principal utilisé lors du développement. Il permet d'écrire, compiler, téléverser et déboguer le code en langage C/C++. Il fournit également une interface conviviale avec des outils intégrés comme le moniteur série pour l'affichage des données en temps réel, ainsi qu'un gestionnaire de bibliothèques facilitant l'intégration de fonctionnalités avancées.

Afin d'assurer la réactivité, la connectivité et la gestion intelligente du système d'irrigation, nous avons intégré un ensemble de bibliothèques spécialisées, chacune jouant un rôle fonctionnel spécifique :

- Blynk.h : assure la communication entre l'ESP32 et la plateforme Blynk via Wi-Fi, permettant l'envoi des données des capteurs et la réception de commandes à distance.
- WiFi.h ou WiFiManager.h : permettent de gérer la connexion au réseau de manière statique ou dynamique, avec possibilité de configuration via une interface Web.
- DHT.h et Adafruit\_Sensor.h : utilisées pour lire les données environnementales (température et humidité).
- SimpleTimer.h ou BlynkTimer.h : utilisées pour exécuter des fonctions périodiquement sans bloquer la boucle principale.
- LiquidCrystal\_I2C.h : permet l'affichage local des données sur un écran LCD via le protocole I2C.
- ESPAsyncWebServer.h (optionnelle) : permet de créer une interface Web locale sur l'ESP32, accessible depuis un navigateur.
- EEPROM.h : utilisée pour stocker localement certaines valeurs ou paramètres même après un redémarrage du microcontrôleur.

L'utilisation combinée de l'**Arduino IDE** et de ces bibliothèques permet un développement modulaire, rapide et facilement maintenable, tout en assurant une

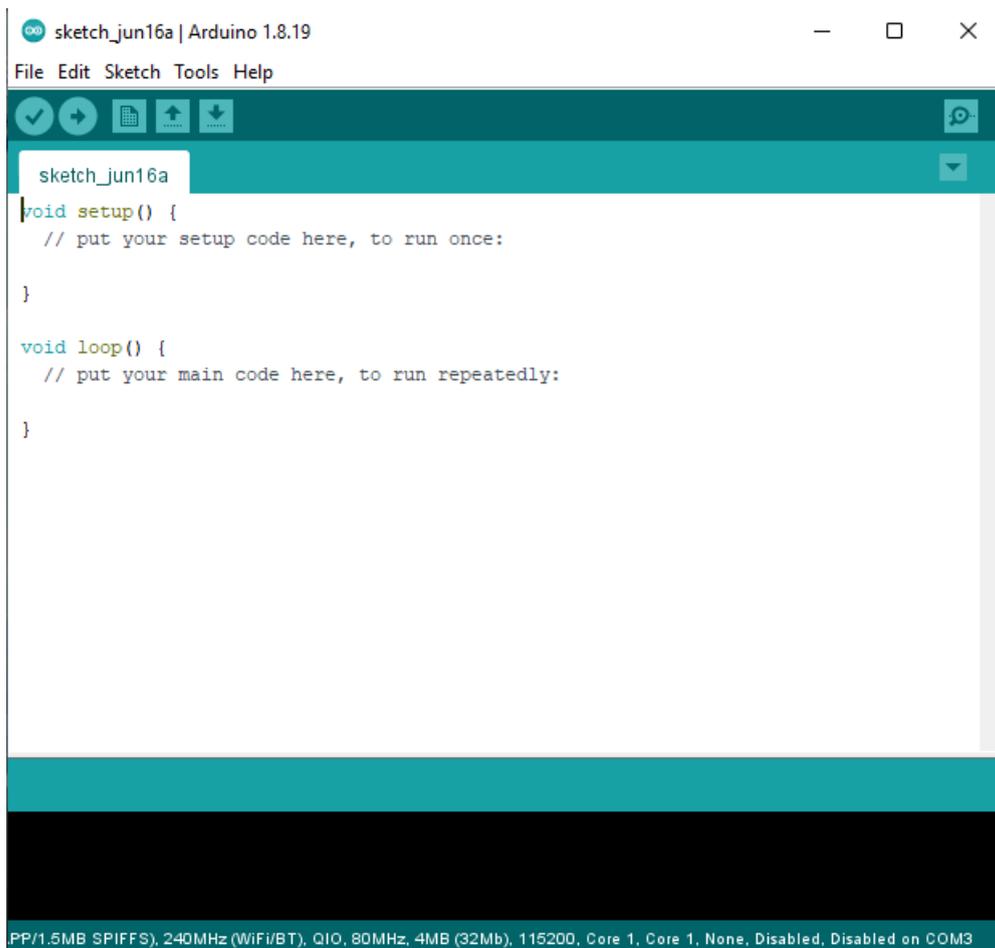


FIGURE 3.11 – ARDUINO IDE

```
#include <WiFi.h>
#include <BlynkSimpleEsp32.h>
#include <DHT.h>
#include <Wire.h>
#include <LiquidCrystal_I2C.h>
```

FIGURE 3.12 – Les bibliothèques

communication fluide avec les interfaces cloud et mobiles. Cet environnement constitue donc une base solide pour la mise en œuvre d'un système d'irrigation

---

intelligent et automatisé.

### 3.5.2 Plateforme Blynk

La plateforme **Blynk** constitue une solution complète et modulaire dédiée aux projets de l'Internet des Objets (IoT). Elle permet de connecter des microcontrôleurs comme l'**ESP32** à des interfaces utilisateurs via le cloud, en facilitant à la fois la surveillance, le contrôle, et l'automatisation des systèmes embarqués à distance. Contrairement à une simple application mobile, Blynk offre une architecture distribuée comprenant plusieurs composants interdépendants :

- **La bibliothèque Blynk** (Blynk.h) : installée directement sur la carte ESP32, elle assure la liaison logicielle entre le matériel et les services cloud. Elle permet l'envoi de données (comme l'humidité du sol) et la réception d'instructions (activation de pompes, changement de mode...).
- **Le serveur Blynk Cloud** : hébergé sur Internet, ce serveur central gère l'échange de données entre les dispositifs embarqués et les différentes interfaces utilisateur. Il assure la *synchronisation en temps réel*, la *sécurité des transmissions*, ainsi que le *stockage temporaire* des données.
- **La console Blynk (Blynk.Console)** : c'est une interface web professionnelle qui permet aux développeurs de configurer et surveiller leur projet. Elle offre des fonctions avancées telles que :
  - Gestion des appareils (*Device Management*)
  - Définition des rôles et droits d'accès
  - Paramétrage des automatismes et des alertes
  - Surveillance des historiques de données
- **Le Auth Token** : chaque appareil enregistré sur Blynk reçoit un identifiant unique (jeton d'authentification) qui sert à établir une connexion sécurisée entre la carte ESP32 et le serveur Blynk.

Cette structure modulaire rend la plateforme adaptée aux projets d'agriculture intelligente, où les données doivent être transmises de manière fiable à travers Internet, tout en gardant une capacité de contrôle et de supervision flexible. L'intégration de Blynk permet également d'assurer une évolutivité du système, en rendant possible l'ajout de nouveaux capteurs, de règles automatisées, ou d'utilisateurs, sans reconfiguration matérielle complexe.



FIGURE 3.13 – BLYNK

## **3.6 Traitement des données des capteurs**

### **3.6.1 Lecture analogique des capteurs d'humidité**

Les capteurs d'humidité du sol utilisés dans notre système délivrent une tension analogique proportionnelle au niveau d'humidité présent dans le sol. Cette tension est lue par l'ESP32 via ses broches d'entrée analogique (ADC), puis convertie en valeur numérique allant de 0 à 4095. Pour exploiter ces données de manière significative, on applique un recalibrage (mise à l'échelle) permettant d'obtenir un pourcentage d'humidité entre 0% (sol très sec) et 100% (sol saturé en eau).

### **3.6.2 Lecture numérique du capteur DHT22**

Le capteur DHT22 est un capteur numérique combiné permettant de mesurer à la fois la température (en °C) et l'humidité de l'air (en %). Il communique avec le microcontrôleur ESP32 à travers une broche digitale unique, en utilisant un protocole de communication spécifique. L'ESP32 lit les données via une bibliothèque

---

dédiée (comme DHT.h), qui se charge de décoder le signal et de fournir les valeurs prêtes à l'emploi dans le programme. Cette méthode de lecture numérique offre une grande fiabilité et simplifie le traitement des données.

### **Collecte des données du capteur d'humidité du sol et du capteur DHT22 par l'ESP32**

Dans le système d'irrigation intelligent proposé, la collecte des données environnementales est assurée par deux capteurs principaux : un capteur d'humidité du sol et un capteur de température et d'humidité ambiantes de type DHT22. Le capteur d'humidité du sol est relié à une entrée analogique de l'ESP32 (par exemple GPIO34), et fournit une tension proportionnelle au taux d'humidité présent dans le sol. Cette tension est lue par le convertisseur analogique-numérique (ADC) intégré à l'ESP32, puis transformée en pourcentage d'humidité à l'aide d'une opération de mise à l'échelle (*mapping*) définie entre deux valeurs de référence : *air value* (sol sec) et *water value* (sol saturé).

Le capteur DHT22, quant à lui, est connecté à une broche numérique de l'ESP32, et utilise un protocole de communication de type One-Wire pour transmettre de manière séquentielle deux valeurs : la température (en degrés Celsius) et l'humidité relative (en %). Ces données sont lues de manière cyclique à intervalles réguliers grâce à un minuteur logiciel, puis stockées temporairement pour être traitées dans les étapes ultérieures du programme. Cette phase de collecte constitue la base essentielle sur laquelle repose l'ensemble du processus de décision automatique du système.

### **Traitement des données des capteurs et prise de décision automatique par l'ESP32**

Après la collecte des données d'humidité, le microcontrôleur **ESP32** les compare à des seuils prédéfinis.

- Lorsque le taux d'humidité est **inférieur à 30%**, **les deux pompes (pompe01 et pompe02)** sont activées automatiquement pour assurer un arrosage intensif.
- Si l'humidité est **comprise entre 30% et 70%**, seule **la pompe01** est activée, permettant un arrosage modéré.
- Lorsque l'humidité **dépasse 70%**, **les deux pompes sont désactivées** automatiquement.

Un **contrôle manuel reste toutefois possible via l'application Blynk**, même en cas d'arrêt automatique du système, ce qui offre à l'utilisateur une flexibilité d'intervention selon les besoins.



---

La figure 3.15 illustre une mesure de sécurité permettant de surveiller à distance la température ambiante, laquelle influence le délai de mise en marche des pompes. Lorsque cette température dépasse 35 °C (considérée comme relativement élevée), le système allume une LED rouge et envoie une notification via l'application Blynk, avertissant ainsi l'utilisateur.



FIGURE 3.15 – Diagramme de prise de décision basé sur la température mesurée par capteur DHT22 (géré par l'ESP32)

### 3.7.2 Gestion du temps d'activation des pompes

Pour éviter une usure prématurée des pompes et limiter leur consommation d'énergie, il est essentiel de gérer finement le temps pendant lequel elles restent activées. Le système intègre des délais ou temporisations programmées pour définir la durée d'arrosage après chaque déclenchement. Par exemple, une pompe peut être activée pendant 30 secondes ou 1 minute, en fonction du taux d'humidité mesuré, avant de s'éteindre automatiquement. Ce type de gestion permet d'optimiser l'usage des ressources en eau tout en prolongeant la durée de vie du matériel.

#### Sécurité logicielle : temporisation, anti-répétition

La stabilité du système nécessite la mise en place de mécanismes de sécurité logicielle, notamment pour éviter des déclenchements multiples et désordonnés. Le système utilise des temporisations pour empêcher des activations trop rapprochées ou répétitives, ce qui pourrait endommager les composants ou entraîner un fonctionnement instable. De plus, un mécanisme anti-répétition (ou "anti-rebond") est mis en œuvre afin de filtrer les signaux parasites ou trop fréquents, qui pourraient fausser la logique de commande. Grâce à ces sécurités logicielles, le système maintient un comportement cohérent, fiable et protégé contre les erreurs potentielles.

---

## 3.8 Interface utilisateur mobile (Blynk)

**Présentation de Blynk : boutons, sliders, affichage LCD virtuel** La plateforme **Blynk** constitue un environnement de développement mobile intuitif et modulaire, spécialement conçu pour les projets d'Internet des Objets (IoT). Elle permet de créer une interface graphique sur smartphone pour surveiller et contrôler à distance des systèmes embarqués comme l'ESP32.

Parmi les composants disponibles dans Blynk, on distingue :

- **Boutons (Buttons)** : utilisés pour exécuter des actions manuelles telles que l'allumage ou l'arrêt des pompes, ou encore le basculement entre les modes automatique et manuel.
- **Sliders** : utilisés pour ajuster dynamiquement des seuils ou des consignes, par exemple la température maximale autorisée.
- **LCD virtuel** : simule un écran LCD classique permettant d'afficher en temps réel des informations telles que la température, l'humidité et l'état du système.

L'interface est entièrement configurable sans codage, et permet ainsi une interaction simple et rapide avec le système physique.



FIGURE 3.16 – BLYNK MOBILE

---

**Envoi des valeurs de capteurs vers Blynk** Dans le cadre de notre système, les données issues des capteurs (comme le DHT22 pour la température et l'humidité, ou le capteur d'humidité du sol) sont transmises en temps réel à l'application Blynk à l'aide du réseau Wi-Fi.

La bibliothèque Blynk.h permet d'envoyer ces données via la fonction `Blynk.virtualWrite()`, selon un intervalle défini grâce au `BlynkTimer`. Les variables sont associées aux broches virtuelles comme suit :

- Température ambiante (°C) → V1
- Humidité de l'air (%) → V2
- Humidité du sol (%) → V0
- État de la pompe 1 et 2 → V3, V4
- État de la LED rouge d'alerte → V5
- État de la LED verte du voyant lumineux de la pompe 1 → V6
- État de la LED verte du voyant lumineux de la pompe 2 → V7

**Réception de commandes utilisateur (manuel/auto)** L'application permet également à l'utilisateur de contrôler le système à distance via des widgets interactifs :

- Un bouton de basculement (*switch*) permet de changer entre le mode automatique et manuel.
- En mode manuel, l'utilisateur peut allumer ou éteindre les pompes manuellement.
- En mode automatique, le comportement des pompes est déterminé automatiquement selon les seuils de température ou d'humidité définis dans le microcontrôleur.

Ces commandes sont traitées dans le programme via la fonction `BLYNK_WRITE(Vx)`.

Cette capacité de commande à distance renforce l'intelligence du système, et garantit une flexibilité optimale pour un usage agricole performant.

## 3.9 Flexibilité et adaptabilité du système

### 3.9.1 Possibilité de modifier les seuils via Blynk

L'une des caractéristiques majeures du système est sa flexibilité dans l'ajustement des paramètres de fonctionnement. Grâce à l'intégration de la plateforme mobile *Blynk*, l'utilisateur peut modifier à distance les seuils de déclenchement de

---

l'irrigation, tels que les niveaux critiques d'humidité du sol ou les limites de température. Ces seuils peuvent être ajustés dynamiquement via des sliders ou champs de saisie configurés dans l'application, sans avoir à reprogrammer le microcontrôleur. Cette souplesse permet d'adapter le comportement du système à des conditions agricoles variées, des types de sols différents, ou des cultures spécifiques ayant des besoins hydriques particuliers.

### **3.9.2 Passage entre mode manuel et automatique**

Le système permet également de passer facilement d'un mode de fonctionnement automatique, où les décisions sont prises en fonction des capteurs et des seuils définis, à un mode manuel, dans lequel l'utilisateur contrôle directement l'état des pompes. Ce basculement est géré via des boutons dans l'interface Blynk. Il permet, par exemple, de forcer l'irrigation en cas de besoin exceptionnel, ou de suspendre temporairement le mode automatique pour effectuer une maintenance. Cette capacité à commuter entre les deux modes augmente la réactivité du système et son adaptabilité à des situations imprévues.

### **3.9.3 Mise à jour du firmware (optionnelle)**

Pour garantir la pérennité du système et permettre son évolution dans le temps, une option de mise à jour du firmware à distance (*Over The Air – OTA*) peut être intégrée. Cette fonctionnalité permet de corriger des erreurs, d'ajouter de nouvelles fonctionnalités, ou d'optimiser le code sans intervention physique sur le dispositif. Bien qu'optionnelle, cette capacité de mise à jour contribue à la maintenabilité du système et offre une grande souplesse d'adaptation aux besoins futurs, notamment dans un cadre de déploiement à grande échelle.

## **3.10 Conclusion**

Le développement du système intelligent pour la rationalisation de l'irrigation agricole a nécessité l'intégration cohérente entre les volets matériel et logiciel. Du côté matériel, la sélection minutieuse des composants capteurs d'humidité du sol, capteur DHT22, modules relais, microcontrôleur ESP32, pompes, affichage LCD et alimentation solaire — a permis de construire une architecture robuste, économe en énergie et parfaitement adaptée aux contraintes du milieu agricole. L'utilisation de panneaux solaires pour l'alimentation du système constitue une réponse stratégique aux problématiques d'accès limité à l'électricité dans les zones rurales, tout en contribuant à une agriculture durable et autonome. La structure matérielle adoptée, simple mais efficace, repose sur une logique d'interconnexion claire et modulaire,

---

facilitant le déploiement, la maintenance et l'évolutivité du système. L'ensemble des composants a été sélectionné en fonction de leur compatibilité, de leur faible consommation énergétique et de leur fiabilité dans un environnement extérieur souvent contraignant.

Côté logiciel, la programmation sur ESP32 a permis d'automatiser la lecture des données, la prise de décision, et le déclenchement des pompes selon des seuils prédéfinis. Le recours à l'application mobile Blynk a offert une interface utilisateur intuitive, donnant accès au contrôle manuel, à la visualisation des données en temps réel, et à l'ajustement dynamique des paramètres. Des mécanismes de sécurité logicielle, comme la temporisation et la gestion anti-répétition, assurent une exécution fiable et stable du système sur le long terme. La complémentarité entre matériel et logiciel constitue le socle de l'intelligence du système. Cette synergie permet d'assurer une irrigation efficace, ciblée et adaptable, en réduisant le gaspillage de ressources hydriques et en optimisant l'énergie utilisée. En intégrant des technologies modernes comme l'IoT, l'énergie solaire et, à terme, l'intelligence artificielle, le projet s'inscrit pleinement dans la dynamique de transformation numérique de l'agriculture.

Cette convergence technologique entre matériel et logiciel démontre la faisabilité d'une solution intelligente, durable et reproductible, répondant aux besoins réels des agriculteurs et contribuant à bâtir une agriculture plus résiliente face aux défis environnementaux et économiques.

# **Chapitre 4**

## **Réalisation et mise en œuvre du système**

---

## 4.1 Introduction

Ce chapitre marque la transition de la phase théorique à la phase pratique, en concrétisant l'architecture précédemment conçue. Il est consacré à la mise en œuvre du système intelligent d'irrigation, en détaillant son assemblage, sa programmation et les tests effectués pour valider son bon fonctionnement. Nous y présentons également les résultats obtenus, les contraintes rencontrées lors de l'implémentation, ainsi que des pistes d'amélioration pour une optimisation future en conditions réelles.

## 4.2 Architecture générale du système

L'architecture générale de notre système d'irrigation intelligent repose sur une combinaison de composants matériels et logiciels travaillant ensemble de manière coordonnée. Le système est conçu pour surveiller en temps réel l'humidité du sol ainsi que la température et l'humidité de l'air, puis agir automatiquement sur l'irrigation en fonction des seuils prédéfinis.

Il se compose principalement de deux blocs :

- **Bloc capteurs et contrôle** : Il comprend un microcontrôleur ESP32, un capteur d'humidité du sol, un capteur de température et d'humidité (DHT22), ainsi que deux relais commandant les pompes. Ce bloc est responsable de la collecte des données environnementales et de la prise de décision.
- **Bloc d'exécution** : Il contient les pompes, les LED d'indication et les actionneurs qui sont activés ou désactivés selon les besoins en irrigation. Ce bloc peut être alimenté indépendamment et communiquer avec le bloc principal via un module sans fil (comme Xbee ou WiFi).

Une interface mobile développée à l'aide de la plateforme **Blynk** permet à l'utilisateur de visualiser les données en temps réel, de recevoir des alertes, et éventuellement de déclencher manuellement les pompes.

La communication entre les blocs est assurée par une liaison sans fil (par exemple Xbee), permettant une installation distante des modules dans le champ.

## 4.3 Partie matérielle

Le volet matériel est constitué d'un ensemble de composants électroniques intégrés, assemblés et connectés à l'unité de contrôle **ESP32**, dans le but d'exécuter les opérations de mesure, de traitement et de commande. Cette partie comprend les capteurs, l'unité centrale, les pompes, le module relais, les voyants lumineux

---

ainsi que l'écran d'affichage. L'accent a été mis sur la précision du montage et du câblage électrique en adéquation avec les objectifs du système.

### 4.3.1 Schéma de câblage

Le schéma de câblage constitue une référence essentielle pour comprendre comment les différents composants du système d'irrigation intelligent sont interconnectés. Il représente toutes les connexions entre le microcontrôleur ESP32, les capteurs, le module relais, les pompes, les voyants lumineux ainsi que l'écran LCD.

À travers ce schéma, les points suivants peuvent être mis en évidence :

- Le capteur **DHT22**, chargé de mesurer la température et l'humidité de l'air, est connecté à la broche GPIO 27.
- Le capteur d'humidité du sol est relié à l'entrée analogique GPIO 34, afin de fournir une lecture continue du niveau d'humidité.
- Le module relais à deux canaux est contrôlé via les broches GPIO 26 et GPIO 25, permettant l'activation des deux pompes selon le besoin.
- Deux voyants **LED verts** sont connectés respectivement aux broches GPIO 14 et GPIO 12, indiquant l'état de fonctionnement des pompes.
- Une **LED rouge**, reliée à la broche GPIO 33, s'allume lorsque la température dépasse un seuil critique.
- L'écran **LCD I2C** est connecté aux broches SDA (GPIO 21) et SCL (GPIO 22) pour l'affichage en temps réel des données relevées.
- Des **transistors NPN** sont utilisés pour protéger l'ESP32 contre les courants excessifs lors de l'activation des relais. Les bases sont reliées via des résistances de  $220\ \Omega$  aux sorties du microcontrôleur, les collecteurs vers les entrées des relais, et les émetteurs à la masse (GND).

Ce schéma est un outil indispensable lors de la phase de réalisation pratique du projet ainsi que pour les éventuelles opérations de maintenance.

### 4.3.2 Montage des composants

Le montage physique des composants a été réalisé sur une plaque d'essai (breadboard) de manière structurée afin de faciliter les tests et les modifications avant l'assemblage final. Le microcontrôleur **ESP32** a été placé au centre de la structure pour optimiser le câblage avec les différents modules.

Le capteur **DHT22** a été fixé à l'extrémité de la plaque pour permettre une bonne circulation de l'air et une lecture fiable de la température et de l'humidité. Le capteur d'humidité du sol a été positionné à proximité des relais pour minimiser la longueur des connexions analogiques.

[HTML]CoCoCo Composant	Broche ESP32	Remarque
DHT22 (DATA)	GPIO 27	Température et humidité de l'air
Capteur de sol (Signal)	GPIO 34	Sortie analogique
Relais IN1	GPIO 26	Contrôle Pompe 1
Relais IN2	GPIO 25	Contrôle Pompe 2
LED verte 1	GPIO 14	Indique Pompe 1 active
LED verte 2	GPIO 12	Indique Pompe 2 active
LED rouge (alerte)	GPIO 33	S'active si $T > 35^{\circ}\text{C}$
LCD I2C SDA	GPIO 21	Communication I2C
LCD I2C SCL	GPIO 22	Communication I2C
Transistor base 1	GPIO 26	Via résistance 220 $\Omega$
Transistor base 2	GPIO 25	Via résistance 220 $\Omega$

TABLE 4.1 – Connexion des composants avec l'ESP32



FIGURE 4.1 – ESP32 WROOM 32E PINOUT

Le module **relais double canal** a été installé sur le bord de la plaque pour isoler les circuits de puissance, tandis que les **deux pompes** ont été connectées directement via des fils robustes adaptés au courant nécessaire.

Des **LED vertes** ont été placées en façade du montage afin d'indiquer visuellement l'état des pompes, et une **LED rouge** a été intégrée dans la partie supérieure du système pour signaler les dépassements de température.

L'écran **LCD I2C** a été monté de façon visible pour afficher en temps réel les mesures collectées par les capteurs.

Enfin, des **transistors NPN** ont été intégrés entre les sorties numériques de

---

l'ESP32 et les entrées du module relais pour assurer une commutation fiable tout en protégeant le microcontrôleur. Toutes les connexions ont été soigneusement vérifiées afin d'éviter les courts-circuits et garantir la stabilité du système.

### 4.3.3 Alimentation électrique

Le système d'irrigation intelligent repose sur une alimentation électrique stable permettant le bon fonctionnement de tous les composants sans interruption ni risque de surcharge.

Dans ce projet, deux sources principales d'alimentation ont été utilisées :

- Le **port USB** de l'ESP32, connecté à un ordinateur ou à un adaptateur secteur, fournissant une tension stable de 5V, assurant l'alimentation de la carte principale ainsi que de certains modules comme l'écran LCD et le module relais.
- Une **batterie externe** (par exemple une batterie lithium 3.7V ou un Power Bank) utilisée pour permettre un fonctionnement autonome du système en l'absence d'une alimentation fixe.

Concernant la distribution électrique :

- Les composants fonctionnant en 3.3V, comme le capteur DHT22 et le capteur d'humidité du sol, sont directement alimentés via la sortie 3.3V de l'ESP32.
- Les composants nécessitant du 5V, tels que l'écran LCD et le module relais, sont alimentés via la broche 5V.

Des précautions ont été prises pour ne pas dépasser le courant maximal supporté par l'ESP32. Ainsi, des transistors ont été intégrés afin de protéger la carte lors de la commutation de charges élevées, notamment les pompes.

## 4.4 Environnement de développement :

### 4.4.1 Arduino IDE

Dans le cadre de la réalisation logicielle du système d'irrigation intelligent, l'environnement de développement utilisé est **Arduino IDE**, un logiciel open-source conçu pour le développement d'applications embarquées sur microcontrôleurs tels que l'ESP32.

Ce dernier permet d'écrire, de compiler et de téléverser le programme dans le microcontrôleur à travers une liaison USB. Le langage de programmation employé est basé sur le **langage C/C++**, avec la possibilité d'intégrer des bibliothèques spécifiques permettant la gestion de capteurs (DHT22, capteurs d'humidité du

---

sol), d'actionneurs (pompes), d'écrans (LCD I2C), et de communication avec l'application mobile **Blynk**.

Avant le téléversement, il est indispensable de configurer le type de carte (*ESP32 Dev Module*) ainsi que le port série dans le menu *Outils* de l'IDE. Une fois la configuration terminée, l'utilisateur procède à l'écriture du code dans l'éditeur intégré.

**Structure du programme** Le programme principal respecte l'architecture standard d'un sketch Arduino, composée de trois sections essentielles :

- **Déclarations initiales** : elles incluent l'initialisation des bibliothèques nécessaires (`#include <DHT.h>`, `<Wire.h>`, `<LiquidCrystal_I2C.h>`, `<WiFi.h>`, `<BlynkSimpleEsp32.h>`) ainsi que la déclaration des constantes et des variables globales.
- **Fonction `setup()`** : exécutée une seule fois au démarrage, elle contient l'initialisation des broches d'E/S, la configuration des capteurs et de l'afficheur LCD, l'établissement de la connexion Wi-Fi, et l'initialisation de la communication avec le serveur Blynk.
- **Fonction `loop()`** : exécutée en boucle, elle assure la lecture des données (température, humidité de l'air, humidité du sol), le traitement des seuils, le contrôle des pompes, l'affichage sur l'écran LCD, et la transmission en temps réel à l'application Blynk.

**Routines et callbacks** En complément des fonctions de base, des **routines spécifiques** ont été développées pour isoler certaines tâches répétitives comme l'activation des pompes ou la gestion des seuils.

Par ailleurs, l'intégration avec Blynk repose sur des **callbacks**, c'est-à-dire des fonctions appelées automatiquement par la bibliothèque Blynk en réponse à des événements provenant de l'application mobile ou du serveur.

#### 4.4.2 Interface web via ordinateur : Blynk Console

La plateforme **Blynk Console** constitue l'interface officielle de gestion des projets Blynk via un navigateur sur ordinateur. Elle est destinée aux développeurs et utilisateurs souhaitant un contrôle avancé de leurs systèmes embarqués (comme l'ESP32). Cette plateforme permet de surveiller les performances du projet en temps réel, de configurer les paramètres, et de personnaliser l'interface graphique de manière plus flexible que l'application mobile.

---

**Création et configuration du projet** Après l'accès à la plateforme via un navigateur, l'utilisateur effectue les étapes suivantes :

1. Se connecter à son compte ou créer un nouveau compte

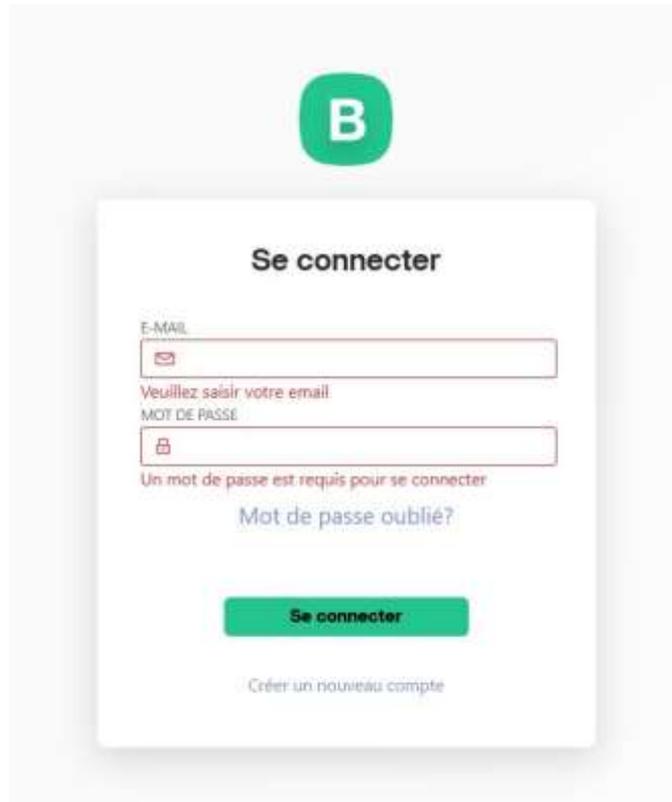


FIGURE 4.2 – créer un nouveau compte

2. Créer un **Template** représentant l'architecture générale du projet, comprenant :
  - Le nom du template.
  - Le type d'appareil (ESP32).
  - La définition des *Datastreams* : chaque variable ou donnée du système (température, humidité, état de la pompe, etc.) doit être associée à un *Virtual Pin* (VO, V1, V2...).
3. Créer un **Device** basé sur le template, représentant un module ESP32 réel lié au compte.

**Gestion des flux de données (Datastreams)** Chaque variable du système est reliée à un flux de données dans le template. Pour chaque datastream, il est nécessaire de définir :

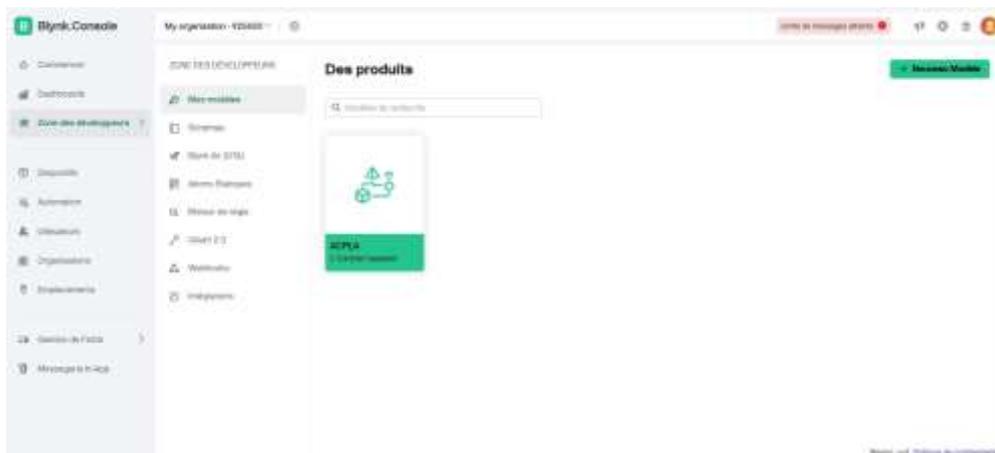


FIGURE 4.3 – Créer un Device

- Le type de données (entier, décimal, chaîne de caractères...).
- Le numéro de pin virtuelle (par exemple : V0 pour l'humidité du sol, V1 pour la température, V3 pour l'état de la pompe...).
- L'intervalle de valeurs acceptées (min/max).
- L'unité de mesure (°C, %, état...).

ID	Nom	Épingle	Couleur	Type de données	Unités	Start	Min.
3	Humidité de air	V2		Entier	%	false	0
1	HUMIDITY	V0		Entier	%	false	0
6	LED 01	V5		Entier		false	0
7	LED 02	V6		Entier		false	0
4	PUMP 01	V3		Entier		false	0
5	PUMP 02	V4		Entier		false	0

FIGURE 4.4 – Gestion des flux de données (Datastreams)

**Configuration du tableau de bord web (Web Dashboard)** La plateforme propose un tableau de bord graphique permettant d'ajouter plusieurs composants visuels (*Widgets*) tels que :

- **Gauge** : pour afficher les valeurs en temps réel.

- **LED virtuelle** : pour indiquer l'état de marche ou d'arrêt de la pompe.
- **Bouton** : pour activer manuellement certaines fonctions.
- **Graphique (Chart)** : pour visualiser l'évolution des mesures dans le temps.

Chaque composant visuel est associé à un *Virtual Pin* spécifique, permettant une interaction directe avec la carte ESP32.

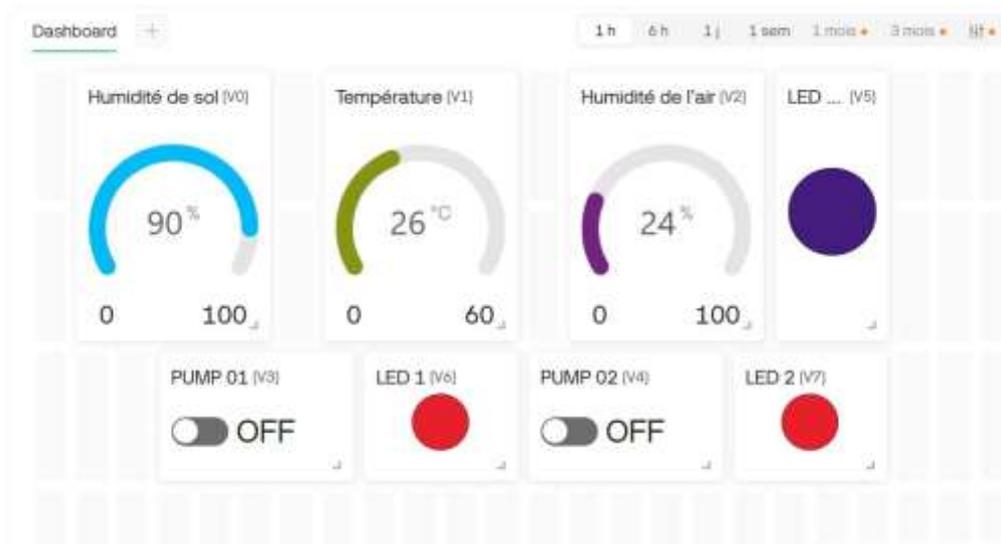


FIGURE 4.5 – Configuration du tableau de bord web (Web Dashboard)

**Surveillance et notifications** Grâce à Blynk Console, il est possible de suivre :

- Les valeurs en temps réel des différents capteurs.
- L'état de chaque pompe ou dispositif connecté.
- Le journal des événements (*Event Log*) en cas d'alertes ou d'erreurs.
- L'envoi de notifications (email ou mobile) en cas de dépassement de seuils prédéfinis.

## 4.5 Tests et validation du système

Après la finalisation du montage électronique et le téléversement du programme sur la carte ESP32, une phase de tests a été réalisée afin de valider le bon fonctionnement du système et d'évaluer sa réactivité dans diverses conditions simulant un environnement agricole réel.

---

### 4.5.1 Objectifs des tests

Cette phase vise à :

- Vérifier le bon fonctionnement individuel de chaque composant (capteurs, pompes, écran LCD, etc.).
- Évaluer la précision des mesures relevées par les capteurs.
- S'assurer du déclenchement automatique ou manuel des pompes selon l'état de l'humidité.
- Tester les alertes visuelles (LED) et les notifications envoyées via Blynk.
- Contrôler la synchronisation des données avec l'interface mobile.

### 4.5.2 Scénarios de test

- **1. Test du capteur d'humidité du sol :**

Le capteur a été inséré dans un sol très sec (humidité < 30%). Résultats observés :

- Activation automatique de la pompe concernée.
- Allumage de la LED associée à la pompe.
- Affichage de l'état sur l'application Blynk.
- Arrêt automatique de la pompe après dépassement du seuil d'humidité (ex : 70%).



FIGURE 4.6 – Activation automatique de la pompe lorsque le sol est sec

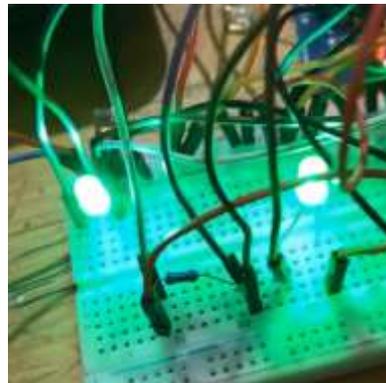


FIGURE 4.7 – Les deux LED allumées indiquent le fonctionnement des pompes.

- **2. Test du capteur DHT22 (température et humidité de l'air) :**

Le capteur a été exposé à une source de chaleur :

- Une LED rouge s'allume lorsque la température dépasse 35°C.

- 
- Une notification est envoyée à l'utilisateur via Blynk.
  - Les nouvelles valeurs s'affichent sur l'écran LCD.

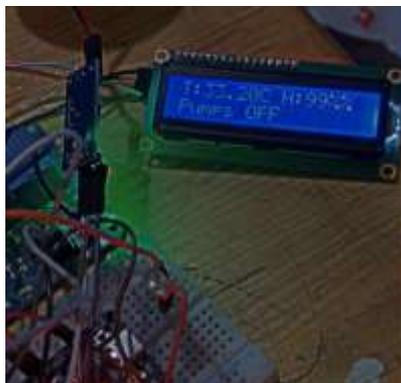


FIGURE 4.8 – LED rouge éteinte lorsque la température est inférieure à 35°C



FIGURE 4.9 – LED rouge activée en cas de surchauffe

- **3. Test de l'écran LCD I2C :**

Les informations suivantes sont affichées en temps réel :

- Température ambiante en °C.
- Humidité du sol en %.
- État des pompes.

*Remarque : les valeurs sont mises à jour environ chaque seconde, avec une bonne lisibilité.*

- **4. Test des LEDs associées aux pompes :**

Chaque pompe est liée à une LED témoin. Résultat :

- La LED s'allume exactement au moment de l'activation de la pompe, et s'éteint lors de l'arrêt.

#### 4.5.3 Observations techniques générales

- Les capteurs ont montré une précision satisfaisante (marge d'erreur <  $\pm 5\%$ ).
- La réaction aux changements d'humidité ou de température est rapide.
- Les données sont synchronisées en quasi temps réel avec l'application mobile (délai de 1 à 2 secondes).
- Le système est resté stable même après un fonctionnement continu d'une heure.
- Aucun problème détecté au niveau de l'alimentation (5V via USB) ni du réseau Wi-Fi.

---

#### 4.5.4 Perspectives futures et développement du projet

Le projet intitulé « *Développement d'un Système Intelligent pour la Rationalisation de l'Irrigation Agricole avec Énergie Solaire* » constitue une base technologique prometteuse, susceptible d'évoluer vers des solutions encore plus avancées et intégrées. Dans un contexte où la digitalisation de l'agriculture devient une nécessité pour répondre aux défis climatiques, hydriques et économiques, ce système ouvre la voie à une automatisation intelligente de la gestion de l'eau et de l'énergie en milieu agricole.

À l'avenir, le projet sera enrichi par l'intégration de l'intelligence artificielle (IA), notamment dans la reconnaissance du type de culture ou d'arbre présent dans la parcelle. Grâce à un système d'apprentissage supervisé basé sur une base de données agricole, le système pourra identifier automatiquement la nature de l'arbre (par exemple : palmier dattier, olivier, agrume, etc.), et adapter les seuils d'humidité du sol en fonction des besoins spécifiques de chaque espèce végétale. Il saura ainsi, de manière autonome, à quel moment précis couper l'irrigation ou l'activer, en tenant compte non seulement du taux d'humidité, mais également de la température ambiante, des conditions météorologiques en temps réel, et d'autres facteurs environnementaux (rayonnement solaire, vent, saison).

Cette intelligence contextuelle permettra au système d'exécuter l'arrosage de façon encore plus ciblée et optimisée, en évitant à la fois le sous-arrosage et le gaspillage d'eau, et en favorisant la santé et la productivité des cultures. Ce mécanisme décisionnel évoluera continuellement grâce à l'analyse des données historiques, à la rétroaction utilisateur, et à l'apprentissage automatique, renforçant la précision et la performance globale du système.

Sur le plan fonctionnel, d'autres évolutions sont envisagées : comme la détection de fuites, la supervision des cycles de fertilisation, ou encore l'alerte automatique en cas de conditions climatiques extrêmes (canicule, gel, sécheresse). L'application mobile, quant à elle, évoluera vers une plateforme complète de gestion agricole intégrée, offrant à l'agriculteur des outils d'analyse, de visualisation graphique, et de gestion personnalisée de ses parcelles.

Enfin, une production à plus grande échelle et la création d'une unité locale de fabrication sont également prévues pour garantir la diffusion massive du système et encourager l'innovation locale. Le projet aspire à devenir une solution de référence en matière de gestion intelligente de l'irrigation, en Algérie et potentiellement dans d'autres régions du Maghreb ou du Sahel confrontées aux mêmes défis hydriques et énergétiques.

---

## 4.6 Conclusion

La réalisation pratique du système d'irrigation intelligent a permis de concrétiser les concepts théoriques élaborés lors des phases précédentes. Grâce à une architecture matérielle réfléchie et un environnement logiciel approprié, nous avons développé un prototype fonctionnel et autonome. Ce système est capable de surveiller et de gérer automatiquement l'irrigation en fonction des conditions environnementales. Le choix pertinent des composants, notamment l'ESP32, les capteurs DHT22, les relais, les pompes, l'écran LCD et l'alimentation solaire, a contribué à une structure fiable et économe. L'assemblage soigné sur breadboard a facilité l'intégration et simplifié les tests. Côté logiciel, l'IDE Arduino et les bibliothèques dédiées ont permis une programmation souple et modulable. L'exploitation des données en temps réel a permis de déclencher des actions selon des seuils définis. L'intégration de Blynk a enrichi l'expérience utilisateur grâce au contrôle à distance.

Les tests ont confirmé la stabilité du système, sa précision et sa capacité d'adaptation aux variations environnementales. Les mesures étaient fiables et les décisions automatiques pertinentes. La réactivité de l'interface mobile et la synchronisation rapide ont renforcé la convivialité du système. Cette phase de mise en œuvre représente une avancée majeure vers une solution technologique durable en agriculture. Elle pose les bases d'un futur système plus intelligent, intégrant des techniques d'intelligence artificielle. Ce dernier pourrait offrir une meilleure personnalisation selon les besoins des cultures. Le succès de cette implémentation montre la faisabilité du projet dans un contexte réel. Il en renforce la valeur technique et son potentiel d'adoption à plus grande échelle.

# Conclusion Générale

Ce travail de recherche et de développement s'est inscrit dans une démarche d'innovation appliquée à la gestion durable de l'eau en agriculture. Nous avons commencé par analyser les enjeux liés à la rareté de la ressource hydrique et à l'inefficacité des systèmes d'irrigation traditionnels. L'étude approfondie des concepts liés à l'agriculture intelligente a permis de définir une architecture système adaptée aux besoins du terrain. En tenant compte des contraintes techniques, environnementales et économiques, nous avons conçu une solution autonome, efficace et évolutive. Le choix rigoureux des composants matériels et la structure logicielle modulaire ont rendu possible l'implémentation d'un système fiable, pilotable à distance. Cette solution permet une irrigation optimisée, déclenchée automatiquement en fonction des conditions environnementales mesurées. Elle contribue ainsi à la réduction du gaspillage d'eau, à l'augmentation de la productivité agricole, et à une meilleure durabilité des pratiques. L'approche proposée s'inscrit pleinement dans les objectifs d'une agriculture moderne et éco-responsable.

La réalisation du prototype a permis de valider les choix techniques effectués, aussi bien sur le plan matériel que logiciel. Les tests ont confirmé la réactivité du système, la pertinence des seuils de déclenchement, ainsi que la stabilité des communications entre les modules. L'intégration de l'interface mobile via Blynk a facilité l'interaction avec l'utilisateur, offrant une surveillance et un contrôle en temps réel. Cette accessibilité renforce l'aspect pratique et déployable de la solution. Par ailleurs, la flexibilité du système permet son adaptation à différents contextes agricoles, selon les types de cultures et les contraintes environnementales locales. Les résultats obtenus témoignent du potentiel réel d'un tel système dans les zones rurales, notamment en réponse aux problématiques d'irrigation dans les pays en développement. Cette expérience ouvre également des perspectives pour intégrer de nouveaux capteurs, améliorer les algorithmes de décision, et optimiser la consommation énergétique. Ainsi, notre système constitue une première étape vers une gestion intelligente et durable des ressources en eau.

Enfin, cette étude a démontré l'intérêt d'une approche pluridisciplinaire mêlant

---

électronique embarquée, traitement de données, et automatisation pour répondre aux enjeux agricoles contemporains. Elle met en évidence l'importance d'allier innovation technologique et connaissance du terrain pour développer des solutions pertinentes et accessibles. Bien que le système développé soit fonctionnel et prometteur, certaines limites subsistent, notamment en termes de robustesse matérielle et de généralisation à grande échelle. Pour aller plus loin, l'intégration d'intelligence artificielle pourrait permettre une prise de décision plus fine et adaptative. Des travaux futurs pourraient également porter sur l'optimisation énergétique, la miniaturisation du système, et l'exploitation des données récoltées à des fins d'analyse agronomique. Ce projet constitue donc un socle solide pour le développement de solutions d'irrigation intelligentes à fort impact. Il illustre la contribution possible de l'ingénierie dans la transition vers une agriculture plus durable. En conclusion, cette démarche technologique confirme la viabilité d'une irrigation automatisée, intelligente et connectée au service des agriculteurs.

# Bibliographie

- [1] C. Vandenberghe, J. Benoît, M. Deneufbourg, J.-P. Destain, M. Detoffoli, I. Dufrasne, N. Fonder, B. Heens, S. Hennart, R. Lambert *et al.*, “Évaluation et proposition de révision du deuxième programme de gestion durable de l’azote en agriculture en région wallonne (belgique),” in *Atelier" Nitrate-Eau"*. Presses Agronomiques de Gembloux, Gembloux, Belgium, 2010.
- [2] K. Erdlenbruch, S. Loubier, M. Montginoul, S. Morardet, and M. Lefebvre, “La gestion du manque d’eau structurel et des sécheresses en france,” *Sciences Eaux & Territoires*, vol. 11, no. 2, pp. 78–85, 2013.
- [3] R. M. Benzerroug, “Analyse de la performance du secteur industriel agroalimentaire face au défi de la sécurité alimentaire en algérie : cas de l’industrie céréalière algérienne,” 2013.
- [4] T. O. Williams, M. Mul, O. Cofie, J. Kinyangi, R. Zougmore, G. Wamukoya, M. Nyasimi, P. Mapfumo, C. I. Speranza, D. Amwata *et al.*, “L’agriculture intelligente face au climat dans le contexte africain,” *Document de référence, Banque Africaine de Développement*, 32p, 2015.
- [5] C. Corner-Dolloff, A. Jarvis, A. M. Loboguerrero Rodriguez, M. Lizarazo, A. C. Nowak, N. Andrieu, F. C. Howland, C. Smith, J. Maldonado, J. Gómez *et al.*, “Démarche de priorisation de l’agriculture intelligente face au climat,” 2015.
- [6] Q. Zhang and F. J. Pierce, *Agricultural automation : Fundamentals and practices*. crc Press, 2013.
- [7] A. LOUQMANE Hassna Mr BENKADDOUR, Z. BELKHARCHACH, M. S. FA, M. BENKADDOUR, M. SGHIR, M. DAOUDI, and M. CHAFIKI, “Reconversion de l’irrigation gravitaire à l’irrigation localisée dans les périmètres du haouz dans les périmètres du haouz ; avantages et inconvénients. ; avantages et inconvénients. cas du périmètre n’fis secteur n1 cas du périmètre n’fis secteur n1-2.”
- [8] R. Allemand, “La gestion durable des ressources en eau en milieu agricole : réflexions générales et applications dans le bassin versant de la moselle,” 2010.
- [9] L. Baechler, “La bonne gestion de l’eau : un enjeu majeur du développement durable,” *L’Europe en Formation*, vol. 365, no. 3, pp. 3–21, 2012.

- 
- [10] R. Al Atiri, "Evolution institutionnelle et réglementaire de la gestion de l'eau en tunisie. vers une participation accrue des usagers de l'eau," in *L'avenir de l'agriculture irriguée en Méditerranée. Nouveaux arrangements institutionnels pour une gestion de la demande en eau*, 2006.
- [11] M. Deneufbourg, C. Vandenberghe, and J. M. Marcoen, "Mise en oeuvre du programme de gestion durable de l'azote et évaluation d'impact à l'échelle d'un bassin versant agricole (arquennes, belgique)," in *Atelier "Nitrate-Eau"*. Presses Agronomiques de Gembloux, Gembloux, Belgium, 2010.
- [12] L. Mermet and S. Treyer, "Quelle unité territoriale pour la gestion durable de la ressource en eau ?" in *Annales des mines-Série Responsabilité et environnement*, no. 22, 2001, pp. 67–79.
- [13] M. Schwoob, "Sécurité alimentaire et risques de tensions sociales en chine," Ph.D. dissertation, Asia Centre, 2012.
- [14] G. Cortes, "L'accès aux ressources foncières, enjeu de l'émigration rurale andine." *Revue européenne des migrations internationales*, vol. 18, no. 2, pp. 5–5, 2002.
- [15] M. Adhergal, S. Lemeilleur, and B. Romagny, "Contribution des systèmes de distribution alimentaire à la sécurité alimentaire des villes : étude de cas sur l'agglomération de rabat (maroc)," *Notes Techniques-AFD*, vol. 48, 2019.
- [16] C. Dembélé, B. Sogoba, A. Coulibaly, K. Traoré, O. Samaké, F. Dembélé, N. Andrieu, F. Howland, O. Bonilla-Findji, A. Ba *et al.*, "Climate smart agriculture : Towards a concerted definition of national priorities in mali.[p59]." CIRAD, 2015.
- [17] M. Nyasimi, D. Amwata, L. Hove, J. Kinyangi, and G. Wamukoya, "L'agriculture intelligente face au climat : Quel impact pour l'afrique ?" 2015.
- [18] P. J. Neate, "Agriculture intelligente face au climat : Succès des communautés agricoles dans le monde," 2013.
- [19] T. S. Thomas and R. Zougmore, "Paysage scientifique, politique et financier de l'agriculture intelligente face au climat (aic) en afrique de l'ouest : le secteur de la production agricole," *Paysage scientifique, politique et financier de l'Agriculture Intelligente face au Climat en Afrique de l'Ouest*, p. 15.
- [20] A. Ayantunde, P. Ericksen, and M. Said, "Paysage scientifique, politique et financier de l'agriculture intelligente face au climat (aic) en afrique de l'ouest : le secteur de la production animale," *Paysage scientifique, politique et financier de l'Agriculture Intelligente face au Climat en Afrique de l'Ouest*, p. 29.
- [21] A. Medjber, "Automatisation d'une serre agricole," Ph.D. dissertation, Blida, 2008.

- 
- [22] Y. Edan, S. Han, and N. Kondo, "Automation in agriculture," *Springer handbook of automation*, pp. 1095–1128, 2009.
- [23] T. Grift, Q. Zhang, N. Kondo, and K. Ting, "A review of automation and robotics for the bio-industry," *Journal of Biomechatronics Engineering*, vol. 1, no. 1, pp. 37–54, 2008.
- [24] S. Jagannathan, R. Priyatharshini *et al.*, "Smart farming system using sensors for agricultural task automation," in *2015 IEEE Technological Innovation in ICT for Agriculture and Rural Development (TIAR)*. IEEE, 2015, pp. 49–53.
- [25] N. Tricot and P. Clavel, "Quoi de neuf en 2007 pour le machinisme agricole : automatisations, guidage des outils, réduction du bourrage : La prise en compte des facteurs humains dans l'automatisation des tâches d'utilisateurs d'agroéquipements," 2007.
- [26] F. Lebdi *et al.*, "Appui pour l'irrigation et la gestion des systèmes hydrauliques," *CIHEAM, Options Méditerranéennes, Série B, Etudes et Recherches*, vol. 52, pp. 193–203, 2005.
- [27] F. Lebdi, "Contraintes de l'agriculture irriguée aux opportunités du marché : Cas de la Tunisie," *Les notes d'analyse du CIHEAM*, no. 51, 2009.
- [28] M. S. Lamhamedi, Y. Ammari, B. Fecteau, J. A. Fortin, and H. Margolis, "Problématique des pépinières forestières en Afrique du Nord et stratégies de développement," *Cahiers Agricultures*, vol. 9, no. 5, pp. 369–380, 2000.
- [29] J.-L. Chopart, J.-L. Fusillier, L. Le Mezo, M. Mézino, L. Richefort, and C. Cornu, "Variabilité des consommations en eau d'irrigation en culture de canne à sucre dans les périmètres du sud de la Réunion (bras de la plaine, bras de Cilaos). rôles des facteurs pédo-climatiques et des modes d'irrigation," 2006.
- [30] S. Abdedayem and R. Boukchina, "Programme régional d'économie d'eau d'irrigation dans le gouvernorat de Gabès : Essai d'évaluation," *NEWMEDITN*, vol. 2, no. 2008, pp. 31–35, 2008.
- [31] V. dos Santos Martins, "Contrôle frontière par modèle interne de systèmes hyperboliques : application à la régulation de canaux d'irrigation," Ph.D. dissertation, Université d'Orléans, 2004.
- [32] Y. Viala, "Intégration d'une commande multivariable pour la régulation des canaux d'irrigation. application à la branche d'aix nord du canal de Provence," Ph.D. dissertation, ENGREF (AgroParisTech), 2004.
- [33] A. Ingold, "Les sociétés d'irrigation : bien commun et action collective," *Entreprises et histoire*, vol. 50, no. 1, pp. 19–35, 2008.
- [34] H. Ouarit, "Réduction des systèmes à paramètres distribués. application à la commande optimale robuste des canaux d'irrigation," Ph.D. dissertation, Institut National Polytechnique de Grenoble-INPG, 2004.



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

جامعة غرداية

مركز تطوير المقاولاتية



عنوان المشروع:

تطوير نظام ذكي لترشيد الري الزراعي

مشروع لنيل شهادة مؤسسة اقتصادية في اطار القرار الوزاري 008 المعدل

والمتمم لقرار 1275



الاسم التجاري

**AquaCrop pour le  
Développement Agricole**

السنة الجامعية

2025\_2024

## بطاقة معلومات:

### حول فريق الاشراف وفريق العمل

#### 1- فريق الاشراف:

فريق الاشراف	
المشرف الرئيسي :	التخصص: آلية وأنظمة
د.مصباح شرف عبد الكريم	
المشرف المساعد:	التخصص: علم المكتبات والتوثيق
د.صيتي أبوبكر	

#### 2- فريق العمل:

فريق المشروع	التخصص	الكلية
الطالب:	بن كريد محمد الندير	علوم و تكنولوجيا
الطالب:	حاج براهيم موسى	علوم و تكنولوجيا

# المحور الأول

---

## المحور الأول: التعريف بالمشروع

### (1)-عنوان المشروع

## Développement d'un Système Intelligent pour la Rationalisation de l'Irrigation Agricole

(تطوير نظام ذكي لترشيد الري الزراعي)

---

### (2)-فكرة المشروع

تقوم فكرة المشروع على تصميم وتطوير نظام ذكي للتحكم في الري الزراعي، يعتمد على تتخذ مستشعرات رطوبة وحرارة لقياس حالة التربة والجو، ويرتبط بوحدة تحكم إلكترونية قرارات تلقائية بتشغيل أو إيقاف المضخات حسب حاجة النبات ويتم تزويد النظام بالطاقة من خلال الألواح الشمسية، لضمان استمرارية التشغيل دون الاعتماد على الشبكة الكهربائية العمومية، خصوصاً في المناطق المعزولة. كما يتيح هذا النظام للفلاح إمكانية التحكم عن بُعد في عملية الري، عبر تطبيق هاتف محمول، ما يوفر عليه الجهد والوقت، ويمنع التبذير، ويسهم في تحسين مردودية الإنتاج الزراعي.

---

### (3)-أهداف المشروع

ترشيد استهلاك المياه عبر الري الذكي وفقاً لاحتياجات التربة

تمكين الفلاح من التحكم عن بُعد في مزرعته باستخدام الهاتف الذكي

تحقيق الاستقلال الطاقوي من خلال الاعتماد على الطاقة الشمسية

تقليل التكاليف التشغيلية الناتجة عن استهلاك الكهرباء  
والعمالة اليدوية

تحسين جودة وكمية الإنتاج الفلاحي من خلال نظام  
ري منتظم وموجّه

دعم توجه الجزائر نحو الفلاحة الذكية والتنمية  
المستدامة

#### 4-دوافع إنشاء المشروع

جاء هذا المشروع استجابة لحاجة حقيقية يواجهها الفلاحون، خاصة في المناطق الريفية  
والصحراوية، حيث يعانون من:

- ضعف أو غياب الكهرباء ما يُعيق تشغيل المضخات.
- استخدام طرق تقليدية في الري تُؤدي إلى التبذير الكبير للماء.
- صعوبة في متابعة حالة المحاصيل باستمرار.
- تكاليف تشغيلية مرتفعة نتيجة استخدام مضخات كهربائية قديمة أو الحاجة إلى عمّال دائمين.
- كل هذه التحديات دفعتنا إلى التفكير في حل مبتكر يجمع بين التكنولوجيا، الطاقة النظيفة، والتحكم الذكي، لتوفير وسيلة فعّالة وعملية للفلاح العصري

#### 5-المشكلة التي يعالجها المشروع

يعالج المشروع ثلاث مشكلات رئيسية تؤثر سلبيًا على مردودية الفلاح الجزائري:

1. مشكلة نقص الكهرباء أو انعدامها: عبر تزويد النظام بألواح شمسية مستقلة، يصبح تشغيل المضخات والمستشعرات ممكنًا حتى في غياب الشبكة الكهربائية.
2. مشكلة التبذير في الماء: من خلال استخدام مستشعرات دقيقة وتحليل البيانات في الوقت الحقيقي، يتم الري فقط عند الحاجة الفعلية، مما يحافظ على المياه.
3. مشكلة ضعف الرقابة والتحكم: يتيح التطبيق المحمول للفلاح مراقبة حالة التربة والطقس واتخاذ القرار المناسب في أي وقت ومن أي مكان.

# المحور الثاني

## دراسة الجدوى

دراسة الجدوى عبارة عن تحليل معمق يهدف إلى تقييم جدوى المشروع. فهي تسمح بتحديد ما إذا كان المشروع ممكن الإنجاز و مربحا و ما إذا كان يلبي الأهداف المحددة.

### وصف المشروع

مشروع "تطوير نظام ذكي لترشيد الري الزراعي باستخدام الطاقة الشمسية" هو مبادرة تقنية وبيئية تهدف إلى معالجة مشكلتين أساسيتين يعاني منهما الفلاح الجزائري، وهما: الهدر الكبير في استهلاك المياه، وضعف أو غياب الكهرباء في المناطق الريفية.

#### أولاً: ترشيد استهلاك المياه

يعتمد النظام على مستشعرات ذكية (مثل مستشعر رطوبة التربة و DHT22 لدرجة الحرارة والرطوبة الجوية)، تعمل على قياس الحالة الحقيقية للتربة بشكل مستمر. هذه البيانات تُرسل إلى وحدة تحكم (PLC) مبرمجة مسبقاً بعتبات معينة (seuils) عند انخفاض نسبة رطوبة التربة تحت المستوى المطلوب، يصدر النظام أمراً تلقائياً بتشغيل المضخات، وإذا تجاوزت الرطوبة الحد الأعلى، يتم إيقاف الري لتفادي التبذير.

هذه الآلية الدقيقة تتيح للفلاح ري أرضه فقط عندما تكون النباتات بحاجة فعلية للماء، مما يوفر كميات كبيرة من المياه كانت تُهدر في أنظمة الري التقليدية. كما يساهم هذا النظام في حماية الموارد المائية ورفع كفاءة الإنتاج.

#### ثانياً: حل مشكل الكهرباء باستخدام الطاقة الشمسية

نظراً لانتشار المشروع في مناطق فلاحية نائية غالباً ما تعاني من ضعف التغطية الكهربائية، تم الاعتماد على مصادر طاقة متجددة لتغذية النظام بشكل مستقل تماماً.

مع بطاريات ليثيوم قابلة لإعادة الشحن تم دمج ألواح شمسية بولي كريستالين بقدرة لضمان توزيع الطاقة بشكل آمن (charge controller) (18650)، إلى جانب وحدة تنظيم وفعال.

هذا الخيار يضمن التشغيل المستمر للنظام حتى في حالة انقطاع التيار أو خلال الليل، مع تقليل الاعتماد على الشبكة الكهربائية وتقليل فواتير الكهرباء للفلاح.

كما أن اختيار الطاقة الشمسية يجعل المشروع صديقاً للبيئة ويؤهله للحصول على دعم حكومي أو تمويل ضمن المشاريع الخضراء والمستدامة.

## خلاصة

يجمع هذا المشروع بين الذكاء الاصطناعي في اتخاذ القرار، والاستقلال لتقديم حل متكامل يُمكن الفلاح من مراقبة الطاقوي عبر الطاقة الشمسية، أرضه عن بُعد، ترشيد استعمال موارده، والرفع من إنتاجه، مع الحفاظ على بيئة مستدامة

## المنتجات / الخدمات:

يهدف المشروع إلى تقديم مجموعة من المنتجات والخدمات المتكاملة التي تستهدف الفلاحين في المناطق الريفية والزراعية، وتشمل ما يلي:

1. نظام ذكي متكامل للري، يتكون من وحدة تحكم إلكترونية من نوع esp32 ، ومستشعرات لقياس رطوبة التربة ودرجة الحرارة، بالإضافة إلى مضخات كهربائية يتم التحكم فيها تلقائيًا حسب حاجة التربة إلى الماء.
2. مصدر طاقة مستقل يعتمد على الألواح الشمسية، مع بطاريات قابلة للشحن، يسمح بتشغيل النظام بشكل دائم حتى في غياب الكهرباء العمومية، مما يضمن الاستمرارية في العمل ويقلل من التكاليف.
3. تطبيق للهاتف الذكي يمكن من خلاله مراقبة حالة التربة، والتحكم في تشغيل المضخات، وتغيير الإعدادات مثل العتبات الخاصة بالرطوبة، كما يمكن التبديل بين الوضع اليدوي والآلي بكل سهولة.
4. خدمة تركيب شبكة الأنابيب والمضخات في الحقول الزراعية، وذلك وفق تصميم يتناسب مع نوع الزرع وطبيعة الأرض، لضمان توزيع متوازن وفعال للمياه.
5. خدمات صيانة ومتابعة دورية، تشمل مراقبة المستشعرات، تحديث البرمجة، واستبدال أي مكون في حال وجود عطل لضمان عمل النظام بكفاءة عالية.
6. تنظيم دورات تكوينية وإرشادية للفلاحين من أجل مساعدتهم على فهم كيفية استخدام النظام والاستفادة منه بشكل أفضل في تسيير عملية الري.

## السوق المستهدف:

يُعد تحديد السوق المستهدف خطوة أساسية في بناء مشروع ناجح، خاصة عندما يتعلق الأمر بحلول تقنية موجهة للقطاع الزراعي. في إطار مشروع تطوير نظام ذكي للري باستخدام الطاقة الشمسية، فإن السوق المستهدف يتكوّن من فئات متنوعة تتقاطع في حاجتها إلى تقنيات موفرة للماء والطاقة وفعالة من حيث التحكم والإنتاج.

أولاً، يشمل السوق المستهدف الفلاحين الأفراد، لا سيما الذين يشتغلون في المناطق الريفية والنائية. هؤلاء يعانون غالباً من ضعف في التغطية الكهربائية، ويواجهون صعوبة في مراقبة عمليات الري، مما يجعلهم في حاجة إلى نظام ذكي وذاتي التشغيل يساعدهم على تحسين الإنتاج وترشيد الموارد.

ثانياً، تستهدف هذه التكنولوجيا التعاونيات الفلاحية التي تضم مجموعة من الفلاحين ضمن إطار تنظيمي مشترك. يمكن لهذه التعاونيات أن تستثمر في الأنظمة الذكية للري بشكل جماعي، مما يساعد على خفض التكاليف وتوزيع الفائدة بين الأعضاء. كما أن اعتمادها لحلول ذكية يساهم في تعزيز صورتها كمؤسسة حديثة ومواكبة للتحول الرقمي.

ثالثاً، تدخل المزارع الكبرى ضمن العملاء المحتملين لهذا المشروع. فرغم توفرها على بعض الإمكانيات، إلا أن النظام الذكي يقدم لها حلاً متقدماً يمكن من التحكم في مساحات كبيرة عن بعد، وضمان توزيع متوازن للمياه، وتقادي التبذير، ما ينعكس مباشرة على مردودية المحاصيل وجودتها.

رابعاً، يشمل السوق المستهدف المؤسسات التعليمية ومراكز التكوين الفلاحي التي يمكن أن تستخدم النظام لأغراض تربوية وتجريبية، وذلك لتعليم المتربصين كيفية استخدام التقنيات الحديثة في الزراعة، وتمكينهم من المهارات اللازمة لمواجهة تحديات القطاع الفلاحي.

أخيراً، قد يستفيد من هذا المشروع بعض الهيئات العمومية والبلديات، خاصة تلك التي تُعنى بتجهيز الأراضي الفلاحية وتشجيع الشباب على الاستثمار في المجال الزراعي. إذ يمثل المشروع خياراً مناسباً للمبادرات المحلية التي تهدف إلى ترشيد الموارد الطبيعية ودعم التنمية المستدامة.

بناءً على ما سبق، فإن المشروع لا يستهدف فئة واحدة فقط، بل يُخاطب مجموعة متنوعة من الفاعلين الفلاحيين الذين يمكن أن يستفيدوا من النظام الذكي للري سواء من الناحية التقنية أو الاقتصادية.

## الشراكات:

تُعد الشراكات عنصراً مهماً في نجاح أي مشروع مبتكر، خاصة إذا كان يعتمد على التكنولوجيا ويتطلب تكاملاً بين عدة مجالات مثل الهندسة الإلكترونية، الطاقة المتجددة، والزراعة. في إطار مشروع "تطوير نظام ذكي لترشيد الري الزراعي باستخدام الطاقة الشمسية"، تم النظر في مجموعة من الشراكات المحتملة التي من شأنها دعم المشروع في مختلف مراحلها، سواء من حيث التطوير، التركيب، التوزيع أو التكوين.

من بين الشراكات التقنية الممكنة، هناك إمكانية التعاون مع مراكز البحث العلمي أو الجامعات المتخصصة في التقنيات الفلاحية أو الهندسة الكهربائية والإلكترونية، وذلك من أجل تحسين تصميم النظام، اختبار فعاليته، وتطوير خوارزميات الذكاء الاصطناعي الخاصة بالتحكم في الري.

كما يُؤخذ بعين الاعتبار عقد شراكات مع شركات أو مؤسسات ناشئة تنشط في مجال الطاقة الشمسية، بهدف توفير الألواح الشمسية والمكونات الكهربائية بجودة عالية وتكلفة معقولة. هذه الشراكة قد تشمل أيضاً الجانب التقني في ما يتعلق بتنشيط نظام الطاقة وضمان صيانتها الدورية.

من جهة أخرى، يمكن التعاون مع التعاونيات الفلاحية أو الجمعيات المحلية الناشطة في المناطق الريفية من أجل تسهيل عملية التعريف بالمشروع وتجريبه ميدانياً في أراضٍ حقيقية. هذه الهيئات قد تساهم أيضاً في تكوين شبكة أولية من الزبائن والترويج للحل المقترح في أوساط الفلاحين.

أما من الناحية المالية، فهناك إمكانية للتعاون مع هيئات دعم وتمويل المشاريع الصغيرة والمتوسطة، على غرار الوكالة الوطنية لدعم وتنمية المقاولاتية (أناد) أو أجهزة تمويل أخرى، من أجل تغطية بعض التكاليف الأولية للمشروع أو دعم الفلاحين الراغبين في اقتناء هذا النظام الذكي.

إضافة إلى ذلك، يمكن مستقبلاً التفكير في شراكات مع شركات الاتصالات لتوفير خدمات إنترنت ميدانية في الحقول لتسهيل الاتصال بين النظام والتطبيق السحابي، خاصة في المناطق التي تعاني من ضعف التغطية.

بناءً على ما سبق، فإن المشروع منفتح على مختلف أنواع الشراكات التقنية، التجارية، والمؤسسية التي من شأنها أن تسرع من نشر النظام وتزيد من فعاليته واستدامته على المدى البعيد

## دراسة السوق:

### - دراسة المنافسة

تُعد دراسة المنافسة من الجوانب الأساسية لفهم موقع المشروع في السوق وتحديد الاستراتيجيات المناسبة للتميز. في سياق مشروع "تطوير نظام ذكي لترشيد الري الزراعي باستخدام الطاقة الشمسية"، يمكن تصنيف المنافسين إلى قسمين رئيسيين: المنافسون المباثرون، والمنافسون غير المباثرين.

#### (1)-المنافسون المباثرون

هم الجهات أو الشركات التي تقدم حلولاً مشابهة من حيث الهدف والوظيفة، أي أنظمة ذكية للري تعتمد على المستشعرات والتحكم التلقائي. ورغم أن هذا النوع من الحلول لا يزال في بداياته في السوق المحلية الجزائرية، إلا أن بعض المؤسسات الناشئة بدأت في إدخال مفاهيم الزراعة الذكية، خصوصاً في المناطق الشمالية.

من بين هذه المنافسات:

- شركات محلية تبيع أنظمة ري أوتوماتيكية بسيطة تعمل بالموقت أو بدوائر إلكترونية تقليدية دون اعتماد فعلي على المعطيات البيئية الحقيقية.
- مشاريع جامعية أو بحثية بدأت في تقديم حلول ري ذكية على نطاق محدود بالتعاون مع تعاونيات فلاحية.

ومع ذلك، فإن ما يميز هذا المشروع هو تكامله التقني (قراءة حساسات، معالجة، تحكم عن بُعد، استقلال طاقي) وسهولة استخدامه بالنسبة للفلاح العادي.

#### (2)-المنافسون غير المباثرون

هم الجهات التي تقدم حلولاً تقليدية أو بديلة قد تحقق نفس النتيجة جزئياً، مثل:

- الفلاحون الذين ما زالوا يعتمدون على الري اليدوي أو التقليدي، باستخدام القنوات أو الصنابير العادية.
- موردو المضخات التي تُشغّل بالكهرباء أو البنزين دون أي نظام ذكي.
- أنظمة الري بالتنقيط الثابتة غير المرتبطة بأي نظام تحكم أو بيانات استشعار.

ورغم أنهم لا يقدمون حلولاً ذكية، إلا أنهم يمثلون بدائل حالياً من وجهة نظر الفلاح البسيط، خاصة عند ضعف الوعي التكنولوجي أو عند محدودية الموارد المالية.

## تحليل تنافسي مختصر

ما يميز مشروع النظام الذكي المقترح هو كونه حلاً متكاملًا يجمع بين:

- أتمتة عملية الري اعتمادًا على البيانات الفعلية للتربة والجو.
- التحكم عن بعد عبر تطبيق هاتفي بسيط.
- الاعتماد الكلي على الطاقة الشمسية لضمان استقلالية التشغيل.
- خدمة التركيب والمتابعة والدعم الفني في الميدان.

بالتالي، فبينما يعتمد المنافسون على أنظمة تقليدية أو غير متكاملة، فإن المشروع الحالي يسعى إلى تقديم قيمة مضافة حقيقية، تجمع بين الدقة، الراحة، والتوفير في الماء والطاقة

## تحليل SWOT

نقاط القوة	نقاط الضعف
نظام ذكي يرشد استهلاك المياه	يحتاج إلى رأس مال أولي لتوفير التجهيزات
استقلالية في الطاقة عبر الألواح الشمسية	صعوبة الاستخدام لدى بعض الفلاحين غير المعتادين على التقنية
تحكم عن بُعد عبر الهاتف	الاعتماد على الإنترنت في بعض المناطق الريفية
خدمة متكاملة (ري + طاقة + تطبيق)	قدرة إنتاجية محدودة في بداية المشروع
قابلية التطبيق على مختلف أحجام المزارع	

الفرص	التهديد
تزايد الاهتمام بالزراعة الذكية	دخول منافسين يقدمون حلولاً أقل تكلفة
دعم الدولة للطاقة الشمسية والمؤسسات المصغرة	ارتفاع أسعار المكونات الإلكترونية المستوردة
توسع السوق في المناطق الريفية	ضعف ثقة بعض الفلاحين في التقنيات الجديدة
إمكانية تطوير النظام بخدمات إضافية	تقلبات الطقس قد تؤثر على فعالية الألواح الشمسية

## تحليل SWOT نقاط القوة والضعف والفرص والتهديدات للشركة والسوق:

يعتمد تحليل SWOT على دراسة أربعة عناصر أساسية تمثل البيئة الداخلية والخارجية للمشروع، وهي: نقاط القوة، نقاط الضعف، الفرص، والتهديدات. ويُعتبر هذا التحليل أداة استراتيجية تساعد في تحديد وضع المشروع بالنسبة للسوق، واتخاذ قرارات مبنية على رؤية واضحة.

### أولاً: نقاط القوة

- اعتماد المشروع على التكنولوجيا الذكية مما يرفع من دقة الري ويقلل من التبذير في المياه.
- استخدام الطاقة الشمسية يجعل النظام مستقلاً عن شبكة الكهرباء العمومية ويوفر في التكاليف التشغيلية.
- إمكانية التحكم عن بعد من خلال الهاتف الذكي تمنح الفلاح مرونة كبيرة في التسيير اليومي.
- سهولة الاستخدام والتركيب، ما يجعله مناسباً للفلاح البسيط دون حاجة إلى تكوين معقد.
- الخدمة المتكاملة (النظام + الطاقة + التطبيق + الأنابيب) تجعل من المشروع حلاً شاملاً.
- إمكانية تطبيقه على مختلف أحجام المزارع (صغيرة، متوسطة، وكبيرة).

### ثانياً: نقاط الضعف

- ( الحاجة إلى رأس مال أولي لتوفير التجهيزات) مستشعرات، PLC، بطاريات، لوحات شمسية
- الاعتماد على الإنترنت أو التغطية الخلوية في بعض المناطق قد يُعيق التحكم عن بعد.
- قلة الوعي الرقمي لدى بعض الفلاحين قد تُعيق فهم واستعمال النظام بفعالية.
- محدودية القدرة الإنتاجية في البداية قد تؤثر على التوسع السريع في السوق.

### ثالثاً: الفرص

- تزايد الاهتمام الوطني والدولي بالزراعة الذكية والاستثمار في التكنولوجيا الزراعية.
- الدعم الحكومي لمشاريع الطاقة المتجددة والمؤسسات المصغرة في المناطق الريفية.
- وجود طلب متزايد من طرف الفلاحين على حلول تُوفر المياه وتُقلل التكاليف.
- إمكانية توسيع المشروع ليشمل خدمات إضافية مثل مراقبة جودة التربة، التحكم في المناخ داخل البيوت البلاستيكية، أو دمج الذكاء الاصطناعي لتحليل البيانات.

## رابعاً: التهديدات

- دخول منافسين جدد قد يقلدون الفكرة أو يعرضونها بأسعار أقل دون نفس الجودة.
- ارتفاع أسعار المكونات المستوردة قد يؤثر على تسعيرة النظام.
- تقلبات الطقس أو ضعف سطوع الشمس في فترات معينة قد يؤثر على كفاءة التشغيل بالطاقة الشمسية.
- مقاومة بعض الفلاحين لتبني الحلول الجديدة بسبب التوجس أو ضعف الثقة في التكنولوجيا.

## خلاصة

يمتلك المشروع أرضية قوية للنجاح من خلال نقاط القوة التي تجمع بين التكنولوجيا والاستقلال الطاقوي، كما يفتح آفاقاً واسعة للنمو في ظل وجود فرص حقيقية في السوق الزراعية. لكن النجاح يتطلب أيضاً تجاوز بعض التحديات التقنية والتوعوية، مع مراقبة تطورات السوق والمنافسة بشكل دائم.

## اتجاهات السوق

### تطورات السوق:

شهد السوق الزراعي خلال السنوات الأخيرة تحولات كبيرة نتيجة عدة عوامل متداخلة، من بينها التغيرات المناخية، شح الموارد المائية، تطور التقنيات الرقمية، والدعوة المتزايدة نحو الاستدامة البيئية. هذه التغيرات دفعت العديد من الفلاحين والمؤسسات إلى البحث عن حلول مبتكرة لتحسين الإنتاج وترشيد الموارد، مما فتح المجال أمام بروز سوق جديد قائم على ما يُعرف بـ "الزراعة الذكية".

في هذا السياق، يُلاحظ أن هناك توجهاً متسارعاً نحو تبني أنظمة ري ذكية تعتمد على المستشعرات والبرمجيات الدقيقة التي تمكن من اتخاذ قرارات تلقائية مبنية على بيانات التربة والمناخ. أصبح الفلاحون أكثر وعياً بضرورة الاعتماد على التكنولوجيا لتقليل التكاليف ورفع المردودية، خاصة في ظل الأزمات المتكررة المرتبطة بالماء والطاقة.

من جهة أخرى، تُظهر الاتجاهات الحديثة تزايد الاهتمام بمصادر الطاقة المتجددة في تشغيل الأنظمة الفلاحية، خاصة الطاقة الشمسية، نظراً لانخفاض تكلفتها على المدى الطويل وسهولة استعمالها في المناطق الريفية المعزولة. هذا ما يعزز من فرص نجاح المشاريع التي تقدم حلولاً مستقلة طاقياً وفعالة مائياً.

كما بدأت بعض الهيئات الحكومية والمنظمات الدولية في دعم المشاريع المبتكرة في القطاع الفلاحي، من خلال تمويلات أو برامج تكوين أو مساعدات فنية، ما يعكس اعترافاً رسمياً بأهمية التحول نحو الزراعة المستدامة والذكية.

علاوة على ذلك، فإن التوجه العالمي نحو الرقمنة وإدماج الإنترنت في مختلف المجالات، شمل أيضاً القطاع الفلاحي، حيث أصبح استعمال التطبيقات المحمولة ومنصات المراقبة عن بُعد أمراً شائعاً ومتزايداً، حتى في المناطق الريفية، مما يمهد الطريق لانتشار أوسع لحلول التحكم الذكي في الري.

بناءً على ما سبق، فإن السوق يشهد تطوراً واضحاً نحو حلول زراعية تعتمد على البيانات والطاقة النظيفة، وهو ما يتماشى تماماً مع طبيعة المشروع المقترح، ويمنحه فرصة كبيرة للتموع كحل عملي ومبتكر يلبي حاجة حقيقية لدى الفلاحين.

## حجم السوق

### إمكانات السوق:

يُعد فهم حجم السوق من الخطوات الجوهرية لتقدير جدوى المشروع وتحديد مدى قابليته للنمو والانتشار. في حالة مشروع "تطوير نظام ذكي لترشيد الري الزراعي باستخدام الطاقة الشمسية"، فإن حجم السوق يُعتبر واسعاً ومتزايداً، نظراً لتعدد المناطق الزراعية في الجزائر واعتمادها الكبير على الري، خصوصاً في ظل التغيرات المناخية وتُدرة المياه.

تشير المعطيات الرسمية إلى أن أكثر من 60% من المساحات المزروعة في الجزائر تعتمد على الري، وتواجه تحديات كبيرة تتعلق بكفاءة التوزيع وضياع كميات كبيرة من الماء. كما أن حوالي نصف الفلاحين، خاصة في الجنوب والمناطق الداخلية، لا يملكون تغطية كهربائية مستقرة، ما يجعلهم في حاجة ماسة إلى حلول طاغوية بديلة.

بالتالي، فإن كل فلاح يستخدم مضخة أو نظام ري يدوي أو يعتمد على توقيت تقريبي للري يُعد عميلاً محتملاً لهذا النظام الذكي. وعند احتساب عدد المستثمرين الزراعيين، والتعاونيات، والمزارع النموذجية، يمكن اعتبار أن السوق المحلية وحدها تضم عشرات الآلاف من الزبائن المستهدفين.

إضافة إلى ذلك، فإن طبيعة المشروع القابلة للتوسع الجغرافي (بفضل الطاقة الشمسية والتحكم عن بُعد) تسمح له بالانتشار ليس فقط في الولايات الكبرى، بل أيضاً في المناطق الريفية والصحراوية التي تُعد غير مغطاة إلى حد الآن من حيث الحلول الذكية.

كما أن السوق لا يقتصر فقط على الفلاحين الأفراد، بل يشمل أيضًا التعاونيات، مراكز التجارب الزراعية، المعاهد التكوينية، وحتى المبادرات الشبابية المدعومة في إطار برامج المؤسسات المصغرة، مما يعزز من قابلية التوسع والطلب المستمر.

بناءً على هذه المعطيات، فإن إمكانات السوق تُعتبر واعدة جدًا، وهو ما يجعل من المشروع فرصة حقيقية لتقديم خدمة ذات أثر اقتصادي وبيئي ملموس، مع قابلية للاستدامة والنمو على المدى المتوسط والطويل.

### الخطة العملية: الموارد البشرية الاحتياجات من الموظفين

يتطلب تنفيذ مشروع "تطوير نظام ذكي لترشيد الري الزراعي باستخدام الطاقة الشمسية" توفير فريق عمل متكامل يضم مهارات تقنية وتنسيقية متنوعة، لضمان حسن سير العمل من مرحلة التصميم إلى التركيب، ثم المتابعة ما بعد البيع.

### 1-المسؤول التقني والمطور الإلكتروني

ربط (PLC) يتولى تصميم النظام من الناحية التقنية، بما يشمل برمجة وحدة التحكم المستشعرات، اختبار الخوارزميات، وضمان سلامة الاتصال بين مكونات النظام. كما يشرف على عملية التطوير المستمر للبرنامج المدمج والتطبيق الهاتفي

### 2-مختص في الطاقة الشمسية

يُعنى بحساب الطاقة المطلوبة، واختيار الألواح الشمسية المناسبة، وتركيب البطاريات ووحدة الشحن. كما يضمن سلامة الشبكة الطاقوية وربطها بالنظام الإلكتروني

### 3-تقني في تركيب الأنابيب والمضخات

يقوم بعملية التثبيت الميداني لأنظمة الري، من أنابيب ومضخات ومشغلات، وفق تصميم يتلاءم مع نوع الأرض والمحاصيل. يتطلب الأمر مهارة في التعامل مع أدوات الحفر والتوصيل المائي.

### 4-مكلف بالتكوين والدعم الميداني

يقوم بتدريب الفلاحين على كيفية استخدام النظام والتطبيق، ويقدم الدعم التقني عند الحاجة. يمثل همزة وصل بين المستخدم النهائي والفريق التقني

## 5-مسؤول إداري وتجاري

يتكفل بجوانب التسويق، الاتصال مع الزبائن، إدارة الطلبات، إعداد الفواتير، والتواصل مع الشركاء والممولين. كما يساهم في متابعة ملفات الدعم أو التمويل المؤسسي.

## 6-موظفون إضافيون (عند التوسع)

مع تطور المشروع، يمكن الاستعانة لاحقاً بمساعدين تقنيين، أعوان تركيب، ومكلفين بتسيير المخزون، وذلك حسب حجم الطلبات وتوسع النشاط الجغرافي.

## خلاصة

تتطلب الموارد البشرية للمشروع توازناً بين التخصصات التقنية والإدارية، مع مرونة في التوسع حسب حجم السوق. كما أن الاستثمار في التكوين والتدريب يعتبر من أهم مفاتيح النجاح لضمان جودة الخدمة وثقة الزبون.

## المسار

### تنفيذ الأنشطة

يُعد تحديد مسار تنفيذ الأنشطة من العناصر الأساسية في الخطة العملية لأي مشروع، حيث يسمح بتنظيم العمل وتوزيع المهام على مراحل متسلسلة لضمان الكفاءة والفعالية في الإنجاز. وفي مشروع "تطوير نظام ذكي لترشيد الري الزراعي باستخدام الطاقة الشمسية"، سيتم تنفيذ الأنشطة وفق خطوات عملية مدروسة كما يلي:

## 1-مرحلة الدراسة والتصميم

في هذه المرحلة، يتم تحليل احتياجات الفلاحين بدقة، وتحديد الخصائص التقنية للنظام الذكي، من حيث نوع المستشعرات المطلوبة، مبدأ تشغيل المضخات، طريقة تغذية النظام بالطاقة الشمسية، ومواصفات التطبيق المحمول للتحكم عن بُعد. كما يتم إعداد المخططات الكهربائية والبرمجية الأولية.

## 2-مرحلة التجميع والتجريب

يتم تجميع المكونات الإلكترونية PLC، مستشعرات، مرحلات، مضخات، بطاريات، ألواح شمسية (على لوحة اختبار أولية. ثم تُبرمج وحدة التحكم وتُختبر الخوارزميات لتقييم الأداء في بيئة تجريبية تحاكي الواقع. يتم التأكد من عمل النظام بشكل تلقائي بناءً على مستويات الرطوبة.

### 3-مرحلة تطوير التطبيق المحمول

يتم في هذه المرحلة تطوير الواجهة الرسومية للتطبيق الذي يسمح للفلاح بمراقبة بيانات التربة والتحكم في نظام الري، سواء يدويًا أو آليًا. يُراعى في التصميم البساطة وسهولة الاستخدام، مع دعم اللغتين (العربية والفرنسية) لتوسيع قاعدة المستخدمين.

### 4-مرحلة التركيب الميداني

بعد نجاح التجارب، يتم الانتقال إلى مرحلة التركيب الميداني لدى الزبائن الأوائل. تشمل هذه المرحلة تثبيت المستشعرات في الحقل، ربط الأنابيب، تثبيت المضخات، توصيل النظام بالطاقة الشمسية، واختبار التشغيل في ظروف حقيقية.

### 5-مرحلة التكوين والدعم

يتم تدريب الفلاح على استخدام النظام، وشرح كيفية تشغيله، قراءة المؤشرات، والتفاعل مع التطبيق. كما يتم تقديم الدعم التقني خلال الأسابيع الأولى بعد التثبيت لمراقبة المستخدم في التأقلم مع النظام الجديد.

### 6-مرحلة التقييم والتحسين

يتم جمع ملاحظات المستخدمين، ومراقبة أداء النظام في الميدان، من أجل تحسين الخوارزميات، وتعديل بعض الخصائص حسب الحاجة. كما تُراجع التكلفة والجودة التقنية لتكييف المنتج مع ظروف الاستخدام المختلفة.

### خلاصة

يعتمد تنفيذ أنشطة المشروع على تسلسل مدروس يمر من التصميم، إلى التجريب، فالتركيب الميداني، ثم التكوين والتقييم المستمر. هذا المسار يضمن تقديم منتج ناضج وفعال، يتلاءم مع الواقع الفلاحي الجزائري، ويستجيب لحاجات الزبون بأقل تكلفة وأعلى جودة ممكنة.

### التكنولوجيا

#### الأدوات والتقنيات التي سيتم استخدامها

يعتمد مشروع "تطوير نظام ذكي لترشيد الري الزراعي باستخدام الطاقة الشمسية" على مجموعة من الأدوات والتقنيات الحديثة التي تتكامل فيما بينها لتقديم حل ذكي وفعال يراعي حاجات الفلاح ويستجيب لتحديات البيئة الزراعية في المناطق الريفية. هذه التكنولوجيا تشمل مكونات إلكترونية، أدوات برمجية، ومصادر طاقة نظيفة.

## 1- وحدة التحكم ESP32

تُعد وحدة التحكم المنطقي المبرمج (PLC) بمثابة **العقل الصناعي للنظام**، حيث يتم برمجتها من أجل قراءة بيانات المستشعرات الميدانية، تحليلها وفق خوارزميات محددة مسبقاً، واتخاذ القرارات المناسبة لتشغيل أو إيقاف المضخات والصمامات. تتميز هذه الوحدة بالموثوقية العالية في البيئات القاسية، قدرتها على العمل بشكل متواصل على مدى طويل، ودعمها للتكامل مع أنظمة الإشراف والمراقبة (SCADA) أو (HMI) كما توفر مرونة في الربط مع بروتوكولات الاتصال الصناعية مثل Modbus أو LoRaWAN أو GSM ، مما يسمح بالتحكم والمراقبة عن بُعد بكفاءة وأمان

## 2- مستشعرات الرطوبة والحرارة

يتم استخدام مستشعر رطوبة التربة لقياس نسبة الماء في الأرض بدقة. كما يتم استعمال مستشعر DHT22 لقياس درجة الحرارة والرطوبة الجوية، من أجل تحسين قرار الري وفقاً للظروف المناخية. هذه المعطيات تُرسل مباشرة إلى وحدة PLC للمعالجة.

## 3- تطبيق Blynk

هو تطبيق محمول يُستخدم كواجهة رسومية للتحكم عن بُعد في النظام. يسمح للمستخدم بمراقبة حالة التربة، عرض درجة الحرارة والرطوبة، تشغيل أو إيقاف المضخات يدوياً، وضبط العتبات الخاصة بالتحكم التلقائي. يمتاز التطبيق بالبساطة وسهولة الاستخدام، ويدعم الإشعارات الفورية في حالة الطوارئ.

## 4- الألواح الشمسية والبطاريات

يتم الاعتماد على الألواح الشمسية كمصدر رئيسي للطاقة، خاصة في المناطق التي تفتقر إلى الكهرباء. تُخزن الطاقة في بطاريات ليثيوم قابلة لإعادة الشحن لضمان عمل النظام حتى في غياب ضوء الشمس، مما يضمن استمرارية التشغيل.

## 5- المرحلات والمضخات

تُستخدم وحدات Relay للتحكم في تشغيل أو إيقاف المضخات الكهربائية بشكل آمن، وفقاً للإشارات القادمة من وحدة PLC وتُستخدم مضخات صغيرة أو متوسطة الحجم حسب الحاجة الفعلية للفلاح والمساحة المغطاة.

## خلاصة

يعتمد المشروع على دمج عدة تقنيات حديثة بطريقة منسجمة ومبسطة تضمن الأداء العالي، التشغيل المستقر، وسهولة الاستخدام من طرف الفلاح. هذا التكامل بين الأدوات الإلكترونية والطاقة المتجددة يمثل جوهر الحل المقترح، ويُعتبر من أهم عوامل تميّزه واستدامته.

## موقع المشروع

سيتمركز مشروع "تطوير نظام ذكي لترشيد الري الزراعي باستخدام الطاقة الشمسية" في ولاية غرداية، وبشكل أدق في متليلي الشعانبة، باعتبارها منطقة ذات طابع فلاحي مميز وتتوفر على مساحات زراعية واسعة تعتمد بشكل كبير على أنظمة الري التقليدية، وتواجه تحديات في الكهرباء وتوفير المياه.

اختيار هذا الموقع ليس عشوائياً، بل يستند إلى عدة معايير تقنية واقتصادية واجتماعية، من بينها:

- 1. الطابع الفلاحي للمنطقة**  
تشتهر منطقة متليلي الشعانبة بوجود عدد كبير من المستثمرين الفلاحيين الصغار والمتوسطين، وهو ما يجعلها بيئة مناسبة لاختبار النظام وتقديمه كحل عملي لاحتياجات واقعية في الميدان.
- 2. ضعف التغطية الكهربائية في بعض المناطق**  
ما يُبرز الحاجة إلى حلول تعتمد على الطاقة الشمسية لتشغيل الأنظمة الذكية دون الاعتماد على الشبكة العمومية.
- 3. وفرة أشعة الشمس**  
تتميز المنطقة بنسبة سطوع شمسي عالية على مدار السنة، مما يعزز فعالية الألواح الشمسية ويضمن تشغيلاً مستمراً للمعدات.
- 4. توفر اليد العاملة المحلية**  
يسهل توفير أعوان تركيب ومتابعة ميدانية بتكاليف مناسبة، ما يُعزّز من فعالية المشروع محلياً.
- 5. سهولة الوصول والتوزيع**  
موقع غرداية المتوسط في جنوب الجزائر يسهل من عملية توزيع الحلول لاحقاً إلى ولايات الجنوب الأخرى مثل ورقلة، أدرار، الأغواط والوادي.

بناءً على هذه المعطيات، فإن منطقة متليلي الشعانبة تُعد موقعاً استراتيجياً لإطلاق المشروع، مع قابلية التوسع التدريجي نحو ولايات مجاورة وفقاً للطلب ونجاح النموذج الأولي.

## تقييم المخاطر المخاطر المحتملة:

يُعتبر تقييم المخاطر من المراحل المهمة في إعداد أي مشروع، حيث يُمكن من تحديد التحديات المحتملة التي قد تعيق التنفيذ أو تؤثر على استمرارية المشروع، واتخاذ تدابير استباقية للتقليل من أثرها. في مشروع "تطوير نظام ذكي لترشيد الري الزراعي باستخدام الطاقة الشمسية"، يمكن تصنيف المخاطر المتوقعة إلى أربعة أنواع رئيسية: تقنية، مالية، بيئية، وبشرية.

### 1-المخاطر التقنية

- فشل أحد المكونات الإلكترونية: مثل وحدة PLC، أو المستشعرات أو البطاريات، ما قد يؤدي إلى توقف النظام عن العمل.
- ضعف الاتصال بالشبكة اللاسلكية: خاصة في المناطق التي تفتقر لتغطية Wi-Fi أو شبكات الهاتف، مما قد يُصعب التحكم عن بعد.
- أعطال في نظام الطاقة الشمسية: في حالة تراكم الغبار على الألواح أو ضعف أشعة الشمس في بعض الفصول.

### 2-المخاطر المالية

- ارتفاع تكاليف المكونات المستوردة: بسبب تقلبات أسعار السوق أو الجمارك، ما قد يؤثر على سعر بيع النظام.
- ضعف القدرة الشرائية للفلاحين: مما قد يجعلهم غير قادرين على اقتناء النظام رغم فائدته.
- تأخر في الحصول على التمويل: سواء من الجهات الداعمة أو الزبائن، ما قد يُبطئ وتيرة التنفيذ.

### 3-المخاطر البيئية

- الظروف المناخية القاسية: مثل الحرارة العالية أو الرمال قد تؤثر على أداء الأجهزة أو تسبب تلفاً مبكراً لبعض المكونات.
- تقلب نسب الإشعاع الشمسي: ما قد يؤثر على كفاءة شحن البطاريات وتشغيل النظام باستمرار.

#### 4-المخاطر البشرية والتنظيمية

- ضعف تقبل التكنولوجيا من طرف بعض الفلاحين :خاصة كبار السن أو من ليس لديهم دراية بالتقنيات الحديثة.
- نقص في الكوادر الفنية المؤهلة :لتركيب النظام أو صيانته في المناطق النائية.
- سرقة أو تلف في الميدان :بسبب عدم وجود حماية مادية لبعض المكونات عند التركيب في أماكن مفتوحة.

#### خلاصة

رغم وجود عدة مخاطر محيطة بالمشروع، إلا أن معظمها يمكن التخفيف منه من خلال اعتماد استراتيجية واضحة تشمل: اختيار مكونات ذات جودة، توفير خدمة صيانة محلية، تقديم تسهيلات في الدفع للفلاحين، وتحسيس المستخدمين بأهمية الحل المبتكر. كما يمكن الاستفادة من دعم الدولة والمبادرات المحلية لتجاوز بعض التحديات التنظيمية والمالية.

#### تقييم الأثر

#### الأثر المحتمل لكل خطر:

بعد تحديد المخاطر التي قد تواجه مشروع "تطوير نظام ذكي لترشيد الري الزراعي باستخدام الطاقة الشمسية"، من الضروري تقييم الأثر المحتمل لكل خطر على المشروع من حيث تأثيره على الأداء، التكاليف، سمعة المشروع، واستمراريته. يساهم هذا التقييم في وضع خطة وقائية واستباقية فعالة.

#### 1- (فشل أحد المكونات التقنية PLC) ، مستشعرات، بطاريات

- الأثر المحتمل :توقف النظام عن العمل كليًا أو جزئيًا، مما يؤدي إلى فشل عملية الري وتعطل الخدمة.
- درجة الأثر :مرتفعة، لأن كل مكون مرتبط مباشرة بوظيفة النظام الأساسية.
- الإجراء الوقائي :اختيار مكونات عالية الجودة، توفير قطع غيار، وبرمجة تنبيهات في حالة الخلل.

#### 2-ضعف الاتصال بالشبكة اللاسلكية أو انعدامها

- الأثر المحتمل :تعذر إرسال واستقبال البيانات عبر التطبيق، مما يُقيد وظائف التحكم عن بعد.
- درجة الأثر :متوسطة، لأن النظام يعمل آليًا أيضًا دون إنترنت.

- **الإجراء الوقائي:** تخزين آخر الإعدادات في PLC وتشغيل النظام في وضع محلي تلقائيًا.

### (3)-أعطال أو انخفاض أداء الألواح الشمسية

- **الأثر المحتمل:** انقطاع في مصدر الطاقة يؤثر على استمرارية تشغيل النظام.
- **درجة الأثر:** مرتفعة في حال غياب مصدر طاقة بديل.
- **الإجراء الوقائي:** تنظيف دوري للألواح، استخدام بطاريات ذات سعة احتياطية، تركيب منظم شحن فعال.

### (4)-ارتفاع تكلفة المكونات أو صعوبة الاستيراد

- **الأثر المحتمل:** زيادة تكلفة الإنتاج، ما قد يؤدي إلى رفع سعر البيع وتقليل القدرة التنافسية.
- **درجة الأثر:** متوسطة إلى مرتفعة.
- **الإجراء الوقائي:** اقتناء المكونات بالجملة، والبحث عن موردين محليين أو بدائل أرخص دون التضحية بالجودة.

### (5)-ضعف القدرة الشرائية للفلاحين

- **الأثر المحتمل:** انخفاض في حجم الطلب، ما يؤثر على مردودية المشروع.
- **درجة الأثر:** مرتفعة على المدى القصير.
- **الإجراء الوقائي:** تقديم حلول تمويلية مرنة، الشراكة مع أجهزة دعم الشباب) مثل NESDA

### (6)-مقاومة التغيير من طرف بعض الفلاحين

- **الأثر المحتمل:** بطء في انتشار النظام وصعوبة في إقناع الزبائن الجدد.
- **درجة الأثر:** متوسطة.
- **الإجراء الوقائي:** تنظيم ورشات توعوية، تقديم نماذج تجريبية مجانية، وتوفير دليل استخدام مبسط.

### (7)-الظروف المناخية القاسية (حرارة، رمال، أمطار غزيرة)

- **الأثر المحتمل:** تلف في الأجهزة الخارجية أو تقليل عمرها التشغيلي.
- **درجة الأثر:** متوسطة إلى مرتفعة حسب المنطقة.

- **الإجراء الوقائي:** استخدام حاويات عازلة، ومعدات مقاومة للماء والغبار، مع التركيب الآمن تحت مظلات حماية.

## خلاصة

تُظهر دراسة الأثر أن معظم المخاطر المتوقعة يمكن التحكم فيها أو التخفيف من حدتها عند التخطيط الجيد للمشروع واختيار التكنولوجيا المناسبة. ويبقى الوعي المسبق بالمخاطر وتقييم أثرها خطوة أساسية نحو ضمان استمرارية المشروع ونجاحه في الميدان.

## جراءات تخفيف المخاطر: ما هي التدابير التي ينبغي اتخاذها لتقليل المخاطر؟

يمثل التعامل الاستباقي مع المخاطر أحد المفاتيح الأساسية لضمان استمرارية ونجاح المشروع على المدى المتوسط والطويل. ويقتضي ذلك وضع خطة عملية لتقليل آثار المخاطر المحتملة التي قد تواجه مشروع "تطوير نظام ذكي لترشيد الري الزراعي باستخدام الطاقة الشمسية"، سواء كانت تقنية، مالية، بيئية أو بشرية. فيما يلي أهم التدابير المقترحة لتخفيف هذه المخاطر:

### 1.-التدابير التقنية

- استخدام مكونات إلكترونية موثوقة ذات جودة عالية من علامات معروفة عالمياً.
- تنفيذ اختبارات مكثفة لكل نظام قبل تركيبه في الميدان للتأكد من فعالية الأداء.
- تصميم النظام بطريقة مرنة تسمح بسهولة الصيانة أو الاستبدال الجزئي في حال العطل.
- تضمين وحدة أمان داخلية (Watchdog) في البرمجة لإعادة تشغيل النظام تلقائياً عند الخلل.

### 2.-التدابير المرتبطة بالطاقة

- استخدام ألواح شمسية ذات كفاءة عالية ومقاومة للحرارة والغبار.
- تركيب البطاريات داخل صناديق محمية من الرطوبة والحرارة المباشرة.
- إضافة وحدة تحكم ذكية بالطاقة (charge controller) لضمان تنظيم الشحن وتفادي التلف.

### 3.-التدابير المالية

- التفاوض مع الموردين المحليين والدوليين للحصول على أسعار تفضيلية خاصة بكميات كبيرة.
- البحث عن دعم مالي أو شراكات تمويلية مع هيئات مثل "الوكالة الوطنية لدعم المقاولاتية".

- تقديم تسهيلات في الدفع للفلاحين (مثل التقسيط) لتوسيع قاعدة الزبائن.
- تنويع مصادر الدخل من خلال تقديم خدمات تركيب، صيانة، وتكوين إضافي.

#### 4.-التدابير التوعوية والبشرية

- إعداد دليل استعمال مبسّط باللغة العربية للفلاحين.
- تنظيم أيام تحسيسية ودورات تكوينية لتسهيل فهم التكنولوجيا الجديدة.
- تقديم نماذج تجريبية في بعض الحقول لكسب الثقة وبناء سمعة جيدة في السوق.
- توفير دعم فني سريع عند الطلب لبناء علاقة ثقة بين المؤسسة والزبون.

#### 5)-التدابير البيئية والميدانية

- حماية المكونات الخارجية للنظام بصناديق عازلة من العوامل الجوية.
- إجراء صيانة دورية للألواح الشمسية والمستشعرات.
- متابعة دورية للمزارع المركب بها النظام لضمان استمرار الأداء المطلوب.

#### خلاصة

إن إدماج هذه الإجراءات ضمن استراتيجية المشروع منذ البداية يقلل بشكل كبير من حجم الأضرار المحتملة، ويمنح المشروع استقراراً تقنياً وثقة في السوق. كما يعزز فرص النجاح والتوسع، خاصة في بيئة زراعية تواجه تحديات متزايدة.

#### الخلاصة والتوصيات: ملخص النتائج الرئيسية للدراسة

بعد تحليل مختلف جوانب مشروع "تطوير نظام ذكي لترشيد الري الزراعي باستخدام الطاقة الشمسية"، يمكن تلخيص النتائج الرئيسية التي توصلت إليها الدراسة كما يلي:

1. أهمية المشروع وواقعيته  
أظهرت الدراسة أن المشروع يستجيب لحاجة حقيقية يعاني منها عدد كبير من الفلاحين، تتمثل في ضعف التحكم في عملية الري وهدر المياه وغياب الكهرباء في بعض المناطق. وقد تم تأكيد أن النظام الذكي المقترح يوفر حلاً فعالاً وامتكاملاً لهذه الإشكالات.
2. الجدوى التقنية  
أثبت المشروع إمكانية التنفيذ من الناحية التقنية، بفضل دمج تقنيات مثل وحدة ESP32، مستشعرات الرطوبة والحرارة، تطبيق تحكم عن بعد، وألواح شمسية كمصدر طاقة مستقل، مما يضمن اشتغال النظام بكفاءة واستمرارية عالية.
3. الجدوى الاقتصادية  
بيّنت الدراسة أن النظام يوفر في استهلاك المياه والطاقة على المدى الطويل، ويقلل من

الحاجة إلى اليد العاملة، مما يُمكن الفلاح من تقليل التكاليف التشغيلية وزيادة الإنتاجية، بالرغم من وجود تكلفة أولية تُعد في المتناول مقارنة بالفوائد المحققة.

#### 4. قابلية التوسع

يتميز المشروع بقابليته للتكيف مع مختلف أنواع الحقول الزراعية (صغيرة، متوسطة، وكبيرة)، وإمكانية انتشاره في ولايات عديدة، خصوصاً في الجنوب الجزائري، بفضل الطاقة الشمسية وسهولة التركيب.

#### 5. الفرص السوقية

تشير نتائج دراسة السوق إلى وجود شريحة واسعة من العملاء المحتملين، خاصة في المناطق الفلاحية المعزولة، مع استعداد متزايد لدى الفلاحين لتبني الحلول الذكية، خصوصاً إذا تم توفيرها بأسعار مناسبة وبمرافقة فنية فعالة.

#### 6. المخاطر المتوقعة وإدارتها

حددت الدراسة مجموعة من المخاطر التقنية والمالية والتنظيمية، واقتُرحت إجراءات عملية لتفاديها أو التخفيف من أثرها، مما يمنح المشروع قدرًا جيدًا من الاستقرار والمرونة.

### خلاصة عامة

من خلال النتائج المستخلصة، يتضح أن المشروع يجمع بين الابتكار، الجدوى الاقتصادية، والاستجابة الفعلية لتحديات القطاع الزراعي، مما يجعله مشروعًا ذا قيمة عالية يمكن أن يُحدث أثرًا إيجابيًا واسعًا في مجال الفلاحة الذكية والمستدامة في الجزائر.

### الملاحظات النهائية والاستنتاج (الاستنتاجات): توصيات بشأن الاستمرار في المشروع أم لا

استنادًا إلى جميع المعطيات والتحليل التقنية، المالية، السوقية والتنظيمية التي تناولتها الدراسة، يمكن القول إن مشروع "تطوير نظام ذكي لترشيد الري الزراعي باستخدام الطاقة الشمسية" يُعد مشروعًا واعدًا يحمل في طياته أبعادًا اقتصادية وبيئية وتقنية مهمة، ويستجيب لمشكلات واقعية يعيشها الفلاح الجزائري، خاصة في المناطق الريفية وشبه الصحراوية.

لقد أظهرت نتائج التحليل أن النظام الذكي المقترح يوفر حلًا عمليًا يدمج بين التحكم الآلي في عملية الري، توفير المياه، الاستقلال الطاقوي، والقدرة على المراقبة عن بُعد، مما يعزز من كفاءة التسيير الفلاحي، ويواكب التوجه العالمي نحو الزراعة الذكية والمستدامة.

رغم وجود بعض التحديات والمخاطر التقنية أو المالية، فإنها تظل قابلة للإدارة من خلال إجراءات وقائية مناسبة وشراكات محتملة، إضافة إلى الدعم المتاح من طرف الدولة وهيئات دعم المؤسسات المصغرة.

بناءً على ما سبق، توصي هذه الدراسة بـ:

1. الاستمرار في المشروع وتطويره تدريجياً، انطلاقاً من نماذج ميدانية تجريبية.
2. توسيع دائرة الشركاء التقنيين والماليين لدعم تنفيذه على نطاق أوسع.
3. الاستثمار في التكوين والدعم الميداني لفائدة الفلاحين لتعزيز استخدامهم للنظام بكفاءة.
4. التركيز على البساطة والموثوقية في التصميم لضمان الاستخدام الفعلي من قبل الفلاحين ذوي المعرفة التقنية المحدودة.
5. التخطيط لتوسيع المشروع مستقبلاً ليشمل وظائف إضافية مثل المراقبة المناخية أو تحليل خصوبة التربة.

### الاستنتاج النهائي

إن المشروع المقترح ليس فقط قابلاً للتنفيذ، بل يمثل أيضاً فرصة استراتيجية للمساهمة في تطوير الفلاحة الجزائرية بطريقة حديثة وفعالة. وعليه، فإن التوصية الأساسية هي المرور إلى مرحلة التطبيق الفعلي والاختبار الميداني، مع العمل على توسيع نطاقه تدريجياً حسب توفر الموارد وديناميكية السوق.

# المحور الثالث

## BMC

يُعد نموذج الأعمال التجاري (Business Model Canvas - BMC) أداة تحليلية واستراتيجية تساعد على تصوّر وتخطيط كيفية خلق القيمة وتقديمها للعملاء بطريقة منظمة وبمبسطة. فهو يُمكن من رسم خريطة شاملة لمختلف مكونات المشروع على لوحة واحدة، مما يُسهل الفهم السريع للعلاقات بين الجوانب التقنية والتجارية والمالية.

تتمثل أهميته في دراسة مشروعنا في أنه يساهم في تحديد الفئات المستهدفة بدقة، وتحليل القيمة المقترحة لكل فئة، وتوضيح سبل الإيرادات والتكاليف، بالإضافة إلى تحديد الموارد والشراكات والأنشطة الأساسية، مما يضمن بناء مشروع متكامل ومتوازن من الناحية الاقتصادية والتقنية، ويُسهل اتخاذ القرارات الإستراتيجية طوال دورة حياة المشروع

### نموذج الأعمال التجاري

الشركاء الرئيسيون	الأنشطة الرئيسية	عرض القيمة	العلاقة مع العملاء	العملاء (الشرائح المستهدفة)
<ul style="list-style-type: none"> <li>موردون متخصصون في المكونات الإلكترونية الدقيقة: ESP32, DHT22, ريثم، شاشات LCD I2C.</li> <li>شركات متخصصة في الطاقة الشمسية، توريد وتركيب الألواح، البطاريات، منظمات الشحن.</li> <li>مزوّدون لمعدات الري: مضخات المياه، الأنابيب المقاومة للضغط، فوهات توزيع.</li> <li>تعاونيات فلاحية محلية لتجريب الأنظمة وتسهيل التوعية والانتشار الميداني.</li> <li>بلديات ومصالح فلاحية لتوفير الموافقة والتسهيلات في مشاريع نموذجية.</li> <li>الوكالات الحكومية لدعم المشاريع (ANADE, CNAC) لتوفير التمويل للمؤسسة والفلاحين.</li> <li>تقنيون مستقلون في المناطق الريفية: للتركيب، الصيانة، والتكوين.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>تطوير الخوارزميات الخاصة بقرارات الري وفق بيانات المستشعرات.</li> <li>برمجة وحدة ESP32 وربطها بالمحساسات والمضخات والـ Wi-Fi.</li> <li>إنشاء تطبيق تحكم عن بعد باستخدام منصة Blynk.</li> <li>تركيب الأنظمة الشمسية لتوليد الطاقة المستقلة.</li> <li>تصميم شبكة الأنابيب وتثبيت المضخات في الحقل.</li> <li>تدريب الفلاحين على الاستخدام والصيانة.</li> <li>الصيانة الوقائية والاستجابة للدعم الفني.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>ترشيد كبير لاستهلاك المياه وفقاً لمؤشرات حذيفة من الحقل.</li> <li>استقلالية تامة في الطاقة عبر الاعتماد على الألواح الشمسية.</li> <li>تقليل الحاجة إلى العمالة اليدوية وخفض التكاليف.</li> <li>إمكانية التحكم اليدوي والتلقائي في أي وقت ومن أي مكان.</li> <li>مرونة في تخصيص النظام حسب نوع التربة، المحصول، أو الموسم.</li> <li>بينة استخدام بسيطة لا تتطلب مهارات تقنية عالية.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>تقديم عرض تجريبي أولي للنظام قبل الشراء.</li> <li>تدريب مباشر للفلاح على استخدام النظام والتطبيق.</li> <li>توفير دعم تقني متواصل عبر الهاتف أو الرسائل الفورية.</li> <li>إرسال تحديثات تلقائية عند تحسين البرمجيات.</li> <li>تتبع دوري لحالة النظام وتحسينه حسب ملاحظات الزبون.</li> <li>زيارات صيانة وقائية وتحسينية كل موسم زراعي.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>فلاحون أفراد في مناطق تتنقر للبيئية التحتية الكهربائية.</li> <li>أصحاب مزارع التخليل، الزيتون، والخضراوات.</li> <li>تعاونيات زراعية تسيطر مساحات كبيرة من المحول.</li> <li>بلديات أو مشاريع فلاحية محلية ذات طابع جماعي.</li> <li>شباب حقلو مشاريع مدعّمة في إطار ANSEJ/ANADE.</li> <li>جمعيات تنمية بيئية تبحث عن حلول مستدامة.</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>المواد الإلكترونية: وحدة ESP32، مستشعر رطوبة التربة، مستشعر DHT22، شاشة LCD، مرحلات كهربائية، التجويزات الطاقوية: ألواح شمسية بولي كريستال 5V، بطاريات 18650، منظمات شحن DC-DC.</li> <li>معدات الري: مضخات سطحية أو غاطسية، أنابيب بولي إيثيلين، صمامات توزيع، وصلات.</li> <li>المواد البرمجية: بينة Arduino IDE، مكتبات Blynk، أدوات المراقبة والاتصال Wi-Fi.</li> <li>الموارد البشرية: مهندسون في البرمجة، تقنيون في الطاقة، كهربائيون صناعيون، مركبون ميدانيون.</li> <li>وسائل النقل، المتابعة، والدعم الفني.</li> <li>خدمة أدوات حفر وتثبيت، معدات قياس ومعايرة.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>فئات التوزيع</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>فريق متخصصة في التركيب والتوصيب الميداني.</li> <li>صفحات التواصل الاجتماعي (فيسبوك، يوتيوب) لنشر الفيديوهات والشروحات.</li> <li>تطبيق Blynk كواجهة استخدام رئيسية للفلاح.</li> <li>المشاركة في المعارض الفلاحية والمواثيم المحلية.</li> <li>تعاونيات فلاحية ومؤسسات تنمية كفاءة جماعية للنشر.</li> <li>التوصيات المباشرة بين الفلاحين (Word-of-Mouth).</li> </ul>	
	<ul style="list-style-type: none"> <li>التكاليف</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>العناجل (مصادر الدخل)</li> </ul>		
	<ul style="list-style-type: none"> <li>تكلفة شراء ESP32، المحساسات، الشاشات، المرحلات.</li> <li>تكلفة نظام الطاقة الشمسية (ألواح، بطاريات، منظم شحن).</li> <li>تكلفة مضخة المياه والأنابيب والتوصيلات.</li> <li>أجور الفريق التقني المكلف بالبرمجة والتركيب.</li> <li>مصاريف النقل، المتابعة، والدعم الفني.</li> <li>تطوير واجهات التطبيقات وربطها بالسيرفرات.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>بيع نظام الري الذكي كحل متكامل (عناجل + برمجة + تركيب).</li> <li>اشتراكات سنوية لخدمات الدعم والتحديث البرمجي.</li> <li>بيع ملحقات إضافية مثل مضخات أو مستشعرات إضافية.</li> <li>تطوير خدمات خاصة في التطبيق حسب طلب الفلاح.</li> <li>عقد جماعية مع التعاونيات أو البلديات.</li> <li>التكوين المدفوع للفلاحين أو تقنيين محليين.</li> </ul>		

## 1-الشركاء الرئيسيون

يشكّل الشركاء الرئيسيون دعامة أساسية لضمان جودة التنفيذ وتوسيع نطاق المشروع. المشروع يعتمد على حلول ذكية مدمجة تجمع بين المكونات الإلكترونية، الطاقة الشمسية، وأنظمة الري، ما يتطلب تنسيقاً مع شركاء تقنيين وتجاريين موثوقين. كما أن البيئة الفلاحية تستدعي توافر دعم محلي، لوجستي، وتمويلي، لذلك تُعدّ الشراكات مع التعاونيات والمؤسسات العمومية ضرورة حتمية. هذه البنية التشاركية تتيح خفض التكاليف، تحسين الأداء، والوصول إلى الزبائن بطريقة فعالة وميدانية.

ومن أهم الشركاء الذين يعتمد عليهم المشروع:

- موردون متخصصون في المكونات الإلكترونية الدقيقة PLC :، DHT22، ريليه، شاشات.
- شركات متخصصة في الطاقة الشمسية: توريد وتركيب الألواح، البطاريات، منظمات الشحن.
- مزودون لمعدات الري: مضخات المياه، الأنابيب المقاومة للضغط، فوهات توزيع.
- تعاونيات فلاحية محلية: لتجريب الأنظمة وتسهيل التوعية والانتشار الميداني.
- بلديات ومصالح فلاحية: لتوفير الموافقة والتسهيلات في مشاريع نموذجية جماعية.
- الوكالات الحكومية لدعم المشاريع NESDA لتوفير التمويل للمؤسسة والفلاحين.
- تقنيون مستقلون في المناطق الريفية: للتركيب، الصيانة، والتكوين.

## 2-الأنشطة الرئيسية

تعتمد المؤسسة على سلسلة من الأنشطة المتكاملة التي تضمن تقديم منتج نهائي ذكي، قابل للتخصيص حسب نوع المحصول أو الحقل. هذه الأنشطة تبدأ من تطوير البرمجيات المدمجة في وحدة التحكم PLC، إلى إعداد التطبيق الهاتفي، وتمر عبر تركيب المكونات المادية وربطها بشبكة الري. كما تشمل المتابعة التقنية للفلاح، وتطوير حلول إضافية حسب الطلب. كل نشاط ضمن هذه السلسلة يهدف إلى تحقيق أداء موثوق ومستدام في بيئات زراعية صعبة ومتغيرة.

وتشمل الأنشطة التي تضطلع بها المؤسسة:

- تطوير الخوارزميات الخاصة بقرارات الري وفق بيانات المستشعرات.
- برمجة وحدة PLC وربطها بالحساسات والمضخات وال-Wi-Fi.
- إنشاء تطبيق تحكم عن بعد باستخدام منصة Blynk.
- تركيب الأنظمة الشمسية لتوليد الطاقة المستقلة.

- تصميم شبكة الأنابيب وتثبيت المضخات في الحقل.
- تدريب الفلاحين على الاستخدام والصيانة.
- الصيانة الوقائية والاستجابة للدعم الفني.

### (3)-الموارد الرئيسية

يتطلب المشروع توفير موارد متعددة تضمن تشغيل النظام بكفاءة في بيئات زراعية مختلفة. تشمل هذه الموارد المعدات المادية، البرمجيات، الكفاءات البشرية، ووسائل النقل والدعم اللوجستي. يجب أن تكون هذه الموارد متوفرة بجودة عالية وأسعار مناسبة لتحقيق مردودية عالية للفلاح ولمؤسسة المشروع في آن واحد.

وتتمثل الموارد الرئيسية في ما يلي:

#### 1.العتاد الإلكتروني والصناعي

- وحدة تحكم صناعية (PLC) مثل (Siemens LOGO! أو Schneider Zelio).
- مستشعرات رطوبة التربة صناعية (Capacitive Soil Moisture Sensors) مقاومة للعوامل المناخية.
- مستشعرات مناخية متعددة الوظائف (درجة الحرارة، الرطوبة، الضغط – محطة صغيرة متكاملة).
- واجهة تشغيل (HMI) شاشة لمس صناعية للتحكم المحلي.
- مرحلات وقدرات كهربائية صناعية. (Industrial Relays & Contactors).

#### 2.التجهيزات الطاقوية

- ألواح شمسية بولي/مونو كريستال عالية الكفاءة (12V) أو (24V).
- منظم شحن شمسي MPPT صناعي.
- بطاريات ليثيوم-أيون أو بطاريات جل (Gel batteries) بسعة أكبر من 18650.
- محولات DC-AC (Inverter) لتشغيل المضخات عند الحاجة.

#### 3.معدات الري

- مضخات مائية صناعية (Surface) أو (Submersible) ذات قدرة مناسبة للمساحات الزراعية.
- شبكة أنابيب بولي إيثيلين مع صمامات تحكم كهربائية. (Electrovalves).
- مرشحات مائية (Filters) لحماية الشبكة.

- وصلات وصنابير تحكم ميدانية.

#### 4.الموارد البرمجية والاتصالية

- بيئة برمجة خاصة بـ TIA Portal PLC لسيمنس أو EcoStruxure لشنايدر).
- منصات مراقبة صناعية (SCADA) أو (Cloud IoT).
- بروتوكولات اتصال طويلة المدى (LoRaWAN) أو (Wi-Fi GSM/4G) بدل العادي.
- برمجيات تحليل البيانات وتخزينها (Databases + Tableau/PowerBI) للتقارير).

#### 5.الموارد البشرية

- مهندسو أوتوماتيك وأنظمة صناعية.
- تقنيون مختصون في الطاقة الشمسية.
- كهربائيون صناعيون لتركيب الوصلات واللوحات.
- فرق تركيب وصيانة ميدانية. (plombiers agricoles + installateurs)

#### 6.وسائل النقل واللوجستيك

- شاحنات صغيرة أو سيارات خدمة مجهزة.
- أدوات حفر وتثبيت صناعية.
- أجهزة قياس ومعايرة احترافية. (Multimeters, Clamp meters, Flow meters)
- مخزن قطع غيار وصيانة احتياطية.

#### 4- عرض القيمة

تتمثل القيمة التي تقدمها المؤسسة في حل ذكي، موثوق، واقتصادي لتدبير عملية الري. يُمكن النظام الفلاح من التخلص من العشوائية والتقليدية، ويوفّر له أداة تعتمد على البيانات، مما يسمح بترشيد الموارد، رفع المردودية، وتقليل التكاليف. كما أنّ الطاقة الشمسية تضمن استقلالية تشغيلية، ويتيح التطبيق المحمول مراقبة الحقل عن بُعد، ما يخلق راحة نفسية وإنتاجية أعلى.

وتتمثل القيمة المقترحة التي يُقدمها النظام في:

- ترشيد كبير لاستهلاك المياه وفقاً لمؤشرات حقيقية من الحقل.
- استقلالية تامة في الطاقة عبر الاعتماد على الألواح الشمسية.
- تقليص الحاجة إلى العمالة اليدوية وخفض التكاليف.

- إمكانية التحكم اليدوي والتلقائي في أي وقت ومن أي مكان.
- مرونة في تخصيص النظام حسب نوع التربة، المحصول، أو الموسم.
- بيئة استخدام بسيطة لا تتطلب مهارات تقنية عالية.

## (5)-العلاقة مع الزبائن

ترتكز العلاقة مع الزبائن على المرافقة والدعم المستمر قبل، أثناء، وبعد عملية البيع. يتم إشراك الزبون في تجربة مبكرة للنظام، وتزويده بتكوين ميداني يتناسب مع مستواه، كما توفر المؤسسة دعماً تقنياً دائماً لضمان استمرارية الأداء، مما يعزز الثقة والولاء، ويحول الزبون إلى شريك في النشر والتسويق الميداني.

وتتمثل آليات الحفاظ على العلاقة مع الزبائن في:

- تقديم عرض تجريبي أولي للنظام قبل الشراء.
- تدريب مباشر للفلاح على استخدام النظام والتطبيق.
- توفير دعم تقني متواصل عبر الهاتف أو الرسائل الفورية.
- إرسال تحديثات تلقائية عند تحسين البرمجيات.
- تتبع دوري لحالة النظام وتحسينه حسب ملاحظات الزبون.
- زيارات صيانة وقائية وتحسينية كل موسم زراعي.

## (6)-قنوات التوزيع

يعتمد المشروع على توزيع هجين يجمع بين التركيب الميداني المباشر، والدعم عبر الوسائط الرقمية. هذه القنوات تسمح بالوصول إلى الزبون النهائي في مناطق نائية أو شبه حضرية، كما تضمن الفعالية من خلال وجود دائم للمؤسسة في محيط الزبون. الجمع بين الرقمنة والميدان يعطي مرونة وقابلية توسع كبيرة.

وتتمثل قنوات التوزيع في:

- فرق متخصصة في التركيب والتنصيب الميداني.
- صفحات التواصل الاجتماعي (فيسبوك، يوتيوب) لنشر الفيديوهات والشروحات.
- تطبيق Blynk كواجهة استخدام رئيسية للفلاح.
- المشاركة في المعارض الفلاحية والمواسم المحلية.
- تعاونيات فلاحية ومؤسسات تنمية كقناة جماعية للنشر.

## • التوصيات المباشرة بين الفلاحين.(Word-of-Mouth)

### 7-شريحة العملاء

تستهدف المؤسسة شريحة واسعة من الفلاحين الذين يحتاجون إلى حل ذكي وموثوق لإدارة الري. تختلف هذه الشريحة من حيث الموقع الجغرافي، نوع المحصول، أو القدرة الشرائية، إلا أنهم يتشاركون الحاجة إلى التحكم في استهلاك المياه، التغلب على مشكلة الكهرباء، ورفع جودة الإنتاج.

وتشمل الشريحة المستهدفة:

- فلاحون أفراد في مناطق تفتقر للبنية التحتية الكهربائية.
- أصحاب مزارع النخيل، الزيتون، والحمضيات.
- تعاونيات زراعية تدير مساحات كبيرة من الحقول.
- بلديات أو مشاريع فلاحية محلية ذات طابع جماعي.
- شباب حاملو مشاريع مدعومة في إطار NESDA.
- جمعيات تنمية بيئية تبحث عن حلول مستدامة.

### 8.- بنية التكاليف

تعتمد المؤسسة على بنية تكاليف مرنة وتتناسب مع حجم المشروع وحاجة الفلاح. تنقسم التكاليف إلى ثابتة تشمل المعدات والبرمجيات، ومتغيرة تتعلق بالنقل، الصيانة، والتكوين. هذه البنية تسمح باقتراح باقات بأسعار مختلفة حسب مساحة الأرض، نوع المزرعات، أو حتى الظروف المناخية.

وتشمل أهم مكونات التكلفة:

- تكلفة شراء PLC ، الحساسات، الشاشات، المرحلات.
- تكلفة نظام الطاقة الشمسية (ألواح، بطاريات، منظم شحن).
- تكلفة مضخة المياه والأنابيب والتوصيلات.
- أجور الفريق التقني المكلف بالبرمجة والتركيب.
- مصاريف التنقل، المتابعة، والدعم الفني.
- تطوير واجهات التطبيقات وربطها بالسيرفرات.

---

## 9-مصادر الإيرادات

يعتمد المشروع على نموذج إيرادات متنوع يضمن الاستمرارية والربحية. يتم تحصيل الدخل من خلال بيع النظام المتكامل، إضافة إلى خدمات إضافية مثل الصيانة، التكوين، أو توسيع النظام عند الحاجة. كما تُفتح آفاق أخرى للشراكات الجماعية التي يمكن أن تكون مدعومة من طرف مؤسسات عمومية أو جمعيات مهنية.

وتشمل مصادر الدخل الرئيسية:

- بيع نظام الري الذكي كحل متكامل (عتاد + برمجة + تركيب).
- اشتراكات سنوية لخدمات الدعم والتحديث البرمجي.
- بيع ملحقات إضافية مثل مضخات أو مستشعرات إضافية.
- تطوير خصائص خاصة في التطبيق حسب طلب الفلاح.
- عقود جماعية مع التعاونيات أو البلديات.
- التكوين المدفوع لفلاحين أو تقنيين محليين.

# المحور الرابع

النموذج الأولي للمشروع (Prototype) :

اسم المؤسسة:  
مؤسسة AquaCrop للتطوير الفلاحي

### طبيعة النشاط :

تطوير أنظمة ذكية ومستدامة لترشيد استهلاك المياه والطاقة في المجال الزراعي، اعتماداً على تقنيات الاستشعار والتحكم عن بعد والطاقة الشمسية.

### وصف النظام المقترح:

يتكوّن النظام من وحدة تحكم إلكترونية (PLC) مربوطة بمجموعة من المستشعرات (مثل مستشعر رطوبة التربة ومستشعر DHT22 للحرارة والرطوبة)، إضافة إلى مضخات يتم تشغيلها تلقائياً عند الحاجة. النظام مزوّد بواجهة تحكم عن بُعد عبر تطبيق Blynk ، مع شاشة لعرض القراءات الفعلية في الحقل، ويتم تشغيله بالطاقة الشمسية بواسطة ألواح بولي كريستال وبطاريات .

### الخصائص التقنية الرئيسية:

مراقبة رطوبة التربة ودرجة الحرارة تلقائياً.

تشغيل المضخات حسب الحاجة وفق خوارزميات ذكية.

واجهة تطبيق سهلة عبر الهاتف للتحكم في النظام ومتابعة البيانات.

تغذية مستقلة بالطاقة الشمسية لتقليل الاعتماد على الكهرباء العمومية.

تركيب أنابيب احترازية للري حسب طبيعة الحقل.

### الفئة المستهدفة:

الفلاحون في المناطق الريفية والصحراوية.

المستثمرون في المجال الزراعي (بيوت بلاستيكية، زراعة النخيل، الزيتون، الحمضيات...).

تعاونيات فلاحية ومزارع متوسطة وكبيرة الحجم.

### القيمة المضافة:

تقليل استهلاك المياه والكهرباء بنسبة تصل إلى 50%.

زيادة الإنتاجية وجودة المحصول عبر ري موجه ومحسوب بدقة.

تحكم كامل عن بعد دون الحاجة للتواجد الدائم في المزرعة.

انخفاض تكاليف العمالة والصيانة مقارنة بالطرق التقليدية.

### **تجربة المستخدم:**

تركيب سريع وشرح مبسط.

تدريب الفلاح على استخدام التطبيق.

اختبار ميداني أولي قبل الشراء النهائي.

إمكانية التعديل حسب نوع الزراعة وتضاريس الحقل.

### **الخدمات المرافقة:**

صيانة دورية للمعدات.

تحديث البرمجيات تلقائيًا عند توفر تحسينات.

دعم تقني فوري عبر الهاتف أو التطبيق.

زيارات ميدانية استشارية قبل وبعد التركيب.

### **الآفاق المستقبلية:**

دمج الذكاء الاصطناعي للتعرف على نوع الأشجار وضبط توقيت الري المناسب تلقائيًا.

استغلال البيانات المناخية والبيئية لتقديم توصيات مخصصة لكل حقل.

تطوير تطبيق متكامل يشمل إدارة الري، التسميد، ومراقبة الصحة النباتية.

التوسع في الأسواق الوطنية والدول المجاورة (دول الساحل والمغرب العربي).