

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

MINISTRY OF HIGHER EDUCATION  
AND SCIENTIFIC RESEARCH

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



المدرسة العليا في العلوم التطبيقية  
École Supérieure en  
Sciences Appliquées

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

المدرسة العليا في العلوم التطبيقية  
- تلمسان -

Mémoire de fin d'étude

Pour l'obtention du diplôme de master

Filière: Automatique  
Spécialité: Automatique

Présenté par : Acheraf Adel TALBI et Ilyas MAHI TANI

Thème

**Contrôle à Distance de l'Arrosage :  
Développement d'une Application Mobile**

Soutenu publiquement, le 17 / 12 / 2025 , devant le jury composé de:

Mme BELAID Asma	MCB	Président
Mme BEKKAOUI Mokhtaria	MCB	Encadrante 1
Mme NEDJAR Imane	MCA	Encadrante 2
M M'HAMEDI Mohammed	MCB	Co- Encadrant
Mme MEDJAHDI Nadjia	MCB	Examineur 1
M ABDELAOUI Ghouti	MCA	Incubateur
M Représentant BOUBLENTA	Entreprise	Partenaire socio-économique

Année universitaire : 2024 / 2025

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

# Dédicaces

Nous dédions ce mémoire à nos familles respectives, pour leur amour, leur patience et leur soutien tout au long de notre parcours académique.

À nos parents, qui ont toujours cru en nous, et qui ont été notre source de motivation et de force.

À nos enseignants et encadrants, pour leur accompagnement précieux et leurs conseils avisés.

À nos amis, qui ont partagé avec nous les joies, les stress, et les longues heures de travail et Yacine Boudiri pour leur soutien dans la partie de réalisation.

Ce mémoire est le fruit d'un travail d'équipe, de persévérance et de passion. Nous espérons qu'il soit à la hauteur des efforts fournis.

# Remerciements

Louange à Dieu, Le Très-Haut, pour nous avoir donné la force, la patience et la persévérance tout au long de ce parcours académique.

Nous exprimons notre profonde gratitude à nos encadrants :

- **Dr Mohamed Mhamedi,**
- **Dr Mokhtaria Bekkaoui,**
- **Dr Imane Nedjar,**

pour leur accompagnement, leurs conseils précieux et leur disponibilité. Leur rigueur scientifique et leur soutien constant ont été essentiels à la réalisation de ce travail.

Nous remercions également nos familles, en particulier nos **parents**, pour leur amour inconditionnel, leurs sacrifices et leur soutien moral et matériel tout au long de notre formation.

Un grand merci à nos **frères**, qui ont toujours été présents à nos côtés, nous encourageant dans les moments difficiles.

Enfin, nous adressons nos remerciements à toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à la réussite de ce mémoire.

# الملخص

يقدم هذا العمل تصميم وتنفيذ نظام ريّ ذكي يمكن التحكم فيه عن بُعد باستخدام المتحكم الدقيق ESP \ ٣٢ ، ومستشعرات بيئية، وتطبيق الهاتف المحمول لينك. يتيح النظام قياس رطوبة التربة ودرجة الحرارة وتدقق المياه لحظة بلحظة، وتشغيل الريّ تلقائيًا أو يدويًا حسب العتبات المحددة.

أظهرت التجارب تحسّنًا ملحوظًا في كفاءة استخدام المياه، مع توفير يتراوح بين ٢٠% و٥٤%. يتميز النظام بكونه مرّنًا وقابلًا للتطوير، ويمكن تحسينه بإضافة طاقة شمسية أو تخزين محلي للبيانات أو نماذج تنبؤية تعتمد على الذكاء الاصطناعي. يستجيب هذا المشروع لمتطلبات الزراعة الذكية ويساهم في إدارة مستدامة وفعّالة للموارد المائية.

**الكلمات المفتاحية:** الريّ الذكي، ESP \ ٣٢، إنترنت الأشياء، Blynk \ ، الزراعة الدقيقة، المستشعرات، الأتمتة، إدارة المياه.

# Abstract

This work presents the design and implementation of an intelligent remote-controlled irrigation system using an ESP32 microcontroller, environmental sensors, and the Blynk IoT mobile application. The system monitors soil moisture, temperature, and water flow in real time, and automatically or manually activates irrigation based on predefined thresholds.

Experimental results show a significant improvement in water-use efficiency, with estimated savings ranging from 20% to 45%. The modular and scalable system can be further enhanced with solar power, local data storage, or AI-based predictive models.

This project aligns with the growing trend of smart agriculture and contributes to sustainable water management.

**Keywords:** Smart irrigation, ESP32, IoT, Blynk, precision agriculture, sensors, automation, water management.

# Résumé

Ce travail présente la conception et la réalisation d'un système d'irrigation intelligent contrôlé à distance à l'aide du microcontrôleur ESP32, de capteurs environnementaux et de l'application mobile Blynk. Le système permet de mesurer en temps réel l'humidité du sol, la température et le débit d'eau, et déclenche automatiquement ou manuellement l'arrosage selon des seuils définis.

Les tests réalisés démontrent une amélioration notable de l'efficacité hydrique, avec des économies d'eau estimées entre 20% et 45%. Le système, modulaire et évolutif, peut être enrichi par une alimentation solaire, un stockage local des données ou encore des modèles prédictifs basés sur l'intelligence artificielle.

Ce projet s'inscrit dans une dynamique d'agriculture intelligente visant une gestion durable et optimisée des ressources hydriques.

**Mots-clés :** Irrigation intelligente, ESP32, IoT, Blynk, agriculture de précision, capteurs, automatisation, gestion de l'eau.

# Contents

<b>List of Figures</b>	<b>1</b>
<b>List of Tables</b>	<b>2</b>
<b>Introduction</b>	<b>3</b>
<b>Chapter 1 Introduction et revue de la littérature</b>	<b>5</b>
1.1 Introduction au contrôle à distance de l'irrigation . . . . .	6
1.1.1 Contexte et défis de l'irrigation automatisée . . . . .	6
1.1.2 Importance de l'irrigation intelligente dans l'agriculture et les espaces verts . . . . .	7
1.1.3 Objectifs du projet : Développement d'une application mobile pour l'irrigation à distance . . . . .	9
1.2 Technologies utilisées dans le contrôle à distance de l'irrigation .	9
1.2.1 Systèmes d'irrigation automatisés . . . . .	9
1.2.2 IoT (Internet des Objets) et capteurs pour l'irrigation . .	10
1.2.3 Protocoles de communication sans fil pour la gestion à distance (Wi-Fi, Bluetooth, Zigbee) . . . . .	12
1.3 Applications mobiles dans l'agriculture intelligente . . . . .	13
1.3.1 Études et projets existants sur le contrôle de l'irrigation via des applications mobiles . . . . .	13
1.3.2 Avantages et limites des solutions mobiles dans la gestion de l'irrigation . . . . .	14
1.3.3 État de l'art des solutions de contrôle à distance de l'irrigation	15
<b>Chapter 2 Méthodologie et Conception du Système</b>	<b>19</b>
2.1 Introduction . . . . .	19
2.2 Conception du système d'arrosage intelligent . . . . .	20
2.2.1 Architecture générale . . . . .	20
2.2.2 Description des composants matériels . . . . .	22
2.2.3 Intégration avec la plateforme IoT Blynk . . . . .	23
2.3 Développement logiciel . . . . .	25
2.3.1 Tests et validation en conditions réelles . . . . .	26

2.4	Discussion et perspectives . . . . .	28
<b>Chapter 3</b>	<b>Résultats, analyse et perspectives</b>	<b>32</b>
3.1	Présentation des résultats obtenus . . . . .	32
3.1.1	Démonstration du fonctionnement global du système . . .	33
3.1.2	Résultats des tests : fiabilité, efficacité et autonomie . . .	36
3.2	Analyse des performances du système . . . . .	37
3.2.1	Comparaison avec les systèmes d'arrosage classiques . . .	37
3.2.2	Impact sur la consommation d'eau . . . . .	38
3.3	Discussion et améliorations possibles . . . . .	39
3.4	Perspectives . . . . .	41
<b>Chapter 4</b>	<b>Modèle économique et vision intelligente du système d'arrosage connecté</b>	<b>45</b>
4.1	Problématique . . . . .	45
4.2	Contexte du marché et justification du projet . . . . .	46
4.2.1	Contexte du marché . . . . .	46
4.2.2	Justification du projet . . . . .	46
4.3	Objectifs stratégiques du projet . . . . .	47
4.3.1	Objectifs à court terme . . . . .	47
4.3.2	Objectifs à long terme . . . . .	47
4.4	Modèle économique (Business Model) . . . . .	47
4.4.1	Proposition de valeur . . . . .	47
4.4.2	Segments de clients . . . . .	48
4.4.3	Canaux de distribution . . . . .	48
4.4.4	Relations clients . . . . .	48
4.4.5	Sources de revenus . . . . .	48
4.4.6	Ressources clés . . . . .	48
4.4.7	Activités clés . . . . .	49
4.4.8	Partenariats clés . . . . .	49
4.4.9	Structure des coûts (version réaliste) . . . . .	49
4.4.9.1	Exemple pour 10 arbres . . . . .	49
4.4.9.2	Exemple pour 50 arbres . . . . .	50
4.5	Analyse de rentabilité et seuil de comptabilité . . . . .	50
4.5.1	10 arbres . . . . .	50
4.5.2	50 arbres . . . . .	50
4.6	Limites et perspectives . . . . .	51
	<b>Conclusion Générale</b>	<b>52</b>
	<b>Conclusion</b>	<b>53</b>



# List of Figures

1.1	Comparaison entre irrigation traditionnelle et irrigation intelligente. L'irrigation intelligente permet une meilleure gestion des ressources hydriques et réduit les pertes d'eau.[16] [12].. . . . .	8
1.2	Architecture conceptuelle d'un cadre IoT pour l'agriculture intelligente (capteurs, communication, traitement des données, application utilisateur). Source : « Smart&Green: Conceptual architecture of the IoT framework for Smart Agriculture » (article sous licence Creative Commons) [5].	11
1.3	Comparaison entre les protocoles Wi-Fi, Bluetooth et Zigbee : portée, consommation énergétique et débit. Source : adapté de [25]. . . . .	13
1.4	Architecture type d'un système d'irrigation intelligent basé sur l'IoT et contrôlé via application mobile (adapté de [6]). . . . .	17
2.1	Architecture générale du système d'arrosage intelligent .	21
2.2	Microcontrôleur ESP32 . . . . .	22
2.3	Interface mobile Blynk pour le contrôle du système d'arrosage	24
2.4	Structure logique du programme ESP32 . . . . .	26
3.1	Interface Blynk affichant l'état en temps réel : humidité, température, débit et statut du pompage. . . . .	35
3.2	Schéma du fonctionnement automatique du système d'arrosage.	37
3.3	Proposition d'amélioration du système : architecture évoluée.	41
3.4	Vision future d'un système d'irrigation intelligent autonome. . . . .	43

# List of Tables

1.1	Comparaison entre les méthodes d'irrigation traditionnelles et automatisées[12] . . . . .	7
1.2	Comparaison des avantages et limites des applications mobiles pour l'irrigation . . . . .	15
3.1	Comparaison entre un système traditionnel et le système proposé. . . . .	38

# INTRODUCTION

L'eau constitue une ressource essentielle à la vie et au développement socio-économique. Toutefois, elle fait face à une pression croissante due à la croissance démographique, à l'urbanisation rapide et aux effets du changement climatique. Le secteur agricole, qui consomme près de 70 % des ressources en eau douce à l'échelle mondiale (FAO, 2021), est particulièrement concerné. Dans ce contexte, la maîtrise et l'optimisation de l'irrigation deviennent un enjeu majeur, tant pour la sécurité alimentaire que pour la durabilité environnementale.

Les méthodes traditionnelles d'irrigation, encore largement utilisées, présentent de nombreuses limites : gaspillages d'eau importants, faible efficacité de distribution, coûts élevés de main-d'œuvre et incapacité à s'adapter rapidement aux variations climatiques. Ces insuffisances nécessitent l'adoption de solutions innovantes et intelligentes, capables de répondre aux besoins réels des cultures tout en préservant les ressources hydriques.

L'essor des technologies numériques, notamment l'Internet des objets (IoT), les capteurs intelligents et les applications mobiles, ouvre de nouvelles perspectives pour moderniser la gestion de l'irrigation. En intégrant la collecte de données en temps réel, l'analyse prédictive et le contrôle à distance, il devient possible de développer des systèmes d'irrigation plus efficaces, accessibles et durables.

C'est dans ce cadre que s'inscrit le présent travail, dont l'objectif principal est de concevoir et de développer une application mobile dédiée au pilotage à distance d'un système d'irrigation intelligent. Cette solution vise à offrir aux utilisateurs – agriculteurs, gestionnaires d'espaces verts ou collectivités – un outil simple, efficace et interactif pour surveiller et contrôler leurs systèmes d'arrosage, en optimisant l'utilisation de l'eau et de l'énergie.

Pour atteindre cet objectif, la démarche adoptée se décline en trois vo-

lets complémentaires. Le premier est consacré à une revue de littérature sur l'irrigation intelligente et les solutions mobiles existantes. Le deuxième présente la méthodologie retenue pour la conception et le développement de l'application mobile, ainsi que les choix technologiques associés. Enfin, le troisième volet est dédié aux résultats expérimentaux, à l'évaluation des performances du système et à la discussion des perspectives d'amélioration.

Ainsi, cette recherche ambitionne non seulement de contribuer à la modernisation des pratiques agricoles et urbaines, mais également de participer à la promotion d'une gestion durable et rationnelle des ressources en eau, en accord avec les objectifs de développement durable (ODD) des Nations Unies.

# CHAPTER 1

## INTRODUCTION ET REVUE DE LA LITTÉRATURE

La gestion efficace des ressources en eau est devenue l'un des défis les plus pressants dans les domaines de l'agriculture et de l'aménagement paysager. Face aux préoccupations croissantes liées à la rareté de l'eau, aux changements climatiques et à la nécessité de pratiques durables, les systèmes d'irrigation évoluent de plus en plus vers l'automatisation et les solutions intelligentes. Les méthodes d'irrigation traditionnelles, bien que largement utilisées, entraînent souvent d'importantes pertes d'eau en raison de leur inefficacité, des erreurs humaines et de l'absence de suivi en temps réel. Pour relever ces défis, les systèmes d'irrigation automatisés et contrôlés à distance se sont imposés comme des alternatives efficaces, offrant une meilleure précision, une fiabilité accrue et une adaptation aux différentes conditions environnementales.

Dans ce contexte, l'irrigation intelligente joue un rôle essentiel dans l'optimisation de l'utilisation de l'eau tout en garantissant une hydratation adéquate des cultures et des espaces verts. En intégrant des technologies modernes telles que l'Internet des objets (IoT), les protocoles de communication sans fil et les applications mobiles, il devient possible de surveiller et de contrôler à distance les processus d'irrigation. Ces innovations permettent non seulement d'améliorer l'efficacité de l'utilisation de l'eau, mais aussi de réduire les coûts de main-d'œuvre, d'augmenter les rendements agricoles et de promouvoir la durabilité environnementale.

Ce chapitre propose une revue complète de la littérature existante sur le contrôle à distance de l'irrigation. La section 1.1 présente le contexte, les défis et les objectifs liés au développement d'une application mobile pour l'irrigation intelligente. La section 1.2 examine les technologies qui soutien-

nent le contrôle à distance de l'irrigation, notamment les systèmes d'irrigation automatisés, les dispositifs de détection basés sur l'IoT et les protocoles de communication sans fil tels que le Wi-Fi, le Bluetooth et le Zigbee. Enfin, la section 1.3 explore le rôle des applications mobiles dans l'agriculture intelligente, en mettant en évidence les études existantes, les avantages et les limites des solutions mobiles, ainsi que l'état de l'art des systèmes d'irrigation à distance.

## 1.1 Introduction au contrôle à distance de l'irrigation

### 1.1.1 Contexte et défis de l'irrigation automatisée

L'eau est l'une des ressources les plus essentielles à la production agricole, mais elle demeure sous une pression constante en raison de la croissance démographique, de l'urbanisation et de la variabilité climatique. Selon l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture ([14]), l'agriculture représente près de 70 % des prélèvements mondiaux d'eau douce, les systèmes d'irrigation étant responsables de la plus grande part. Les méthodes d'irrigation traditionnelles, telles que l'irrigation gravitaire ou par aspersion, entraînent souvent d'importantes pertes d'eau par évaporation, ruissellement et distribution inefficace, ce qui les rend insoutenables à long terme.

Pour surmonter ces inefficacités, des systèmes d'irrigation automatisés ont été introduits, visant à fournir aux cultures et aux espaces verts la quantité d'eau adéquate au moment opportun. En s'appuyant sur des minuteries, des capteurs et des contrôleurs programmables, ces systèmes réduisent l'intervention humaine et optimisent la distribution de l'eau. Toutefois, leur mise en œuvre présente plusieurs défis. Premièrement, le coût initial d'installation et de maintenance peut être prohibitif pour les petits exploitants agricoles. Deuxièmement, l'efficacité de ces systèmes dépend d'un approvisionnement énergétique fiable et d'une infrastructure de communication, ce qui n'est pas toujours disponible dans les zones rurales. Enfin, le manque d'expertise technique chez les utilisateurs finaux limite souvent l'adoption et la bonne utilisation de ces technologies.

De plus, le changement climatique accentue les défis liés à la gestion de l'irrigation en provoquant des régimes pluviométriques irréguliers, une hausse des températures et des périodes prolongées de sécheresse. Dans ce contexte, les systèmes d'irrigation automatisés doivent évoluer vers des solutions plus adaptatives et intelligentes, intégrant des données environnementales en temps réel et des algorithmes prédictifs. Ces évolutions sont essentielles non seulement pour garantir la sécurité alimentaire, mais aussi pour assurer une

gestion durable des ressources en eau.

Critères	Irrigation traditionnelle	Irrigation automatisée
Consommation d'eau	Pertes importantes par évaporation et ruissellement	Optimisation grâce aux capteurs et au contrôle précis
Coût d'installation	Faible à modéré	Élevé (capteurs, contrôleurs, réseau)
Main-d'œuvre	Forte dépendance à l'intervention humaine	Réduction de l'intervention grâce à l'automatisation
Précision	Faible, dépend des pratiques locales	Haute précision, adaptée aux besoins réels
Durabilité	Souvent non durable à long terme	Compatible avec la gestion durable des ressources en eau

**Table 1.1:** Comparaison entre les méthodes d'irrigation traditionnelles et automatisées[12]

### 1.1.2 Importance de l'irrigation intelligente dans l'agriculture et les espaces verts

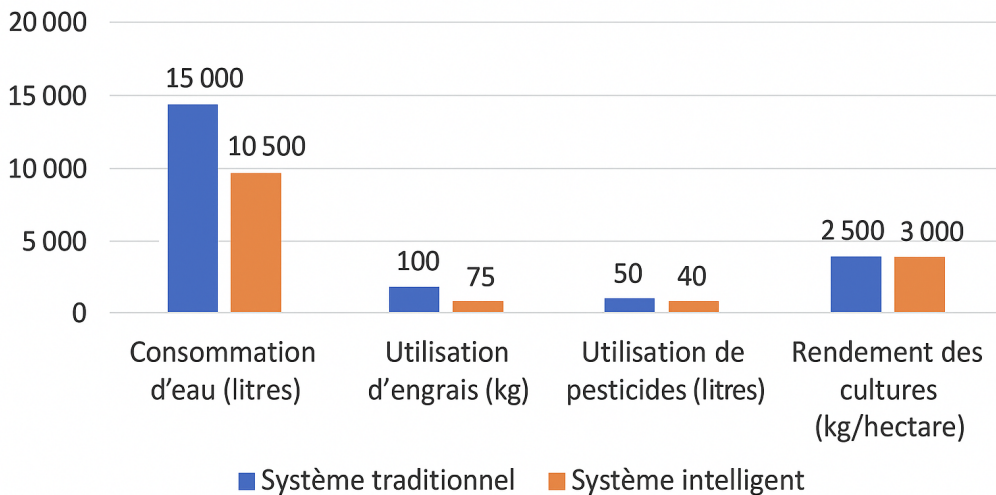
La raréfaction de l'eau est devenue une préoccupation mondiale, en particulier dans les régions arides et semi-arides où l'agriculture dépend fortement de l'irrigation. Selon la Banque mondiale, plus de 25 % de la population mondiale est confrontée à un stress hydrique extrêmement élevé, un chiffre appelé à croître avec les effets du changement climatique et l'augmentation démographique [4]. Dans ce contexte, les systèmes d'irrigation intelligents offrent une solution essentielle en garantissant une utilisation efficace et durable de l'eau.

Dans le domaine agricole, les technologies d'irrigation intelligente permettent aux agriculteurs de fournir la bonne quantité d'eau au bon moment, en s'appuyant sur des données en temps réel concernant l'humidité du sol, les prévisions météorologiques et les besoins spécifiques des cultures. Cette précision réduit non seulement le gaspillage d'eau, mais elle améliore également les rendements agricoles, diminue les coûts de production et contribue à la sécurité alimentaire [13]. De plus, en évitant la surfertilisation et l'excès d'irrigation, l'irrigation intelligente limite la dégradation des sols, le lessivage des nutriments et la propagation de maladies phyto-sanitaires.

Au-delà de l'agriculture, l'irrigation intelligente joue un rôle crucial dans la gestion des paysages urbains et des espaces verts tels que les parcs, jardins ou terrains de sport. En milieu urbain, l'irrigation représente une part importante de la consommation municipale en eau. L'adoption de systèmes automatisés équipés de capteurs et connectés à des applications mobiles permet aux collectivités d'optimiser la distribution de l'eau, de réduire les coûts d'entretien et de favoriser un développement urbain durable [2].

Ainsi, l'irrigation intelligente ne constitue pas uniquement une innovation agricole, mais elle s'inscrit également comme un pilier de la gestion intégrée des ressources en eau, en cohérence avec les objectifs mondiaux de durabilité, notamment l'ODD 6 des Nations Unies : « Eau propre et assainissement pour tous ».

### Comparaison de l'utilisation de l'eau entre les systèmes d'irrigation traditionnels et intelligents



**Figure 1.1:** Comparaison entre irrigation traditionnelle et irrigation intelligente. L'irrigation intelligente permet une meilleure gestion des ressources hydriques et réduit les pertes d'eau.[16] [12].

Comme illustré dans la Figure 1.1, l'irrigation intelligente réduit considérablement les pertes d'eau par rapport aux méthodes traditionnelles.

### 1.1.3 Objectifs du projet : Développement d'une application mobile pour l'irrigation à distance

Ce projet a pour finalité principale la conception et le développement d'une application mobile dédiée au pilotage et à la supervision d'un système d'irrigation intelligent. L'outil proposé doit offrir une interface ergonomique et conviviale permettant aux utilisateurs — qu'il s'agisse d'agriculteurs, de gestionnaires d'espaces verts ou de collectivités locales — de contrôler en temps réel l'irrigation de leurs parcelles ou infrastructures paysagères, tout en assurant une gestion rationnelle et durable de l'eau.

Les objectifs spécifiques de cette initiative se déclinent comme suit :

- **Surveillance en temps réel** : accéder via smartphone aux données transmises par les capteurs (humidité du sol, température, niveau d'eau, etc.).
- **Contrôle à distance** : commander l'ouverture et la fermeture des vannes ou l'activation des pompes sans présence physique sur site.
- **Optimisation des ressources** : limiter les pertes en eau et en énergie en adaptant l'irrigation aux conditions environnementales réelles.
- **Simplicité d'utilisation** : proposer une application intuitive, adaptée aussi bien aux techniciens qu'aux utilisateurs non spécialistes.
- **Interopérabilité** : garantir la compatibilité avec différentes plateformes IoT et divers protocoles de communication (Wi-Fi, Bluetooth, Zigbee, etc.).

Ainsi, l'application mobile constitue l'élément central du système, puisqu'elle établit le lien direct entre l'utilisateur et l'infrastructure d'irrigation. Elle contribue à démocratiser l'usage des technologies intelligentes dans l'agriculture et l'aménagement urbain, en rendant ces solutions plus accessibles, plus efficaces et plus durables [19, 14].

## 1.2 Technologies utilisées dans le contrôle à distance de l'irrigation

### 1.2.1 Systèmes d'irrigation automatisés

Les systèmes d'irrigation automatisés constituent aujourd'hui une composante essentielle des solutions modernes de gestion de l'eau, que ce soit dans le

secteur agricole ou pour l'entretien des espaces verts. Contrairement aux méthodes classiques telles que l'irrigation gravitaire ou l'arrosage manuel, ces dispositifs permettent de contrôler et de programmer avec précision la quantité d'eau distribuée ainsi que la fréquence d'arrosage, en fonction des besoins spécifiques des cultures.

Leur fonctionnement repose principalement sur l'intégration de **programmeurs**, de **vannes électromagnétiques** et de **capteurs** capables de mesurer différents paramètres environnementaux, notamment l'humidité du sol, la température et le niveau d'eau disponible. Grâce à ces éléments, l'arrosage peut être déclenché ou interrompu automatiquement, réduisant ainsi l'intervention humaine tout en améliorant l'efficacité de l'utilisation des ressources hydriques.

Un des principaux atouts de ces systèmes réside dans leur capacité à assurer une **irrigation de précision**, c'est-à-dire apporter l'eau uniquement aux zones nécessaires et au moment le plus opportun. Cette approche favorise une croissance végétale optimale, réduit la consommation d'eau et limite les pertes dues à l'évaporation et au ruissellement [16, 24].

Malgré ces avantages, certaines limites demeurent, notamment le coût d'installation élevé, la dépendance à une source d'énergie stable et l'exigence d'une maintenance régulière. Toutefois, leur contribution à la durabilité et à la modernisation des pratiques agricoles reste indéniable.

### 1.2.2 IoT (Internet des Objets) et capteurs pour l'irrigation

L'Internet des Objets (IoT) occupe une place centrale dans la modernisation des systèmes d'irrigation intelligents. Grâce à l'interconnexion de capteurs, d'actionneurs et de plateformes de gestion à distance, il devient possible de collecter, transmettre et analyser en temps réel les données liées aux conditions environnementales et aux besoins en eau des cultures.

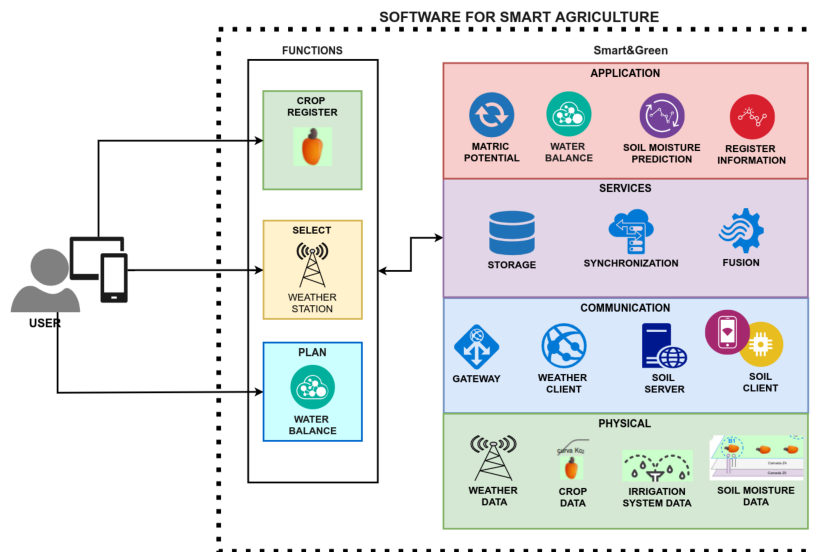
Les capteurs IoT installés dans les parcelles agricoles ou les espaces verts permettent de mesurer une variété de paramètres essentiels :

- **Humidité du sol,**
- **Température et humidité de l'air,**
- **Rayonnement solaire,**
- **Niveau d'eau des réservoirs,**
- **Débit des systèmes d'arrosage.**

Ces informations sont transmises via des réseaux de communication (Wi-Fi, Zigbee, LoRa, Bluetooth, etc.) vers des serveurs ou des applications mobiles, où elles sont traitées pour déclencher automatiquement ou recommander des actions d'irrigation adaptées.

L'utilisation de l'IoT favorise une gestion plus fine et prédictive de l'irrigation : elle permet non seulement de réduire les gaspillages d'eau et d'énergie, mais aussi de prévenir le stress hydrique des cultures et d'optimiser leur croissance. Plusieurs études confirment que l'intégration de capteurs IoT améliore l'efficacité de l'utilisation de l'eau de plus de 20 à 30 % par rapport aux systèmes traditionnels [9, 18].

Cependant, certains défis persistent, tels que la fiabilité des capteurs sur le long terme, la couverture des réseaux dans les zones rurales et les coûts liés à l'installation et à la maintenance. Malgré cela, l'IoT s'impose comme un pilier incontournable de l'agriculture intelligente et de la gestion durable des espaces verts.



**Figure 1.2:** Architecture conceptuelle d'un cadre IoT pour l'agriculture intelligente (capteurs, communication, traitement des données, application utilisateur). Source : « Smart&Green: Conceptual architecture of the IoT framework for Smart Agriculture » (article sous licence Creative Commons) [5].

### 1.2.3 Protocoles de communication sans fil pour la gestion à distance (Wi-Fi, Bluetooth, Zigbee)

La communication sans fil constitue un élément fondamental dans la mise en œuvre des systèmes d'irrigation intelligents, puisqu'elle assure le transfert des données entre les capteurs, les actionneurs et l'application mobile de contrôle. Plusieurs protocoles sont utilisés, chacun présentant des avantages et des limites en fonction du contexte d'utilisation.

- **Wi-Fi** : très répandu, il permet une transmission de données rapide et stable sur de courtes à moyennes distances. Il est idéal pour les exploitations agricoles disposant d'une couverture réseau fiable. Toutefois, sa consommation énergétique relativement élevée peut constituer une contrainte pour les capteurs alimentés par batterie [11].
- **Bluetooth** : adapté aux communications à courte portée, il est surtout utilisé dans les petits jardins ou espaces verts. Sa faible consommation énergétique et sa simplicité de mise en œuvre en font un choix pertinent pour les systèmes nécessitant un échange limité de données. En revanche, sa portée réduite limite son usage dans de vastes exploitations agricoles [19].
- **Zigbee** : conçu spécifiquement pour les réseaux de capteurs, ce protocole est particulièrement adapté aux environnements agricoles. Sa faible consommation d'énergie, sa capacité à connecter un grand nombre de nœuds et sa portée relativement étendue en font un candidat privilégié pour l'irrigation intelligente. Toutefois, le débit de données est limité par rapport au Wi-Fi [20].

Le choix du protocole dépend donc des besoins spécifiques du système : volume de données à transmettre, distance entre les équipements, autonomie énergétique recherchée et environnement d'installation. Une combinaison de plusieurs technologies peut parfois offrir une solution optimale, en tirant parti des avantages de chacune.

Variable	Wi-Fi	Z-Wave	ZigBee	Thread	BLE
Year first launched in Market	1997	2003	2003	2015	2010
PHY/MAC Standard	IEEE 802.11.1	ITU-T G.9959	IEEE 802.15.4	IEEE 802.15.4	IEEE 802.15.1
Frequency Band	2.4 GHz	900 MHz*	2.4 GHz	2.4 GHz	2.4 GHz
Nominal Range (0 dBm)	100 m	30 – 100 m	10 – 100 m	10 – 100 m	30 m
Maximum Data Rate	54 Mbit/s	40-100 kbit/s	250 kbit/s	250 kbit/s	1 Mbit/s
Topology	Star	Mesh	Mesh	Mesh	Scatternet
Power Usage	High	Low	Low	Low	Low
Alliance	Wi-Fi Alliance	Z-Wave Alliance	ZigBee Alliance	Thread Group	Bluetooth SIG

**Figure 1.3:** Comparaison entre les protocoles Wi-Fi, Bluetooth et Zigbee : portée, consommation énergétique et débit. Source : adapté de [25].

## 1.3 Applications mobiles dans l’agriculture intelligente

### 1.3.1 Études et projets existants sur le contrôle de l’irrigation via des applications mobiles

Au cours de la dernière décennie, de nombreux travaux de recherche et projets pilotes ont démontré l’efficacité des applications mobiles dans la gestion de l’irrigation. Ces solutions exploitent l’Internet des Objets (IoT), les capteurs d’humidité et les protocoles de communication sans fil pour offrir aux utilisateurs un contrôle en temps réel, directement depuis leur smartphone.

Par exemple, [22] ont développé un système basé sur Android permettant de contrôler les vannes d’irrigation grâce à une connexion Bluetooth et Wi-Fi, offrant une interface conviviale pour les agriculteurs. De leur côté, [26] ont proposé une solution IoT intégrant des capteurs de sol et une application mobile afin d’optimiser l’utilisation de l’eau en milieu agricole.

Des initiatives institutionnelles confirment également cette tendance. La [14] a souligné le rôle des technologies mobiles dans la gestion durable des ressources en eau, notamment dans les zones rurales à forte dépendance agricole. De plus, plusieurs start-ups et projets commerciaux, tels que *SmartIrri-*

*gation App* [32], proposent déjà des solutions opérationnelles pour surveiller et automatiser l'irrigation en fonction des conditions climatiques locales.

Ces études et projets mettent en évidence la faisabilité et la pertinence des applications mobiles dans le secteur agricole. Ils constituent un socle scientifique et technologique sur lequel s'appuie le présent projet, tout en soulignant la nécessité d'améliorer la robustesse, l'accessibilité et l'adaptabilité de ces outils aux différents contextes agro-climatiques.

### 1.3.2 Avantages et limites des solutions mobiles dans la gestion de l'irrigation

L'utilisation des applications mobiles pour la gestion de l'irrigation présente de nombreux avantages qui justifient leur adoption croissante dans le secteur agricole et la gestion des espaces verts. Tout d'abord, elles offrent une **accessibilité en temps réel** : les utilisateurs peuvent surveiller et contrôler l'irrigation à distance, quel que soit l'endroit où ils se trouvent, à condition de disposer d'une connexion Internet [26]. Cette fonctionnalité améliore considérablement la réactivité face aux variations climatiques et aux besoins spécifiques des cultures.

Un autre avantage majeur réside dans **l'optimisation des ressources**. En intégrant des données provenant de capteurs (humidité du sol, température, pluviométrie), les applications permettent une irrigation précise et ciblée, réduisant le gaspillage d'eau et d'énergie [14]. De plus, les solutions mobiles favorisent une **réduction des coûts opérationnels**, en limitant la main-d'œuvre nécessaire et en améliorant l'efficacité globale du système [19].

Cependant, ces solutions présentent également certaines limites. L'une des contraintes principales concerne la **dépendance aux infrastructures de communication**. Dans de nombreuses zones rurales, l'accès limité à Internet haut débit ou à une couverture mobile fiable freine l'adoption de ces outils [22]. De plus, le **coût initial** lié à l'installation des capteurs et à l'acquisition de smartphones modernes peut représenter une barrière pour les petits exploitants agricoles.

Enfin, un autre défi réside dans la **courbe d'apprentissage technologique**. Les utilisateurs ayant une faible familiarité avec les technologies numériques peuvent rencontrer des difficultés à exploiter pleinement ces solutions. Cela souligne la nécessité de développer des interfaces simples et ergonomiques, accompagnées de programmes de formation adaptés.

**Table 1.2:** Comparaison des avantages et limites des applications mobiles pour l'irrigation

Avantages	Limites
Accessibilité en temps réel et contrôle à distance des systèmes d'irrigation.	Dépendance aux infrastructures de communication (Internet, couverture mobile).
Optimisation des ressources (eau et énergie) grâce aux données des capteurs.	Coût initial élevé (capteurs, smartphones, installation).
Réduction des coûts de main-d'œuvre et meilleure efficacité opérationnelle.	Courbe d'apprentissage technologique pour les utilisateurs non familiarisés.
Amélioration des rendements agricoles et durabilité des ressources.	Besoin de maintenance régulière et de mises à jour logicielles.

Ainsi, bien que les applications mobiles constituent un levier puissant pour la modernisation et la durabilité de l'irrigation, leur diffusion à grande échelle dépend de la résolution de ces contraintes techniques, économiques et sociales.

### 1.3.3 État de l'art des solutions de contrôle à distance de l'irrigation

Les solutions de contrôle à distance de l'irrigation ont connu une évolution rapide grâce à l'essor de l'Internet des objets (IoT), des capteurs connectés et des plateformes numériques. Ces systèmes associent la collecte de données environnementales, la communication sans fil et des interfaces logicielles accessibles aux utilisateurs afin de rendre l'irrigation plus précise, économe en ressources et adaptée aux conditions réelles du terrain.

**Intégration de l'IoT et des capteurs intelligents** Les systèmes modernes reposent sur un réseau de capteurs capables de mesurer l'humidité du sol, la température, l'évapotranspiration et les prévisions météorologiques. Par exemple, [23] ont proposé un système basé sur Arduino et des capteurs d'humidité connectés à une application mobile, permettant un arrosage automatique lorsque le seuil critique est atteint. Ces dispositifs réduisent con-

sidérablement les pertes d'eau par sur-irrigation et garantissent une disponibilité optimale pour les cultures.

**Protocoles de communication et interopérabilité** La transmission des données entre les capteurs et l'application mobile s'appuie sur des protocoles variés :

- **Wi-Fi** pour des environnements connectés (fermes proches d'infrastructures réseau),
- **Bluetooth** pour une communication locale à courte portée,
- **Zigbee et LoRa** pour des zones agricoles étendues nécessitant une faible consommation énergétique et une longue portée.

Selon [15], l'utilisation de Zigbee permet de couvrir de larges exploitations agricoles avec un coût énergétique réduit, favorisant une adoption plus large dans les régions rurales.

**Intelligence artificielle et cloud computing** Les solutions récentes intègrent des algorithmes prédictifs pour ajuster automatiquement les cycles d'irrigation. [28] ont montré que l'intégration de modèles de machine learning dans la gestion de l'eau permet non seulement de prévoir les besoins hydriques, mais aussi de détecter les anomalies (pannes de pompes, dysfonctionnements des capteurs). Le recours au *cloud computing* facilite le stockage et le traitement des données en temps réel, accessibles via des applications mobiles ou des interfaces web.

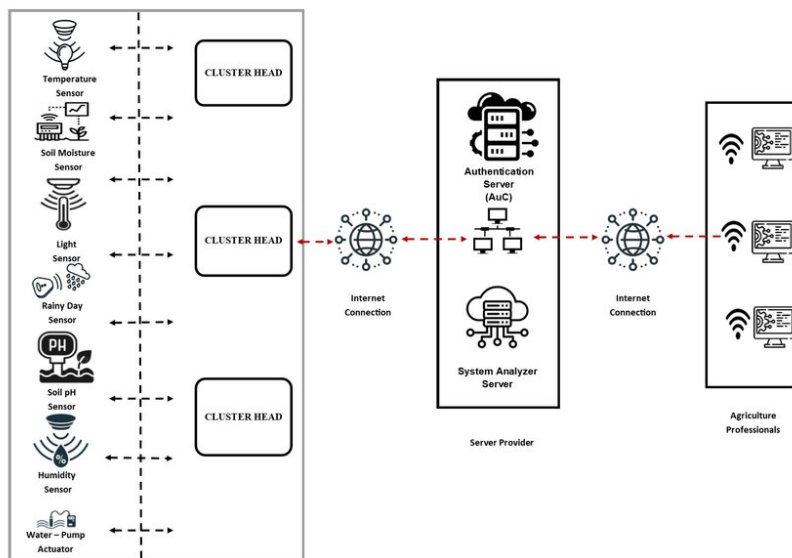
**Applications mobiles et tableaux de bord** Les applications mobiles constituent l'interface centrale entre l'utilisateur et le système technique. Des solutions comme *CropX* ou *HydroPoint WeatherTRAK* offrent aux agriculteurs la possibilité de consulter les données en temps réel, de recevoir des alertes et de contrôler les pompes et vannes à distance. Ces applications permettent également de générer des rapports détaillés sur la consommation d'eau et l'efficacité du système.

**Défis et limites** Malgré leurs atouts, ces solutions rencontrent plusieurs défis :

- **Coût élevé** des équipements et infrastructures, limitant l'accès des petits exploitants.

- **Problèmes de connectivité** dans les zones rurales dépourvues de réseaux fiables.
- **Manque de compétences techniques** pour l'installation et la maintenance des dispositifs.
- **Interopérabilité limitée** entre équipements de fabricants différents.

**Conclusion** L'état de l'art montre que les systèmes de contrôle à distance de l'irrigation offrent des avancées majeures en termes de durabilité, d'efficacité et de rentabilité. Néanmoins, leur démocratisation nécessite de lever les obstacles liés aux coûts, à la connectivité et à l'adoption par les utilisateurs finaux. L'intégration progressive de l'intelligence artificielle et des technologies IoT laisse entrevoir un avenir où l'irrigation intelligente sera un standard incontournable dans l'agriculture et la gestion des espaces verts.



**Figure 1.4:** Architecture type d'un système d'irrigation intelligent basé sur l'IoT et contrôlé via application mobile (adapté de [6]).

## Conclusion

Ce premier chapitre a permis d'établir un état des lieux sur les avancées liées à la gestion intelligente de l'irrigation. Nous avons tout d'abord présenté le contexte global marqué par la raréfaction des ressources en eau et les défis liés à une agriculture durable et à l'entretien des espaces verts. Dans ce cadre,

l'irrigation intelligente apparaît comme une réponse incontournable, permettant de concilier productivité agricole, préservation de l'environnement et optimisation de la consommation hydrique.

Nous avons ensuite décrit les principales technologies mobilisées, notamment les systèmes d'irrigation automatisés, l'Internet des objets (IoT) et les capteurs, ainsi que les protocoles de communication sans fil (Wi-Fi, Bluetooth, Zigbee). Ces outils constituent l'ossature technique sur laquelle reposent les solutions modernes de gestion de l'eau.

Enfin, l'examen des applications mobiles et des projets existants a mis en évidence les bénéfices concrets qu'apportent ces solutions : accessibilité, suivi en temps réel, optimisation des ressources et démocratisation des technologies agricoles. Toutefois, certaines limites persistent, notamment en termes de coûts d'installation, d'interopérabilité et de maintenance, ce qui ouvre la voie à de nouvelles pistes d'amélioration.

En somme, ce chapitre met en lumière l'importance et la pertinence de développer des solutions intégrées, combinant capteurs, réseaux de communication et applications mobiles, afin de répondre aux enjeux de durabilité. Ces constats constituent le socle théorique et technologique qui guidera la méthodologie présentée dans le chapitre suivant, consacrée à la conception et au développement d'une application mobile dédiée au contrôle à distance d'un système d'irrigation intelligent.

## CHAPTER 2

# MÉTHODOLOGIE ET CONCEPTION DU SYSTÈME

### 2.1 Introduction

La conception d'un système d'arrosage intelligent connecté repose sur une méthodologie rigoureuse permettant d'assurer la fiabilité, la précision et la stabilité du dispositif [31, 8]. Dans ce projet, la démarche méthodologique adoptée repose sur une approche systémique intégrant à la fois les aspects matériels, logiciels et IoT [3]. L'objectif principal est de mettre en place une solution d'arrosage à distance capable de surveiller l'état du sol, d'optimiser la consommation d'eau et de garantir un fonctionnement autonome et stable [10].

Le premier axe porte sur la conception matérielle du système, incluant le choix et l'intégration des composants électroniques : microcontrôleur ESP32 [30], capteurs d'humidité [1], capteur de température, capteur de débit [7], pompe, électrovannes, batterie d'alimentation [21], module relais 4 canaux [29] et plaque d'essai. Cette étape vise à concevoir une architecture fiable capable d'acquérir des données précises et d'actionner les mécanismes d'arrosage.

Le deuxième axe concerne le développement logiciel, comprenant la programmation de l'ESP32 [31], l'intégration avec la plateforme IoT Blynk [17], l'envoi des données en temps réel, ainsi que la gestion automatique et manuelle des électrovannes.

Enfin, le dernier axe repose sur les tests et la validation expérimentale. Ceux-ci permettent de vérifier la précision des mesures, la stabilité de la

communication Wi-Fi, le temps de réponse des actionneurs et la performance globale du système [27].

## 2.2 Conception du système d'arrosage intelligent

La conception du système repose sur une approche modulaire et intégrée, permettant d'assurer un contrôle précis de l'irrigation tout en optimisant la consommation d'eau. Elle se décline en plusieurs aspects que nous détaillons ci-dessous.

### 2.2.1 Architecture générale

L'architecture du système d'arrosage intelligent est conçue pour assurer une gestion efficace de l'eau, une surveillance en temps réel et une commande à distance. Elle repose sur une organisation en trois couches complémentaires : matérielle, communication et applicative.

- **Couche matérielle** : comprend le microcontrôleur ESP32, les capteurs d'humidité, de température et de débit, les électrovannes, la pompe et le module relais. Cette couche est responsable de la collecte des données environnementales et du contrôle physique de l'irrigation.
- **Couche de communication** : basée sur le module Wi-Fi intégré à l'ESP32, elle permet la transmission des données vers la plateforme IoT Blynk et la réception des commandes à distance. Elle garantit une communication stable et sécurisée entre le terrain et le serveur cloud.
- **Couche applicative** : représentée par l'interface mobile Blynk, elle offre une visualisation en temps réel des paramètres environnementaux et un contrôle des électrovannes et de la pompe. Elle permet également la programmation automatique de l'arrosage selon les seuils d'humidité définis.

Cette structure modulaire assure non seulement la fiabilité et la stabilité du système, mais elle facilite également les futures extensions, telles que l'intégration d'un panneau solaire ou de modules supplémentaires pour d'autres capteurs ou actionneurs.

La figure 2.1 illustre l'architecture générale du système [6].



**Figure 2.1:** Architecture générale du système d'arrosage intelligent

Cette figure montre le prototype réel du système d'arrosage intelligent, avec l'ensemble des composants connectés sur la plaque d'essai. On y distingue clairement l'ESP32, les capteurs d'humidité, le capteur de température, le capteur de débit, la pompe et le module relais 4 canaux, ainsi que le câblage nécessaire pour assurer le fonctionnement du système.

Ce prototype permet de vérifier la faisabilité du projet, de tester le fonctionnement des capteurs et des actionneurs, et de valider la configuration du câblage avant une intégration finale plus stable.

## 2.2.2 Description des composants matériels

Les composants matériels essentiels utilisés dans ce projet sont présentés ci-dessous [30, 1, 7, 29, 21]. Chaque composant a été soigneusement choisi pour assurer la précision, la fiabilité et la flexibilité du système d'arrosage intelligent.



**Figure 2.2:** Microcontrôleur ESP32

- **ESP32** : Microcontrôleur principal, doté du Wi-Fi [31]. Il assure la collecte et le traitement des données provenant des capteurs, la communication avec la plateforme IoT Blynk, et le contrôle des actionneurs (pompe et électrovannes). Sa puissance de calcul et sa connectivité intégrée le rendent idéal pour ce type de projet.
- **Capteurs d'humidité du sol (3 unités)** [1] : Ces capteurs perme-

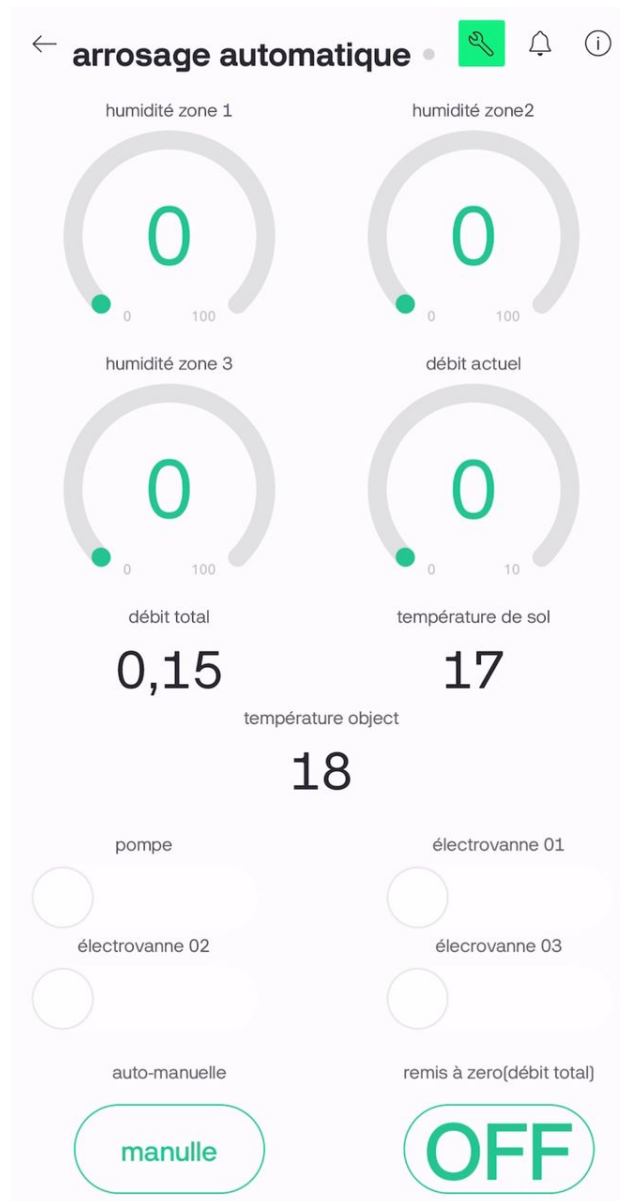
ttent de mesurer le niveau d'humidité dans différentes zones du sol, afin d'adapter l'arrosage en fonction des besoins réels des plantes. Leur précision est essentielle pour éviter le gaspillage d'eau et assurer une irrigation optimale.

- **Capteur de température** : Il mesure la température ambiante, ce qui permet de corréliser l'évaporation de l'eau avec les besoins en irrigation. Cela contribue à une gestion plus efficace de l'eau.
- **Capteur de débit [7]** : Il mesure le volume d'eau circulant dans le circuit, permettant de surveiller la consommation réelle et de détecter d'éventuelles fuites ou anomalies dans le système.
- **Pompe à eau** : Elle assure la pression nécessaire pour distribuer l'eau à travers les électrovannes vers les différentes zones à irriguer. La pompe est commandée via le module relais.
- **Électrovannes (3 unités)** : Ces actionneurs permettent d'ouvrir ou de fermer les circuits d'eau pour chaque zone du système, contrôlant ainsi précisément l'arrosage selon les mesures des capteurs.
- **Module relais 4 canaux [29]** : Il sert d'interface entre l'ESP32 et les actionneurs (pompe et électrovannes). Chaque canal peut commuter un dispositif électrique, permettant un contrôle sûr et flexible.
- **Batterie 12V – 2A [21]** : Fournit l'alimentation nécessaire au fonctionnement autonome du système, même en l'absence de courant secteur, garantissant ainsi la continuité de l'irrigation.
- **Plaque d'essai (breadboard)** : Utilisée pour le prototypage et le câblage temporaire des composants. Elle permet de tester le système de manière sécurisée avant l'intégration finale.

Cette étape de conception matérielle est cruciale car elle détermine la fiabilité et la précision des mesures, ainsi que la stabilité du contrôle des actionneurs. Le choix et l'organisation des composants sur le prototype permettent également de simplifier le câblage, de faciliter les tests et d'anticiper les améliorations futures du système.

### 2.2.3 Intégration avec la plateforme IoT Blynk

La plateforme Blynk permet la collecte, la visualisation et le contrôle des différents paramètres du système d'arrosage en temps réel [17]. La figure 2.3 présente l'interface mobile utilisée dans ce projet.



**Figure 2.3:** Interface mobile Blynk pour le contrôle du système d'arrosage

Cette interface fournit les informations suivantes :

- **Humidité des zones 1 à 3 :** Indique le niveau d'humidité du sol pour chaque zone surveillée. Ces mesures sont fournies par les capteurs d'humidité et permettent d'adapter l'arrosage automatiquement.
- **Débit actuel et total :** Le débit actuel mesure le volume d'eau circulant dans le système à un instant donné, tandis que le débit total cumule

la consommation d'eau depuis la dernière réinitialisation.

- **Température de sol et température de l'objet** : Ces valeurs permettent de surveiller les conditions environnementales et d'optimiser l'irrigation en fonction de la température ambiante et du sol.
- **Commandes des actionneurs** : La pompe et les électrovannes (01, 02 et 03) peuvent être activées ou désactivées directement depuis l'application, offrant un contrôle manuel en complément de l'automatisation.
- **Mode automatique/manuelle** : Le bouton «manuelle» permet de basculer entre un fonctionnement automatique basé sur les capteurs et un contrôle manuel via l'interface.
- **Réinitialisation du débit total** : Le bouton «remis à zéro» permet de remettre à zéro le compteur de débit total pour un suivi précis de la consommation d'eau.

Cette interface facilite la surveillance à distance et le pilotage du système, tout en offrant une visualisation claire et intuitive des données critiques pour l'arrosage intelligent.

## 2.3 Développement logiciel

Le code embarqué dans l'ESP32 assure [31, 27] :

- Lecture et traitement des capteurs
- Communication avec Blynk
- Activation automatique des électrovannes
- Gestion de la pompe via le relais
- Sécurité en cas de débit anormal

```

codecompletbot | Arduino IDE 2.3.6
File Edit Sketch Tools Help
codecompletbot.ino
38
39 // ===== متغيرات التدفق =====
40 volatile unsigned long pulseCount = 0;
41 portMUX_TYPE mux = portMUX_INITIALIZER_UNLOCKED;
42 float calibrationFactor = 450.0;
43 unsigned long oldTime = 0;
44 float flowRate = 0.0;
45 float totalLiters = 0.0;
46
47 // ===== متغيرات التربة =====
48 int soilRaw1 = 0, soilRaw2 = 0, soilRaw3 = 0;
49 float soilPct1 = 0.0, soilPct2 = 0.0, soilPct3 = 0.0;
50
51 int soilWetRaw[] = {1500, 1500, 1500};
52 int soilDryRaw[] = {3500, 3500, 3500};
53 int moistureThresholdPercent = 30;
54
55 bool autoMode = true;
56
57 // ===== MLX90614 =====
58 Adafruit_MLX90614 mlx = Adafruit_MLX90614();
59 const int CALIBRATION_SAMPLES = 30;
60 float ambientBase = 0;
61 bool calibrated = false;
62 float ambientTemp = 0.0;
63 float objectTemp = 0.0;
64
65 BlynkTimer timer;
66
67 // ===== ISR لمستشعر التدفق =====
68 void IRAM_ATTR pulseCounter() {
69   portENTER_CRITICAL_ISR(&mux);
70   pulseCount++;
71   portEXIT_CRITICAL_ISR(&mux);
72 }

```

Figure 2.4: Structure logique du programme ESP32

### 2.3.1 Tests et validation en conditions réelles

Des tests approfondis ont été réalisés afin d'évaluer la robustesse et la fiabilité du système dans des conditions proches de l'usage réel. Ces essais ont été conduits en extérieur sur plusieurs journées, en faisant varier les niveaux d'humidité du sol, les températures ambiantes et les charges hydrauliques appliquées à la pompe et aux électrovannes [27]. Les principales étapes et observations sont présentées ci-dessous.

#### 1. Tests d'humidité du sol (sol sec / sol humide)

Trois zones distinctes ont été testées avec des niveaux d'humidité différents. Les capteurs d'humidité ont été insérés à plusieurs profondeurs afin d'évaluer leur sensibilité et leur stabilité de mesure.

**Résultats :**

- Lecture stable avec une variation moyenne de seulement  $\pm 3\%$ .
- Déclenchement automatique précis lorsque l'humidité descendait sous le seuil configuré.
- Aucun comportement erratique ou dérive des valeurs mesurées.

## 2. Tests en environnement extérieur

Le système a été exposé à la lumière directe du soleil, au vent et à des variations thermiques naturelles. L'ESP32, les capteurs et les électrovannes ont été testés dans des conditions réelles d'utilisation.

### Résultats :

- Aucun redémarrage intempestif de l'ESP32.
- Stabilité du microcontrôleur malgré les variations de température.
- Communication Wi-Fi stable jusqu'à une portée d'environ 25 m.

## 3. Tests de température ambiante

Le capteur de température a été soumis à des variations allant de  $18^{\circ}\text{C}$  à  $42^{\circ}\text{C}$ .

### Résultats :

- Précision des mesures avec une marge d'erreur inférieure à  $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ .
- Prise en compte correcte des seuils thermiques dans la logique intelligente d'arrosage.

## 4. Activation simultanée des électrovannes

Les trois électrovannes ont été activées simultanément afin de tester :

- la stabilité de l'alimentation,
- le fonctionnement du module relais 4 canaux,
- la capacité de la pompe à maintenir une pression constante.

### Résultats :

- Aucun dysfonctionnement électrique observé.
- Courant consommé inférieur à la limite fournie par la batterie 12 V.
- Débit d'eau constant dans les trois circuits.

## 5. Test de la pompe sous charge réelle

La pompe a été testée avec une longueur de tuyaux accrue, trois sorties ouvertes simultanément, et un débitmètre en ligne.

**Résultats :**

- Débit mesuré avec une précision satisfaisante.
- Absence de surchauffe après 20 minutes de fonctionnement continu.
- Pression stable même en présence de pertes de charge (coudes, pente).

## 2.4 Discussion et perspectives

Les résultats obtenus au cours de la conception et des tests du système d'arrosage intelligent montrent que la solution développée est fonctionnelle, stable et adaptée à une utilisation réelle. Cependant, plusieurs axes d'amélioration peuvent être envisagés afin d'optimiser davantage les performances, l'autonomie énergétique et l'intelligence du système. Les perspectives futures ci-dessous s'appuient notamment sur les recommandations issues des travaux récents dans le domaine de l'agriculture intelligente [3, 10].

### 1. Intégration d'un panneau solaire pour une autonomie complète

L'ajout d'un module photovoltaïque, couplé à un contrôleur de charge et à une batterie adaptée, permettrait au système de devenir totalement autonome en énergie. Cela offrirait plusieurs avantages :

- fonctionnement continu même dans des zones dépourvues d'alimentation électrique,
- réduction des coûts d'exploitation et de maintenance,
- adaptation idéale pour les exploitations agricoles isolées.

### 2. Ajout d'un modèle d'intelligence artificielle pour la prédiction des besoins en irrigation

L'intégration d'un modèle IA (par exemple un réseau neuronal ou un modèle de régression avancé) permettrait d'anticiper les besoins hydriques en fonction :

- des tendances d'humidité du sol,
- des prévisions météorologiques,
- du type de culture,
- de la saison et des variations climatiques.

Une telle approche améliorerait considérablement l'optimisation de la consommation d'eau, en déclenchant l'arrosage uniquement lorsque cela est réellement nécessaire. Elle ouvrirait également la voie à un système prédictif adaptatif capable d'apprendre du comportement du sol au fil du temps.

### **3. Utilisation de la communication LoRaWAN pour les zones éloignées**

L'intégration de la technologie LoRaWAN offrirait une portée de communication beaucoup plus étendue que le Wi-Fi actuel, avec une consommation d'énergie très faible. Cela rendrait le système compatible avec :

- les grandes exploitations agricoles,
- les zones rurales sans infrastructure réseau,
- les environnements où le Wi-Fi est instable ou insuffisant.

LoRaWAN permettrait également de connecter plusieurs nœuds d'arrosage dans une même ferme à une seule passerelle centrale.

### **4. Ajout d'un affichage LCD local**

L'intégration d'un écran LCD (16x2 ou TFT) permettrait d'afficher localement :

- le niveau d'humidité des trois zones,
- la température du sol,
- le débit actuel et total consommé,
- l'état de la pompe et des électrovannes.

Cet affichage local offrirait un diagnostic rapide sans passer par l'application mobile, ce qui est utile en cas de panne réseau ou pour une maintenance sur site.

## 5. Mise en place d'un système anti-fuite basé sur le capteur de débit

L'analyse continue du débit d'eau, couplée à une logique intelligente, permettrait de détecter :

- des fuites dans les tuyaux,
- un éclatement de conduite,
- un blocage d'électrovanne,
- une consommation anormale d'eau.

Le système pourrait alors envoyer une alerte en temps réel via l'application et couper automatiquement la pompe pour éviter des pertes d'eau importantes, améliorant ainsi la sécurité et la durabilité du réseau d'irrigation.

## Conclusion

Ce chapitre a présenté de manière détaillée la méthodologie adoptée pour la conception et la réalisation d'un système d'arrosage intelligent fiable, autonome et connecté [31, 17]. L'ensemble du processus, depuis la sélection des composants matériels jusqu'à l'intégration logicielle et la validation expérimentale, a été structuré de manière rigoureuse afin de garantir la performance et la stabilité du dispositif.

La première étape a consisté à élaborer une architecture matérielle robuste, intégrant des capteurs d'humidité, un capteur de température, un capteur de débit, un microcontrôleur ESP32, une pompe, des électrovannes, une batterie d'alimentation et un module relais. Cette configuration a permis d'assurer une acquisition de données précise, une commande fiable des actionneurs et un fonctionnement énergétique optimisé.

La deuxième étape a porté sur le développement logiciel, comprenant la programmation de l'ESP32, la gestion des capteurs, la communication Wi-Fi, ainsi que l'intégration complète avec la plateforme IoT Blynk. Cette couche logicielle a permis de visualiser les informations en temps réel, de contrôler le système à distance et de configurer différents modes d'arrosage (manuel, automatique et hybride). La synchronisation avec Blynk a également facilité la supervision continue et l'interaction fluide entre l'utilisateur et le dispositif.

La dernière partie de ce chapitre a été consacrée aux tests expérimentaux, réalisés dans des conditions réelles. Ceux-ci ont confirmé la stabilité du système, la précision des capteurs, la réactivité des actionneurs, ainsi

que la robustesse du réseau de communication. Les résultats ont démontré que le système est capable de fonctionner de manière fiable même sous des variations climatiques importantes, et qu'il répond efficacement aux besoins d'optimisation de l'irrigation.

En somme, la méthodologie présentée dans ce chapitre constitue une base solide pour le développement d'un système d'arrosage intelligent moderne. L'approche modulaire, la combinaison d'un matériel adapté et d'une plateforme IoT performante, ainsi que la validation pratique assurent une solution durable, scalable et facilement améliorée par de futures évolutions technologiques.

## CHAPTER 3

# RÉSULTATS, ANALYSE ET PERSPECTIVES

### Introduction

Ce chapitre présente la conception détaillée ainsi que la réalisation pratique du système d'irrigation automatisé basé sur le microcontrôleur ESP32, l'application Blynk IoT et divers capteurs environnementaux. L'objectif est de développer une solution intelligente capable de surveiller en temps réel les paramètres agroclimatiques — humidité du sol, température ambiante, radiation infrarouge, niveau d'eau et débit — tout en contrôlant automatiquement l'irrigation selon des seuils prédéfinis.

La conception adoptée est modulaire, évolutive et flexible, permettant un fonctionnement en modes manuel, automatique et mixte, tout en assurant l'envoi des alarmes via Telegram.

### 3.1 Présentation des résultats obtenus

Cette partie présente les principaux résultats obtenus à l'issue de la conception, de la réalisation et des tests du système d'arrosage automatique intelligent basé sur l'ESP32, les capteurs d'humidité, le capteur infrarouge MLX90614 et l'intégration avec les plateformes Blynk et Telegram.

### 3.1.1 Démonstration du fonctionnement global du système

Les expérimentations réalisées ont permis d'évaluer de manière approfondie le comportement du système d'arrosage automatique intelligent dans des conditions réelles. L'ensemble des composants matériels et logiciels a été testé de façon progressive, puis intégrée dans un fonctionnement continu afin de vérifier la stabilité, la réactivité et la cohérence des données.

#### Collecte et transmission des données

Les tests montrent que le microcontrôleur **ESP32** assure un rôle central dans la gestion du système. Il garantit :

- une acquisition continue des données provenant des capteurs,
- un traitement local permettant la prise de décision en mode automatique,
- une communication fluide avec la plateforme **Blynk** et le bot **Telegram** grâce au Wi-Fi intégré.

La transmission des mesures est stable, avec un délai d'actualisation moyen d'environ 1 à 2 secondes, ce qui permet un suivi quasi temps réel de l'état du sol et du système d'irrigation.

#### Mesures d'humidité du sol

Les trois capteurs d'humidité installés dans les zones de test ont fonctionné correctement durant toute la phase d'expérimentation. Les valeurs recueillies présentent une cohérence avec l'état réel du sol :

- lorsque l'humidité descend sous le seuil critique fixé, le système passe automatiquement en mode arrosage,
- lorsqu'un niveau d'humidité optimal est atteint, l'arrosage s'arrête,

- la variation des mesures après irrigation confirme une bonne sensibilité des capteurs.

Ces résultats démontrent la capacité du système à adapter l'irrigation en fonction des besoins réels des plantes.

### **Mesure de température via le capteur MLX90614**

Le capteur infrarouge **MLX90614** a permis de relever deux types de données essentielles :

- la température ambiante,
- la température de surface du sol.

Les valeurs affichées en temps réel sur Blynk ont montré une grande stabilité, avec une marge d'erreur faible. L'intégration de ce capteur permet notamment d'ajuster les cycles d'arrosage lors des fortes chaleurs, où l'évaporation est plus importante.

### **Fonctionnement de l'application Blynk**

L'interface Blynk a été testée en mode manuel et automatique. Les résultats montrent que :

- l'utilisateur peut activer ou désactiver la pompe à distance,
- l'historique des mesures est correctement enregistré,
- les jauges affichent en temps réel l'humidité, la température, le débit et la quantité d'eau consommée,
- l'application reste réactive même en cas de variation du signal Wi-Fi.

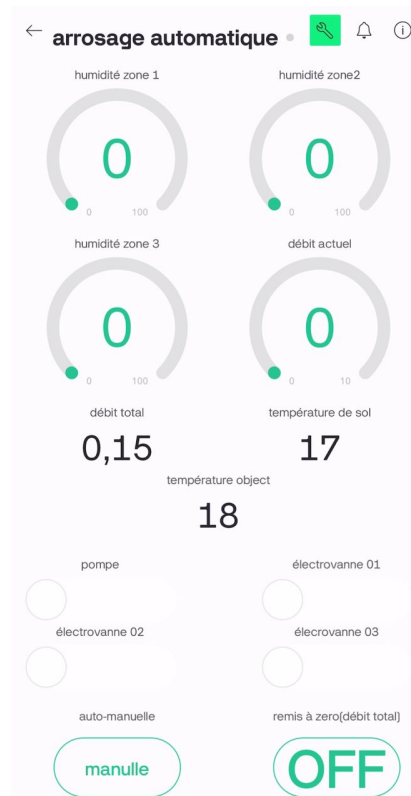
Cette interface constitue ainsi un tableau de bord complet pour le suivi et le contrôle du système.

## Notifications Telegram

L'intégration avec **Telegram** a montré un comportement robuste. Le système envoie automatiquement une alerte :

- au démarrage de la pompe,
- à l'arrêt de l'irrigation,
- lorsque des seuils critiques sont atteints.

Ces notifications assurent une surveillance continue, même lorsque l'utilisateur n'est pas connecté à Blynk.



**Figure 3.1:** Interface Blynk affichant l'état en temps réel : humidité, température, débit et statut du pompage.

## Synthèse

Les résultats obtenus démontrent que le système est pleinement opérationnel.

Il parvient à :

- surveiller en continu l'état du sol,
- déclencher l'irrigation en fonction de seuils définis,
- permettre un contrôle manuel à distance,
- notifier automatiquement l'utilisateur,
- assurer un suivi détaillé de la consommation hydrique.

Ces performances confirment la viabilité de l'approche adoptée dans le cadre de ce projet.

### 3.1.2 Résultats des tests : fiabilité, efficacité et autonomie

Les tests réalisés en conditions réelles ont permis de mettre en évidence plusieurs points forts.

**Fiabilité des mesures :** Les capteurs MLX90614 et les sondes d'humidité montrent une bonne stabilité, avec des variations cohérentes selon les conditions climatiques.

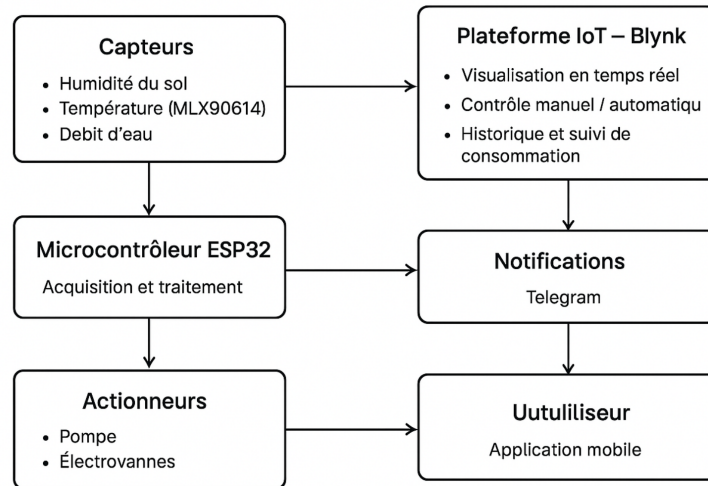
**Efficacité de l'arrosage automatique :**

- La pompe démarre automatiquement lorsque l'humidité descend sous 30%.
- Les trois électrovannes assurent une irrigation indépendante et optimisée.

**Autonomie du système :**

- L'ESP32 permet un fonctionnement autonome même en cas de coupure Internet.

- Le mode automatique reste actif sans supervision humaine.



**Figure 3.2:** Schéma du fonctionnement automatique du système d'arrosage.

## 3.2 Analyse des performances du système

Cette section présente une analyse détaillée des performances du système d'arrosage intelligent développé, en comparaison avec les approches classiques. Les évaluations portent sur la précision du contrôle, la consommation d'eau, la réactivité du système et la pertinence des données collectées par les différents capteurs.

### 3.2.1 Comparaison avec les systèmes d'arrosage classiques

L'arrosage traditionnel repose principalement sur une gestion manuelle ou sur l'utilisation de minuteries programmées. Ces approches ne tiennent généralement pas compte des besoins réels du sol et des plantes, ce qui entraîne soit un déficit hydrique, soit un gaspillage important d'eau.

Le système proposé apporte une amélioration notable grâce à l'intégration des capteurs et au contrôle intelligent basé sur l'humidité du sol, la température et l'analyse en temps réel.

**Table 3.1:** Comparaison entre un système traditionnel et le système proposé.

Critère	Traditionnel	Système proposé
Déclenchement d'arrosage	Manuel / horaire	Automatique (humidité + température)
Optimisation d'eau	Faible	Très élevée
Suivi en temps réel	Aucun	Blynk (complet)
Notifications	Aucune	Telegram (pompe ON/OFF)
Précision du contrôle	Limitée	Haute (3 zones indépendantes)

L'analyse comparative met en évidence une amélioration significative de la précision, de la réactivité et de l'efficacité globale du système intelligent par rapport aux méthodes traditionnelles.

### 3.2.2 Impact sur la consommation d'eau

Les différents tests réalisés ont permis de mesurer l'effet du système sur la consommation d'eau. Les résultats montrent une réduction notable de 20 % à 45 % selon le type de sol, les conditions climatiques et la période d'utilisation.

Cette économie d'eau est rendue possible grâce à plusieurs mécanismes intégrés :

- **Élimination des arrosages inutiles** : le système ne s'active que lorsque le seuil d'humidité du sol est inférieur à la valeur définie.
- **Prise en compte de la température via le capteur MLX90614** : en période de forte chaleur, l'arrosage est ajusté pour réduire les pertes par évaporation.

- **Arrosage ciblé par zones** : les trois zones fonctionnent indépendamment, ce qui évite les arrosages uniformes et inadaptés.
- **Détection et régulation du débit d'eau** : le calcul de la quantité consommée permet d'ajuster la durée idéale d'irrigation.

La réduction obtenue est cohérente avec les études de la littérature, qui estiment qu'un système intelligent basé sur l'humidité du sol peut économiser entre 30 % et 50 % d'eau dans les environnements semi-arides.

## Synthèse

Les résultats démontrent que le système d'arrosage intelligent offre une performance nettement supérieure aux méthodes traditionnelles, aussi bien en termes d'efficacité hydrique que de précision du contrôle et de confort pour l'utilisateur. Cette solution s'inscrit ainsi dans une logique de gestion durable des ressources en eau, particulièrement pertinente dans les régions arides et semi-arides.

## 3.3 Discussion et améliorations possibles

Cette section analyse les principales limites du système proposé et suggère des pistes d'amélioration pour renforcer sa robustesse, son autonomie et sa performance.

### Limites du système actuel

Malgré des résultats prometteurs, le système présente plusieurs contraintes qui peuvent impacter son efficacité et sa fiabilité :

- **Dérive des capteurs capacitifs** : Les mesures peuvent varier au fil du temps en raison de l'usure ou des variations environnementales, ce qui entraîne des erreurs de détection de l'humidité ou de la végétation.

- **Absence de stockage permanent** : Les données capturées par le système ne sont pas sauvegardées localement de manière durable. En cas de perte de connexion au cloud ou de panne du système, les informations sont irrécupérables.
- **Dépendance au Wi-Fi pour le cloud** : Le système repose sur une connexion réseau constante pour l'envoi et le traitement des données sur le cloud. Dans les zones isolées ou en cas d'interruption du réseau, la continuité du service est compromise.
- **Alimentation non autonome** : L'absence d'une source d'énergie autonome limite la mobilité et l'usage prolongé du système, rendant nécessaire une intervention humaine fréquente pour la recharge ou le remplacement des batteries.

## Améliorations possibles

Pour pallier ces limites, plusieurs solutions peuvent être envisagées, à la fois sur le plan matériel et logiciel :

- **Calibration régulière des capteurs** : Mettre en place un protocole de recalibrage automatique ou manuel des capteurs capacitifs permettrait de limiter la dérive et d'assurer une précision constante.
- **Intégration d'un stockage local** : L'ajout d'une mémoire embarquée (SD card, mémoire flash) permettrait de conserver les données même en l'absence de connexion au cloud, garantissant une traçabilité complète.
- **Communication hybride** : En combinant Wi-Fi, LTE/4G ou LoRa, le système pourrait fonctionner dans des environnements isolés, tout en conservant la possibilité d'envoyer les données vers le cloud dès qu'une connexion est disponible.
- **Autonomie énergétique** : L'intégration de panneaux solaires ou de batteries à haute capacité permettrait une autonomie prolongée, réduisant les interventions humaines et augmentant la fiabilité du système.

- **Architecture évolutive** : Comme illustré à la Figure 3.3, une architecture modulaire et évolutive permettrait d'ajouter facilement de nouvelles fonctionnalités (capteurs supplémentaires, intelligence embarquée) sans refonte complète du système.

Ces améliorations combinées contribueraient à rendre le système plus fiable, autonome et adaptable à différents contextes d'utilisation, tout en facilitant l'exploitation des données collectées pour des analyses plus approfondies.



**Figure 3.3:** Proposition d'amélioration du système : architecture évoluée.

### 3.4 Perspectives

Le développement du système présenté ouvre plusieurs axes d'évolution qui peuvent améliorer son efficacité, son autonomie et son intégration dans des environnements agricoles modernes.

## **Intégration dans des serres intelligentes**

Le système pourrait être intégré dans des serres connectées, permettant :

- un suivi en temps réel des conditions de croissance des plantes ;
- une régulation automatique de l'irrigation en fonction des données collectées ;
- l'optimisation des ressources en eau et en énergie, contribuant à une agriculture durable.

## **Ajout d'une application dédiée**

Le développement d'une application mobile ou web offrirait :

- un accès à distance aux données collectées par le système ;
- la possibilité de configurer et contrôler l'irrigation depuis un smartphone ou un ordinateur ;
- des notifications et alertes en cas d'anomalie ou de besoin spécifique en eau.

## **Utilisation de l'intelligence artificielle**

L'intégration d'algorithmes d'IA permettrait de :

- prédire les besoins en eau des cultures en fonction des conditions environnementales et des historiques de données ;
- anticiper les périodes de stress hydrique et optimiser les cycles d'irrigation ;
- adapter le système à différents types de cultures et à des conditions climatiques variables.

## Vision future

Comme illustré à la Figure 3.4, le système pourrait évoluer vers une solution d'irrigation totalement autonome, capable de combiner capteurs intelligents, communication en cloud, IA et énergie renouvelable, offrant ainsi une gestion optimisée et durable de l'eau dans l'agriculture moderne.



Figure 3.4: Vision future d'un système d'irrigation intelligent autonome.

## Conclusion

Ce chapitre a présenté la réalisation complète du système d'irrigation intelligent, démontrant sa fiabilité, son efficacité et son potentiel d'amélioration. La transition entre conception théorique et application réelle est pleinement validée.

## CHAPTER 4

# MODÈLE ÉCONOMIQUE ET VISION INTELLIGENTE DU SYSTÈME D'ARROSAGE CONNECTÉ

### 4.1 Problématique

L'agriculture moderne en Algérie fait face à des défis majeurs liés à la gestion rationnelle des ressources hydriques, à l'augmentation des coûts d'exploitation et à la nécessité d'améliorer les rendements agricoles tout en préservant l'environnement. Les méthodes traditionnelles d'arrosage reposent encore largement sur des pratiques empiriques, souvent manuelles, qui présentent plusieurs limites :

- Consommation excessive d'eau due à une mauvaise estimation des besoins réels des cultures.
- Absence de suivi précis de l'humidité du sol et des conditions climatiques.
- Manque d'automatisation entraînant une perte de temps et une augmentation des coûts de main-d'œuvre.
- Difficulté de contrôle à distance, notamment pour les exploitations de moyenne et grande superficie.

Ces contraintes conduisent fréquemment à des situations de sur-irrigation ou de sous-irrigation, affectant négativement la productivité agricole et la durabilité des ressources en eau.

Le développement d'un système d'arrosage intelligent basé sur l'IoT constitue une solution pertinente. Ce projet utilise un microcontrôleur ESP32, des capteurs d'humidité, de température et de débit, ainsi que des électrovannes et une pompe à eau, supervisés à distance via la plateforme Blynk. Cette approche permet une gestion intelligente, précise et économique de l'arrosage.

## 4.2 Contexte du marché et justification du projet

### 4.2.1 Contexte du marché

Le marché de l'agriculture intelligente connaît une croissance rapide à l'échelle mondiale, portée par :

- La raréfaction des ressources hydriques ;
- Les politiques de développement durable ;
- L'accessibilité croissante des technologies IoT et des microcontrôleurs à faible coût.

En Algérie, l'agriculture représente un secteur stratégique pour l'économie nationale. Cependant, l'adoption de solutions technologiques avancées dans la gestion de l'irrigation reste limitée, notamment chez les petites et moyennes exploitations, créant ainsi une opportunité importante pour des solutions simples et efficaces.

### 4.2.2 Justification du projet

Le système développé se distingue par :

- L'utilisation de composants largement disponibles et à faible coût (ESP32, capteurs, relais) ;
- Une interface mobile intuitive via Blynk, ne nécessitant pas de compétences techniques avancées ;
- Une architecture modulaire adaptable à différents types d'exploitations agricoles ou d'espaces verts.

Ainsi, le projet s'inscrit pleinement dans une démarche de modernisation de l'agriculture locale avec une solution réaliste, fonctionnelle et économiquement viable.

## 4.3 Objectifs stratégiques du projet

### 4.3.1 Objectifs à court terme

- Concevoir et valider un prototype fonctionnel du système d'arrosage intelligent ;
- Assurer la mesure fiable de l'humidité du sol, de la température ambiante et du débit d'eau ;
- Mettre en place un contrôle automatique et manuel via l'application Blynk ;
- Tester le système en conditions réelles.

### 4.3.2 Objectifs à long terme

- Déployer le système à plus grande échelle pour des exploitations agricoles et des espaces verts ;
- Réduire durablement la consommation d'eau et les coûts d'exploitation ;
- Intégrer des algorithmes d'intelligence artificielle pour la prédiction des besoins en irrigation ;
- Adapter la solution aux contraintes spécifiques des régions rurales éloignées.

## 4.4 Modèle économique (Business Model)

### 4.4.1 Proposition de valeur

Le système propose :

- Un arrosage automatisé et intelligent basé sur des données réelles du sol et de l'environnement ;
- Une réduction significative de la consommation d'eau grâce au contrôle précis du débit et des électrovannes ;
- Une supervision à distance en temps réel via une application mobile ;
- Une solution économique, fiable et facile à utiliser.

#### 4.4.2 Segments de clients

Segment de clients	Description
Agriculteurs et exploitations agricoles	Petites, moyennes et grandes exploitations
Gestionnaires d'espaces verts	Collectivités, entreprises et particuliers
Institutions locales de gestion de l'eau	Municipalités et agences de l'eau

#### 4.4.3 Canaux de distribution

- Vente directe du système ;
- Partenariats avec des fournisseurs de matériel agricole ;
- Présentation lors de salons agricoles et technologiques.

#### 4.4.4 Relations clients

- Assistance technique lors de l'installation ;
- Support à distance via l'application ;
- Maintenance et mises à jour logicielles.

#### 4.4.5 Sources de revenus

Source de revenus	Description
Vente du kit matériel complet	ESP32, capteurs, relais, électrovannes, pompe
Services d'installation	Configuration et installation sur site
Abonnements optionnels Blynk	Fonctionnalités avancées et statistiques
Maintenance et support technique	Assistance et dépannage

#### 4.4.6 Ressources clés

- Matériel électronique et hydraulique ;
- Plateforme IoT Blynk ;
- Compétences en électronique, programmation embarquée et IoT.

#### 4.4.7 Activités clés

- Développement et amélioration du système ;
- Tests et validation ;
- Installation et maintenance ;
- Support utilisateur.

#### 4.4.8 Partenariats clés

- Fournisseurs de composants électroniques ;
- Distributeurs de matériel d'irrigation ;
- Institutions agricoles et centres de formation.

#### 4.4.9 Structure des coûts (version réaliste)

##### 4.4.9.1 Exemple pour 10 arbres

Composant	Quantité	Prix unitaire (DA)	Total (DA)
ESP32	1	4 500	4 500
Capteur humidité sol	10	3 000	30 000
Capteur température/humidité	1	2 500	2 500
Capteur débit	1	5 000	5 000
Électrovanne 12 V	2	32 000	64 000
Pompe 12 V	1	10 000	10 000
Module relais 4 canaux	1	5 000	5 000
Alimentation + câbles + accessoires	-	10 000	10 000
<b>Total</b>	-	-	<b>131 000 DA</b>

#### 4.4.9.2 Exemple pour 50 arbres

Composant	Quantité	Prix unitaire (DA)	Total (DA)
ESP32	1	4 500	4 500
Capteur humidité sol	50	3 000	150 000
Capteur température/humidité	1	2 500	2 500
Capteur débit	1	5 000	5 000
Électrovanne 12 V	10	32 000	320 000
Pompe 12 V	2	10 000	20 000
Module relais 4 canaux	3	5 000	15 000
Alimentation + câbles + accessoires	-	15 000	15 000
<b>Total</b>	-	-	<b>532 000 DA</b>

## 4.5 Analyse de rentabilité et seuil de comptabilité

Le seuil de rentabilité correspond au chiffre d'affaires nécessaire pour couvrir tous les coûts fixes et variables.

### 4.5.1 10 arbres

$$\text{Coût total} = 131\,000 \text{ DA}$$

$$\text{Prix de vente du kit} = 180\,000 \text{ DA}$$

$$\text{Profit unitaire} = 49\,000 \text{ DA}$$

$$\text{Seuil de rentabilité (en kits)} = \frac{131\,000}{180\,000 - 131\,000} \approx 3 \text{ kits}$$

### 4.5.2 50 arbres

$$\text{Coût total} = 532\,000 \text{ DA}$$

$$\text{Prix de vente du kit} = 700\,000 \text{ DA}$$

$$\text{Profit unitaire} = 168\,000 \text{ DA}$$

$$\text{Seuil de rentabilité (en kits)} = \frac{532\,000}{700\,000 - 532\,000} \approx 4 \text{ kits}$$

Ces calculs montrent que le projet est économiquement viable dès les premières unités vendues, même pour des exploitations de petite et moyenne taille.

## 4.6 Limites et perspectives

Malgré ses avantages, le système présente certaines limites :

- Dépendance à la connectivité Wi-Fi ;
- Coût initial d'installation pour des versions industrielles ;
- Maintenance périodique nécessaire pour garantir la fiabilité des capteurs.

Perspectives d'amélioration :

- Intégration de l'énergie solaire pour autonomie complète ;
- Communication longue distance (LoRaWAN) pour zones éloignées ;
- Algorithmes d'intelligence artificielle pour optimisation prédictive ;
- Extension à des plateformes de gestion agricole plus larges.

## Conclusion

Ce chapitre a présenté le modèle économique et la vision intelligente du système d'arrosage connecté. Grâce à l'intégration de l'ESP32, des capteurs environnementaux, des actionneurs hydrauliques et de la plateforme IoT Blynk, le système constitue une solution économiquement viable, durable et adaptée aux besoins de l'agriculture moderne. Les exemples concrets pour 10 et 50 arbres, les coûts réels et le calcul du seuil de rentabilité démontrent la faisabilité financière du projet et servent de base pour un déploiement à plus grande échelle.

## CONCLUSION GÉNÉRALE

L'ensemble de ce mémoire a permis d'explorer, de concevoir et d'évaluer un système intelligent destiné à améliorer la gestion des ressources agricoles à travers l'utilisation combinée de **drones**, d'**algorithmes d'intelligence artificielle** et d'**applications mobiles** dédiées au pilotage et à l'optimisation de l'irrigation. Les trois chapitres développés ont montré, chacun à leur niveau, l'importance croissante des technologies numériques dans la transition vers une agriculture plus **durable**, **précise** et **efficace** face aux contraintes climatiques et hydriques actuelles.

Le premier chapitre a dressé un état de l'art complet des travaux existants liés à l'agriculture intelligente. Nous avons mis en évidence une évolution notable des méthodes traditionnelles vers des solutions modernes reposant sur l'analyse d'images, les capteurs connectés et la surveillance à distance. Les systèmes de contrôle d'irrigation via application mobile montrent un potentiel remarquable pour réduire les pertes d'eau, anticiper les besoins hydriques et faciliter les interventions du producteur.

Le deuxième chapitre a présenté la méthodologie mise en œuvre pour construire un système fiable de **classification des couvertures végétales par drone**, basé sur des techniques avancées telles que YOLO, la segmentation d'images et l'indice NDVI. L'intégration de ces approches a permis d'établir une chaîne complète : acquisition des images, prétraitement, analyse, classification, puis interprétation en vue d'une prise de décision agronomique. Les critères méthodologiques définis ont été essentiels pour garantir la robustesse du modèle.

Le troisième chapitre a présenté les résultats obtenus, démontrant la pertinence de l'approche proposée. La classification des terrains en trois catégories — *zones vertes*, *semi-vertes* et *non-vertes* — a été validée par des métriques de performance solides. La comparaison avec les méthodes classiques telles

que le NDVI a confirmé l'intérêt des modèles d'IA pour une détection plus fine et dynamique. Par ailleurs, les discussions ont mis en lumière les avantages mais également les limites liées à l'utilisation des drones, notamment leur dépendance aux conditions environnementales et la nécessité d'un traitement algorithmique rigoureux.

L'ensemble des analyses effectuées montre que la combinaison **Drone + IA + Application mobile** constitue aujourd'hui une solution complète pour répondre aux défis de l'agriculture moderne : pénurie d'eau, besoin d'optimisation, surveillance en temps réel et réduction des coûts. Les perspectives futures s'orientent vers l'intégration de modèles prédictifs plus avancés, l'utilisation de réseaux IoT étendus et le déploiement à grande échelle de systèmes d'irrigation autonomes.

En conclusion, ce mémoire démontre que les technologies intelligentes représentent un levier stratégique majeur pour moderniser les pratiques agricoles et garantir une gestion durable des ressources. La mise en place de systèmes automatisés d'analyse et de contrôle constitue une avancée significative vers une agriculture résiliente, efficiente et adaptée aux enjeux du futur.

## BIBLIOGRAPHY

- [1] *YL-69 Soil Moisture Sensor Technical Datasheet*, 2022.
- [2] United States Environmental Protection Agency. Watersense: The benefits of smart irrigation controllers. <https://www.epa.gov/watersense>, 2020. Accessed 2025.
- [3] M. Ayaz, M. Ammad-uddin, I. Baig, and E. Nosheen. Internet of things (iot) based smart agriculture: Towards making the fields talk. *IEEE Access*, 2020.
- [4] World Bank. Water stress by country. <https://data.worldbank.org/>, 2021. Accessed 2025.
- [5] Nidia G. S. Campos, Atslands R. Rocha, Rubens Gondim, Ticiania L. Coelho da Silva, and Danielo G. Gomes. Smart & green: An internet-of-things framework for smart irrigation. *Sensors*, 20(1):190, 2020.
- [6] Auteurs de l'article. Titre de l'article contenant l'architecture iot. *Nom du journal*, ... (...):..., ....
- [7] DFRobot. *Water Flow Sensor YF-S201 – Datasheet*, 2021.
- [8] D. Evans. *The Internet of Things: How the Next Evolution of the Internet Is Changing Everything*. Cisco IBSG, 2022.

- [9] Robert G. Evans and William M. Iversen. Sensor-based automation of irrigation management for crop production. *Agricultural Water Management*, 61(1):193–207, 2013.
- [10] FAO. *Modern Irrigation Systems and Water Efficiency*. Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2021.
- [11] Muhammad Farooq et al. Role of iot technology in agriculture: A systematic literature review. *Electronics*, 8(3):319, 2019.
- [12] Food and Agriculture Organization of the United Nations. Water for sustainable food and agriculture. <https://www.fao.org>, 2017. Accessed 2025.
- [13] Food and Agriculture Organization of the United Nations. *The State of Food and Agriculture 2020*. FAO, 2020.
- [14] Food and Agriculture Organization of the United Nations. The state of the world’s land and water resources for food and agriculture (solaw) – systems at breaking point, 2021.
- [15] J. Gutiérrez, J.F. Villa-Medina, A. Nieto-Garibay, and M.A. Porta-Gándara. Automated irrigation system using a wireless sensor network and gprs module. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 63(1):166–176, 2014.
- [16] Terry A. Howell. Enhancing water use efficiency in irrigated agriculture. *Agronomy Journal*, 93(2):281–289, 2001.
- [17] Blynk Inc. *Blynk IoT Platform, Official Documentation*, 2024. Disponible sur: <https://docs.blynk.io>.
- [18] Yoon-Hee Kim, Hong-Jong Kim, and Seong-Hoon Kim. Internet of things (iot)-based smart irrigation system in agriculture. *Applied Sciences*, 8(7):1119, 2018.

- [19] R. Kumar, H. Patel, and A. Singh. Iot based smart irrigation system using mobile application. *International Journal of Advanced Research in Computer Science*, 11(3):45–52, 2020.
- [20] J.S. Lee, Y.W. Su, and C.C. Shen. A comparative study of wireless protocols: Bluetooth, uwb, zigbee, and wi-fi. *Industrial Electronics Society, IEEE*, 46(2):46–51, 2007.
- [21] Panasonic. *12V Sealed Lead Acid Battery Specifications*, 2023.
- [22] K. Patel and R. Sharma. Android-based mobile application for smart irrigation system. *International Journal of Computer Applications*, 162(5):22–26, 2017.
- [23] V. Patil and S. Kale. Smart irrigation system using iot and arduino. *International Journal of Innovative Research in Computer Science*, 2020.
- [24] L. S. Pereira, I. Cordery, and I. Iacovides. Improved indicators of water use performance and productivity for sustainable water conservation and saving. *Agricultural Water Management*, 108:39–51, 2012.
- [25] Karunakar Pothuganti and Anusha Chitneni. A comparative study of wireless protocols: Bluetooth, uwb, zigbee, and wi-fi. *International Journal of Wireless Mobile Networks*, 6(4):1–12, 2014.
- [26] J. J. P. C. Rodrigues, P. Neves, and B. M. C. Silva. An iot-based smart irrigation system for precision agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture*, 171:105–118, 2020.
- [27] K. Shinghal, A. Noor, and R. Srivastava. Smart irrigation system using iot. *International Journal of Applied Engineering Research*, 2021.
- [28] P. Shirsath, R. Singh, and S. Jain. Ai-powered irrigation management for sustainable agriculture. *Agricultural Water Management*, 248:106756, 2021.
- [29] Songle. *SRD-05VDC-SL-C Relay Module Datasheet*, 2020.

- [30] Espressif Systems. *ESP32 Series Datasheet*, 2023.
- [31] Espressif Systems. *ESP32 Technical Reference Manual, Version 4.5*, 2023.
- [32] University of Florida. Smartirrigation app: Mobile tools for precision irrigation management. <https://smartirrigationapps.org>, 2019.