REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE YAHIA FARES DE MEDEA



Faculté de Technologie
Département du Génie Electrique

Filière : Génie Electrique

Spécialité : Instrumentation

Mémoire de fin d'études de Master

Automatisation agricole avec des instruments connectés pour l'irrigation

Réalisé par :

Soud Abdel basset

Ghennai Oussama

Proposé par :

Dr. Menasri Wahiba

Pf. Hanini Nour Eddine

Année universitaire : 2024-2025

REMERCIEMENTS

Tout d'abord, nous remercions Allah, le tout puissant de nous avoir donné la force, le courage et la volonté de mener à bien ce modeste travail.

Nous tenons d'abord à remercier vivement Hanini Noureddine pour avoir accepté de diriger notre projet de fin d'études. Grâce à sa grande disponibilité, ses précieux conseils, ses idées et ses nombreux amendements que ce travail a aboutis à sa fin.

Nos sincères gratitudes vont vers tous ce qui ils ont participé de près ou de loin à ce travail.

Merci

Dédicace

DÉDICACE

À notre famille et À Nos amie

Nous dédie ce mémoire :

A Nos très chères mères qui a été la lumière de ma vie (Chaia & Nadia)

Et Mes pères attentionné qui m'a aidé dans mes études et veillé sur ma fatigue (Noureddine et Omar Que Dieu ait pitié de lui)
Et Nos frères : Haythem & Adem & Hadjed & Israa & Zaki & Amina & Nour elhouda &
Et Notre aimable ingénieur qui nous a aidés à réaliser ce projet Badri et Hamada Merci merci pour tout.

Et Notre encadreur Mr. Hanini Nourreddine et Menasri Wahiba Merci du fond du cœur

Et Nos amis (krimou, Hilal , Tarek , Hamza , Saleh , Akram , Zaid , Walid , zaki , Mbarek , Lahcen , Imad SKORD , Chaouki , Bourhan , Mami , Rabie , Aymen , Namala , Souhaib , Ghafour , Issam , Bilal , Imad MTH sans exception.....

Pour conclure, je le dédié à.

A Notre classe 2éme année master instrumentation.

et à tous

Ce qui Notre aimons et Notre respect

NOMENCLATURE

ملخص

تهدف المذكرة إلى تطوير نظام ذكي للري باستخدام أجهزة متصلة لترشيد استهلاك المياه في الزراعة.
تم عرض تقنيات الري الحديثة مع التركيز على استخدام مستشعرات رطوبة التربة لتحقيق ريّ دقيق وفعّال.
شمل التحليل مقارنة بين لوحات **Arduino** و **ESP32**من حيث الأداء والطاقة والتكلفة، مع دراسة بروتوكول **Lora**لنقل البيانات لمسافات طويلة.
تم تنفيذ تطبيق عملي باستخدام **Arduino UNO** و **ESP8266**لقياس رطوبة التربة والتحكم الآلي في نظام الري، مع تطوير واجهة ويب للمتابعة والتحكم.
أظهرت النتائج انخفاضًا واضحًا في استهلاك المياه، مما يبرز أهمية التقنيات الذكية في تحسين القطاع الزراعي.

الكلمات المفتاحية: Arduino Uno– ري ذكي – ESP8266 – ESP32-حساسات رطوبة التربة

Abstract

This thesis aims to develop a smart irrigation system using connected devices to optimize water usage in agriculture.
It presents modern irrigation techniques, highlighting the use of soil moisture sensors for precise and efficient watering.
A comparison was made between Arduino and ESP32 boards in terms of performance, energy consumption, and cost, along with a study of the LoRa protocol for long-distance data transmission.
A practical implementation using Arduino UNO and ESP8266 was carried out to measure soil moisture and automatically control irrigation, with a web interface for monitoring.
The results showed a significant reduction in water consumption, emphasizing the importance of smart technologies in agricultural development.

Keywords : Arduino Uno– intelligent irrigation – ESP8266 – ESP32-soil moisture sensors

Résumé

Ce mémoire vise à développer un système d'irrigation intelligent basé sur des dispositifs connectés pour optimiser l'utilisation de l'eau en agriculture.
Il présente des techniques d'irrigation modernes mettant en avant l'usage de capteurs d'humidité du sol pour un arrosage précis et efficace.
Une comparaison entre les cartes Arduino et ESP32 a été réalisée en termes de performance, de consommation d'énergie et de coût, ainsi qu'une étude du protocole LoRa pour la transmission longue distance.
Une application pratique a été implémentée avec Arduino UNO et ESP8266 pour mesurer l'humidité du sol et contrôler automatiquement l'irrigation, accompagnée d'une interface web.
Les résultats ont montré une nette réduction de la consommation d'eau, soulignant l'importance des technologies intelligentes dans le développement agricole

Mot Clé : Arduino Uno– dispositif d'irrigation intelligent – ESP8266 – ESP32-Capteurs d'humidité du sol

NOMENCLATURE

Sigle / Abréviation	Définition
IoT	Internet des objets
LoRa	Longue portée (technologie de communication sans fil à longue portée)
WiFi	Fidélité sans fil (réseau sans fil)
ESP	Expressif System Platform (famille de microcontrôleurs connectés)
ESP8266	module WiFi développé par Expressif utilisé pour les objets connectés
ESP32	Microcontrôleur plus avancé que l'ESP8266, avec WiFi intégré et Bluetooth
http	Protocole de transfert HyperText
URL	Uniform Resource Locator (adresse web)
API	Interface de programmation d'application
PWM	Impulsion avec modulation
LED	Diode électroluminescente
UNO	Modèle de carte Arduino largement utilisé dans les projets embarqués
RAM	Mémoire à accès aléatoire (RAM)
IDE	Environnement de développement intégré

LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS PHYSIQUES

Symbole / Unité	Signification	Unité
T	Température	Degré Celsius (°C)
H	Humidité relative	Pourcentage (%)
RH	Humidité relative	Pourcentage (%)
V	Tension électrique	Volt (V)
I	Intensité électrique	Ampère (A)
P	Puissance	Watt (W)
R	Résistance	Ohm (Ω)
Q	Débit d'eau	mètre cube par heure (m^3/h) ou litre par minute (L/min)
T	Temps	Seconde (s), minute (min), heure (h)
D	Distance ou profondeur (par ex. racine)	Mètre (m), centimètre (cm)
S	Surface cultivée	mètre carré (m^2) ou hectare (ha)
F	Fréquence	Hertz (Hz)
%	Taux ou pourcentage	Pourcentage (%)

Liste des Figures

Figure	Titre	Page
Figure 1	Figure I.1 : irrigation historiquement	3
Figure 2	Figure I.2: les catégories du système irrigation	4
Figure 3	Figure I.3 : Irrigation par planche	5
Figure 4	Figure I.4 : Irrigation à la rai	6
Figure 5	Figure I.5 : Irrigation par bassin	6
Figure 6	Figure I.6 : Irrigation par aspersion	7
Figure 7	Figure I.7 : Irrigation goutte à goutte	8
Figure 8	Figure I.8: Systéme d'irrigation intelligent	10
Figure 9	Figure II.1: ESP8266	18
Figure 10	Figure II.2: Capteur d'humidité du sol	18
Figure 11	Figure II.3: DHT 22 Capteur de température	19
Figure 12	Figure II.4: Électrovanne 12V 1/2	19
Figure 13	Figure II.5: Carte Arduino Uno	20
Figure 14	Figure II.6: Composant Carte Arduino	22
Figure 15	Figure II.7: Arduino IDE Surface	25
Figure 15	Figure II.8: VS Code Platforme IO	26
Figure 16	Figure III.1: Schéma de notre configuration	29
Figure 17	Figure III.2: Les composants	30
Figure 18	Figure III.3: Shéma de simulation de la carte général	31
Figure 19	Figure III.4: Shéma bloc d'entrée	32
Figure 20	Figure III.5: Schéma bloc d'entrée Structure organisationnelle	33
Figure 21	Figure III.6: Interface Arduino	34
Figure 22	Figure III.7: Les boutons Arduino Uno	35
Figure 23	Figure III.8: Interface RemoteXY	37
Figure 24	Figure III.9: Définissez les options de votre carte et la méthode de connexion	38
Figure 25	Figure III.10: My could tokens	38
Figure 26	Figure III.11 : Schéma pour connecter ESP8266 à Arduino UNO via une interface série	39

Liste des Figures

Figure 27	**Figure III.12: Connectez-vous au panneau en utilisant l'application mobile**	39
Figure 28	**Figure III.13 : Code Final D'Arduino Uno**	40-41

Liste des Tableaux

Tableaux	Titre	page
Tableau 1	Tableau I.1: comparatif des méthodes d'irrigation	8
Tableau 2	Tableau I.2: Les avantages d’irrigation automatise	15
Tableau 3	Tableau II.1: ESP32 contre Arduino	23
Tableau 4	Tableau II.2: Protocoles de communication	26
Tableau 5	Tableau II.3 : Platform Cloud	27

SOMMAIRE

SOMMAIRE

Table des matières

Introduction Générale ……..…….……..1

CHAPITRE I :Étude Préliminaire et Analyse des Besoins ……..2

I.1 Introduction 2

I.2 Définition d'irrigation : 2

I.3 Historique : 2

I.4 Techniques d'irrigation : 3

I.4.1 Techniques les plus couramment utilisées : 3

I.5 Les systèmes d'irrigation de surface (gravitaire) : 5

I.6 Comparaison des méthodes d'irrigation : 8

I.7 Système d'irrigation intelligent (automatique) : 9

I.7.1 Irrigation intelligente pilotée par ESP32 : 10

I.7.2 Des protocoles de communication : 11

I.7.2.1 Wi-Fi (ESP32 intégré) 11

I.7.2.2 MQTT (Message Queuing Telemetry Transport) 12

I.7.2.3 Lora (Long Range) 13

I.7.2.4 Zigbee: 13

I.7.2.5 Bluetooth Low Energy (BLE) 14

I.8 Les avantages d'irrigation automatise "intelligente" : 15

I.9 Conclusion : 16

CHAPITRE II : Conception et Modélisation ……..……17

II.1 Introduction 17

II.2 Conception de l'architecture du système 17

II.3 Composants principaux de l'architecture : 17

1- ESP8266 : 18

2-Capteurs environnementaux : 18

2-1-Capteur d'humidité du sol : 18

2-2-Capteur de température DHT 22 : Le DHT22,.. 19

2-3-Électrovannes : 19

2-4-Réservoir d'eau ou source d'irrigation :. 20

2-5- La carte Arduino Uno 20

II.4 Avantages et caractéristiques de l'ESP32 par rapport à l'Arduino 22

II.5 Interactions entre capteurs, actionneurs et plateforme Cloud : 23

II.6 Plateformes logicielles 25

II.7 Conclusion : 28

SOMMAIRE

CHAPITRE III : Conception et Modélisation……..…...…….29

III-1-Introduction 29

III-2-Intégration des capteurs et actionneurs 29

III-2-3- Définition sur ISIS PROTEUS : 30

III.5.1 Logiciel IDE ARDUINO : 34

III.6-1 Conception d'un système Arduino UNO + ESP8266 avec contrôle à distance via RemoteXY 36

III.6.2.1 Conception de l'interface utilisateur 37

III.6.2.2 Configuration du projet 37

III.6.2.3 Génération du token 38

III.6.2.4 Génération du code source 38

III.6.2.5 Connexion matérielle entre Arduino et ESP8266 38

III.6.2.7 Connexion via l'application RemoteXY 39

III.7 Résultat 40

III.7.1 Code finale 40

III.7.1.2 Test pratique : 42

III.8 Conclusion Générale.....46

BIBLIOGRAPHIE……..……..…….....48

Introduction générale

Introduction générale

Parmi les ressources les plus précieuses pour l'humanité, l'eau occupe une place centrale. Elle est indispensable non seulement à la survie des êtres vivants, mais aussi au bon fonctionnement de nombreux secteurs tels que l'agriculture, l'industrie et la production énergétique. En agriculture, l'irrigation joue un rôle déterminant en assurant l'apport en eau nécessaire à la croissance des cultures. Avec le temps, les techniques d'irrigation se sont perfectionnées, permettant d'optimiser les rendements agricoles tout en relevant les défis liés au changement climatique et à la gestion durable des ressources hydriques[1].

Un arrosage régulier et adapté est essentiel pour garantir la croissance optimale des plantes. Toutefois, cette tâche peut s'avérer contraignante, notamment en période de sécheresse ou pour les personnes disposant de peu de temps. C'est dans ce contexte qu'un système d'arrosage automatique intelligent prend tout son sens. Ce type de système permet une distribution autonome, efficace et ciblée de l'eau, en tenant compte des besoins spécifiques de chaque plante, tout en limitant les pertes d'eau[2].

L'objectif de ce projet est de concevoir un système d'arrosage automatique performant, répondant aux besoins des jardiniers et agriculteurs. Pour cela, nous avons opté pour l'utilisation de la carte électronique **ARDUINO UNO**, qui offre des capacités de traitement et de connectivité avancées. Le système intègrera également deux capteurs principaux : **un capteur d'humidité du sol** et **un capteur de température**, permettant d'adapter les cycles d'irrigation aux conditions environnementales réelles. Grâce à une programmation adaptée, le système pourra interrompre automatiquement l'arrosage en cas de conditions favorables (comme des précipitations), ce qui contribuera à une gestion plus économe et durable de l'eau[3].

Afin d'atteindre ces objectifs, notre étude sera structurée en trois chapitres :

- **Chapitre 1 : Étude Préliminaire et Analyse des Besoins**, qui présentera les notions de base liées à l'irrigation et définira les besoins spécifiques à satisfaire.
- **Chapitre 2 : Conception et Modulation**, qui détaillera les choix techniques retenus, la carte ARDUINO UNO, les capteurs utilisés, ainsi que la logique de fonctionnement du système.
- **Chapitre 3 : Application Pratique**, qui exposera la mise en œuvre concrète du système d'arrosage automatique, les tests effectués et les résultats obtenus[4].

Enfin, une **conclusion générale** viendra résumer les apports de ce travail et les perspectives d'amélioration possibles pour ce type de système.

CHAPITRE I

Étude Préliminaire et Analyse des Besoins

I.1 Introduction

L'agriculture moderne est en pleine transformation grâce aux innovations technologiques. Face aux défis climatiques, à la raréfaction des ressources hydriques et à la nécessité d'optimiser les rendements, l'automatisation de l'irrigation par le biais d'instruments connectés s'impose comme une solution prometteuse. Ce système permet d'adapter l'apport en eau en fonction des besoins réels des cultures, réduisant ainsi les gaspillages et améliorant la productivité.

I.2 Définition d'irrigation

L'irrigation est un approvisionnement artificiel en eau des terres cultivées et des prairies pour compenser l'insuffisance des précipitations, un drainage excessif ou une faible teneur en eau. Les eaux souterraines, en particulier dans les régions arides, ont plusieurs méthodes, y compris la pulvérisation ou manuellement L'irrigation est utilisée pour favoriser la croissance et la productivité des cultures agricoles, pour maintenir les paysages et pour revégétaliser les sols perturbés dans les régions arides[5].

I.3 Historique

Depuis l'Antiquité, l'homme a développé des méthodes d'irrigation utilisées pour augmenter sa production agricole. Les anciens Égyptiens comptaient sur les eaux de crue pour irriguer leurs cultures, comme le blé. Ils ont également développé leurs propres outils d'irrigation, comme la remontée d'eau des profondeurs. Au niveau du sol. Ils ont également construit des canaux pour transporter l'eau du Nil vers des terres agricoles éloignées. A propos de la rivière, et nous savons que les habitants de Sheba ont construit le grand barrage de Marib pour recueillir l'eau des vallées et ainsi réduire les inondations et utiliser cette eau dans l'agriculture pour augmenter la production agricole. Les Romains ont construit des canaux ouverts et des tuyaux d'argile sur de longues distances à des fins de consommation et d'agriculture, ainsi que des musulmans transportant de l'eau végétale à Jérusalem à des fins de consommation à l'aide de tuyaux d'argile. De nombreux peuples de l'Antiquité ont développé des méthodes d'irrigation jusqu'à ce jour et de nombreux chercheurs ont développé des méthodes d'irrigation jusqu'aux années 60, lorsqu'ils ont commencé à développer des systèmes d'irrigation goutte à goutte. Jusqu'à la méthode d'irrigation moderne, qui est l'irrigation par

aspersion à la fin du siècle actuel, et sa diffusion s'est accrue après la Seconde Guerre mondiale, après la disponibilité de pompes, de tuyaux et d'asperseurs efficaces à faible charge. L'eau est pulvérisée dans l'air à travers de petits trous dans des tuyaux et des tubes jusqu'à ce qu'elle tombe à la surface du sol et des plantes sous forme de brouillard de pluie.



Figure I.1 : irrigation historiquement

I.4 Techniques d'irrigation

Les techniques d'irrigation agricole sont des méthodes pour apporter de l'eau aux cultures et sont classifiées en irrigation de surface, irrigation par aspersion et micro irrigation. Décider de sélectionner une technique d'irrigation ou de passer à une technique plus efficiente est compliqué. D'un point de vue de la préservation de l'eau, le choix est simple, les économies en eaux augmentent lorsque l'on passe de l'irrigation de surface à l'aspersion et de l'aspersion à la micro irrigation. Cependant, le succès d'une technique d'irrigation sera très dépendant du site, de facteurs de situation ainsi que du niveau de gestion utilisé. La technique d'irrigation existante doit être évaluée très précisément avant de passer à une autre technique [6].

I.4.1 Techniques les plus couramment utilisées

1. **Irrigation par gravité :** C'est la méthode la plus ancienne et la plus simple, où l'eau est dirigée vers les cultures en utilisant la gravité. Les systèmes d'irrigation par inondation et par submersion en sont des exemples.
2. **Irrigation par aspersion :** L'eau est distribuée sous forme de fines gouttelettes à l'aide de tuyaux et de rampes. Ce système est efficace pour couvrir de grandes surfaces et peut être adapté à différents types de cultures.

3. **Irrigation goutte à goutte :** Cette méthode fournit de l'eau directement aux racines des plantes, goutte à goutte. Cela permet une utilisation plus efficace de l'eau, réduisant ainsi les pertes par évaporation et en s'assurant que seule la quantité nécessaire est utilisée.
4. **Irrigation par pivot central :** Principalement utilisée pour les grandes cultures, cette méthode consiste en un système de tuyaux et d'arroseurs montés sur une structure en forme de pivot central, permettant une rotation pour couvrir une grande surface.
5. **Irrigation par micro-aspersion :** Similaire à l'irrigation par aspersion, mais avec des gouttelettes plus grosses et un débit plus faible, cette méthode est souvent utilisée pour les cultures plus sensibles à l'eau.
6. **Irrigation souterraine :** L'eau est distribuée sous la surface du sol à travers un réseau de tuyaux enterrés, ce qui réduit les pertes par évaporation et permet une utilisation plus efficace de l'eau[7].

Ces techniques peuvent être combinées ou adaptées en fonction des besoins spécifiques de chaque culture et des conditions environnementales locales.

Les systèmes d'irrigation peuvent être classés en 3 catégories :

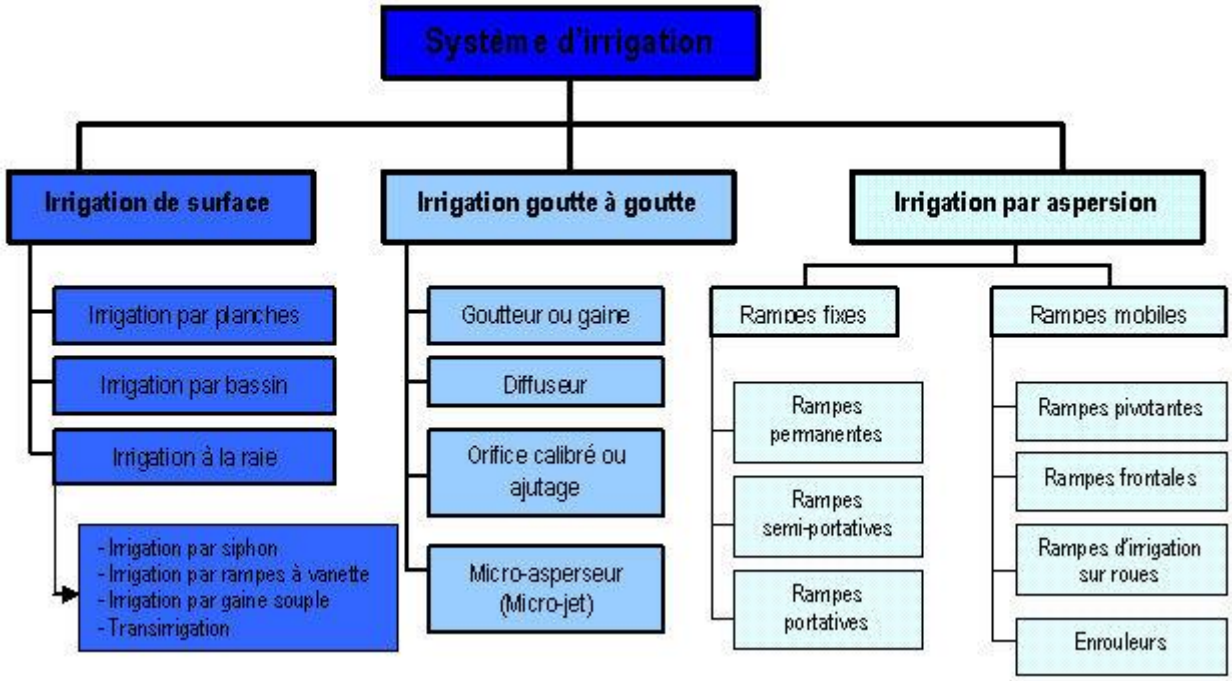


Figure I.2 : les catégories du système irrigation

I.5 Les systèmes d'irrigation de surface (gravitaire)

Les systèmes d'irrigation de surface sont classés dans l'ordre croissant de leur efficience en :

I.5.1 Irrigation par planchet

Avec la méthode d'irrigation par planches, l'eau est apportée sur des parcelles en pente et rectangulaires, avec des conditions de drainage. Les planches sont disposées dans le sens de la pente. Cette méthode est intéressante pour des sols qui ressuient lentement. Les planches sont disposées dans le sens de la plus grande pente. Cette technique est favorisée par les sols ayant une vitesse d'infiltration lente donc favorisée par les cultures comme le riz.



Figure I.3 : Irrigation par planche

I.5.2 Irrigation à la raie

Ce type d'irrigation ne recouvre qu'une faible partie de la surface (⅕ ou la moitié de la surface). L'eau est apportée par des raies placées dans des sillons (pour certaines cultures), et peut être gérée assez simplement. Cette méthode convient aux cultures plantées en ligne, comme le maïs. Elle permet de gérer les besoins en eau avec plus de flexibilité

La description correspond à l'irrigation par sillons, aussi appelée irrigation à la raie. Cette technique d'irrigation de surface consiste à faire couler l'eau dans des sillons

creusés dans le sol pour irriguer les plantes en ligne, comme le maïs. L'eau est apportée par des raies, ce qui permet de gérer l'apport d'eau avec plus de flexibilité que les autres méthodes d'irrigation de surface



Figure I.4 : Irrigation à la rai

I.5.3 Irrigation par bassins

Ce type d'irrigation consiste en la création de bassins entourés de digues qui permettent de recouvrir la parcelle. Elle est intéressante pour des sols qui filtrent peu, aux cultures denses à l'enracinement profond.



Figure I.5 : Irrigation par bassin

I.5.4 Irrigation par aspersion :

L'irrigation par aspersion est la pluie artificielle produite par la pulvérisation de l'eau qui se décharge des tuyaux sous pression. L'eau est projetée dans l'atmosphère par des

émetteurs qui peuvent être constitués de buses de vidange disposées dans un mécanisme d'arrosage qui constitue le dernier élément du système de distribution.

- La distribution de l'eau à la surface du sol doit être uniforme.
- Il ne devrait y avoir aucun dommage structurel, ni par impact des chutes ni par accumulation.
- Chaque goutte doit s'infiltrer là où elle tombe dans le sol afin qu'il n'y ait ni ruissellement ni érosion.
- Après la sortie de l'eau de la buse, le jet est affecté par les conditions climatiques (vent et évaporation).



Figure I.6 : Irrigation par aspersion

I.5.6 Micro irrigation (goutte à goutte):

La micro-irrigation est une technique d'irrigation apportant l'eau sur le sol lentement, avec une fréquence élevée, une pression de fonctionnement et des débits faibles et contrôlés (Schwab et al ., 1993). Correctement conçue, une installation de micro-irrigation permet d'augmenter les rendements et de diminuer les besoins en eau, en fertilisants et en main-d'oeuvre. La micro-irrigation comprend : les micro-asperseurs, le goutte à goutte et l'irrigation goutte à goutte enterrée[8].



Figure I.7 : Irrigation goutte à goutte

I.6 Comparaison des méthodes d'irrigation

Tableau I-1 : comparatif des méthodes d'irrigation

Méthode d'irrigation	Description	Avantages	Inconvénients	Applications typiques
Irrigation par planche	**L'eau est acheminée dans des sillons entre les planches de culture.**	**Simple, peu coûteuse, adaptée aux grandes surfaces planes.**	**Gaspillage d'eau, érosion possible, nécessite un nivellement du sol.**	**Cultures en lignes comme le maïs, coton, légumes.**
Irrigation goutte à goutte	**L'eau est délivrée lentement à la base de chaque plante via des tuyaux perforés.**	**Très économe en eau, réduit les maladies foliaires, efficace.**	**Coût initial élevé, risque de bouchage des goutteurs.**	**Arboriculture, serres, cultures maraîchères.**
Irrigation par aspersion	**L'eau est pulvérisée au-dessus des cultures à l'aide d'arroseurs.**	**Couverture uniforme, adaptable à différents types de sol.**	**Pertes par évaporation, besoin d'énergie, sensibilité au vent.**	**Céréales, pelouses, zones irrégulières.**

Irrigation souterraine	**L'eau est délivrée sous la surface du sol directement aux racines.**	**Réduction de l'évaporation, bon contrôle de l'humidité du sol.**	**Installation complexe et coûteuse, maintenance difficile.**	**Cultures permanentes, zones à pénurie d'eau.**

Chaque méthode d'irrigation présente ses propres avantages et inconvénients, et le choix dépend souvent de facteurs tels que le type de culture, le climat, la topographie du terrain et la disponibilité en eau.

I.7 Système d'irrigation intelligent (automatique)

Un système d'irrigation intelligent est un dispositif automatisé qui contrôle l'arrosage des cultures en fonction des conditions réelles du sol et de l'environnement, sans intervention humaine continue. L'objectif principal est de réaliser des économies d'eau en adaptant l'irrigation selon les mesures d'humidité du sol et les données météorologiques[9].

Ce type de système fonctionne selon une boucle de rétroaction, similaire à celle d'un thermostat : il collecte des données via des capteurs, les analyse, puis déclenche une action (comme l'ouverture d'une électrovanne) pour atteindre un équilibre optimal. Ce mécanisme permet de maintenir les besoins hydriques des plantes sans excès ni carence.

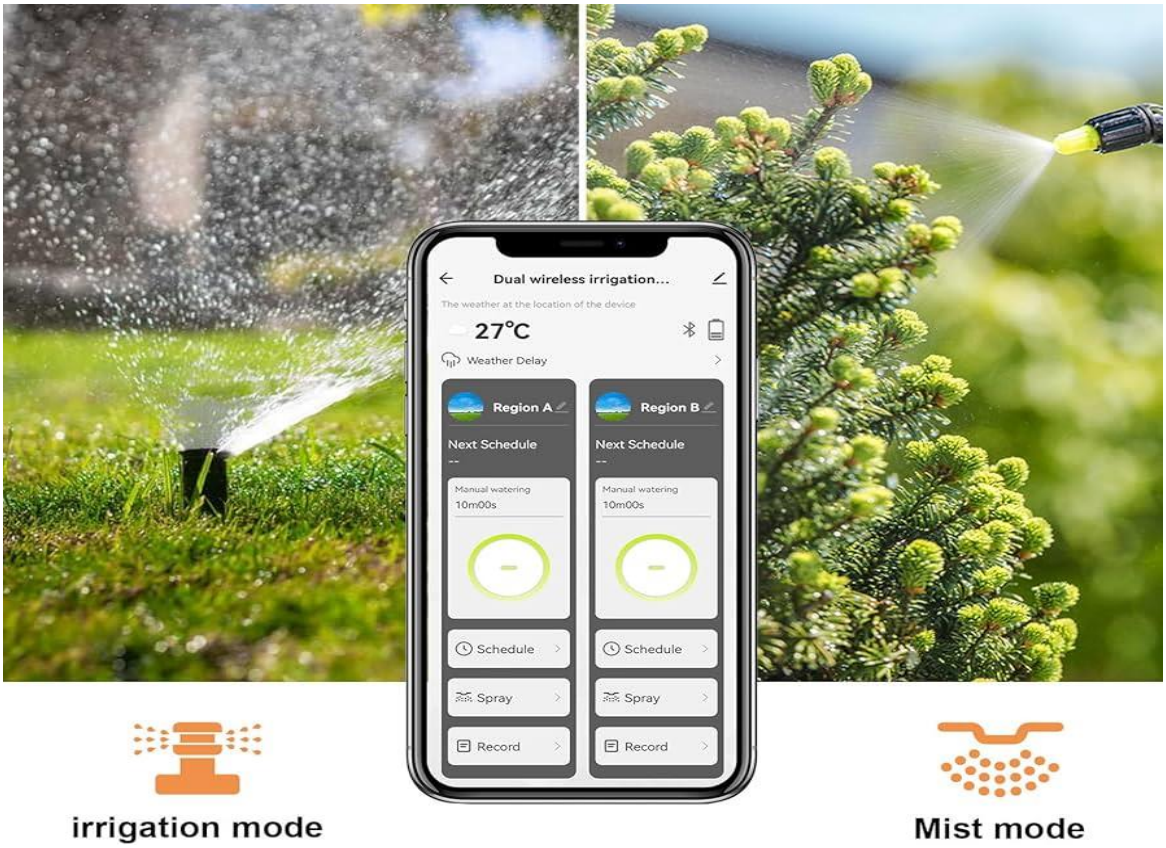


Figure I.8 : Système d'irrigation intelligent

I.7.1 Irrigation intelligente pilotée par ESP32 :

Un système d'irrigation intelligent basé sur le microcontrôleur ESP32 permet de gérer l'arrosage des plantes de façon automatisée, précise et économe en eau. Il peut fonctionner selon un programme horaire prédéfini ou réagir dynamiquement aux données mesurées par des capteurs d'humidité du sol. Le système se compose généralement d'un module de contrôle central (ESP32), de capteurs d'humidité, de vannes électromagnétiques et de tuyaux d'arrosage. Les capteurs mesurent en temps réel l'humidité du sol et transmettent ces données à l'ESP32. En fonction des seuils définis, le microcontrôleur décide si un arrosage est nécessaire. Si c'est le cas, il active les vannes pour laisser passer l'eau vers les plantes, jusqu'à ce que la quantité d'eau nécessaire soit atteinte.

Pour assurer la communication entre les différents éléments du système ou pour permettre le suivi à distance, plusieurs protocoles de communication IoT peuvent être intégrés. Le MQTT, par exemple, est un protocole léger et efficace pour transmettre les

données de capteurs vers une plateforme cloud ou un tableau de bord. Le LoRa (Long Range) permet une communication longue distance avec une consommation énergétique très faible, idéal pour les zones rurales sans Wi-Fi. Le Zigbee, quant à lui, est utilisé dans les réseaux maillés à courte portée, notamment en domotique. Le choix du protocole dépend de la portée souhaitée, de la consommation d'énergie, de la bande passante nécessaire et du type d'infrastructure disponible. Ces technologies permettent ainsi au système d'irrigation d'être connecté, évolutif et intelligent.

I.7.2 Des protocoles de communication :

Dans un système d'irrigation intelligent piloté par un microcontrôleur comme l'ESP32, le choix du protocole de communication est crucial pour assurer la connectivité entre les différents composants du système, mais aussi pour transmettre les données efficacement entre les capteurs, l'ESP32, et l'utilisateur final (localement ou à distance via une application mobile ou une plateforme IoT)[10].

Voici un aperçu des principaux protocoles de communication utilisés dans ce type de système :

I.7.2.1 Wi-Fi (ESP32 intégré)

1. **Description :**

Le **Wi-Fi** est l'un des protocoles de communication les plus courants pour les systèmes IoT (Internet des objets). Il est intégré nativement dans l'ESP32, permettant ainsi une connectivité rapide et une bande passante élevée.

2. **Advantages**

- **Large bande passante** : Permet de transmettre des données volumineuses, comme des historiques de capteurs.
- **Facilité de configuration** : L'ESP32 se connecte directement aux réseaux Wi-Fi existants.

Accès à Internet : Permet de se connecter à des plateformes cloud, d'envoyer des notifications, ou de contrôler le système à distance.

3. **Inconvenient**

- **Consommation d'énergie élevée :** Moins adapté aux applications où l'alimentation est limitée ou doit être optimisée.
- **Portée limitée :** Dépend de la couverture du réseau Wi-Fi dans la zone d'application.

4. **Applications dans l'irrigation**

- **Transmission des données de capteurs** (humidité, température, etc.) vers un serveur central ou une plateforme Cloud (par exemple, ThingSpeak, Firebase).
- **Contrôle à distance** via une interface web ou mobile.

I.7.2.2 MQTT (Message Queuing Telemetry Transport)

1. **Description**

Le **MQTT** est un protocole léger de messagerie pour la transmission de petites quantités de données. Il fonctionne sur une architecture **client-serveur** où l'ESP32 agit comme un client qui publie des messages (data) et s'abonne à certains "topics" pour recevoir des informations. Le broker MQTT gère ces messages et les distribue aux clients abonnés.

2. **Avantages**

- **Léger et rapide** : Consomme peu de bande passante et est optimisé pour des communications fréquentes.
- **Faible consommation d'énergie** : Adapté aux appareils alimentés par batterie.
- **Très fiable** : Système de qualité de service (QoS) garantissant la livraison des messages.

3. **Inconvénients**

- Nécessite un serveur MQTT (broker), qui peut être local ou basé sur le Cloud (par exemple, Mosquito, HiveMQ).

4. **Applications dans l'irrigation**

- **Transmission des données de capteurs :** à une plateforme Cloud ou une base de données IoT (par exemple, via ThingSpeak ou Node-RED).

- **Commandes d'arrosage à distance :** (activation/désactivation des vannes ou des pompes).

I.7.2.3 Lora (Long Range)

1. Description

Le LoRa est un protocole sans fil basé sur une technologie de bande étroite. Il est spécialement conçu pour des applications IoT nécessitant une longue portée et une faible consommation d'énergie. LoRa est idéal dans des environnements ruraux ou éloignés où la connectivité Wi-Fi est indisponible.

2. Avantages

- **Portée longue** : Peut couvrir des distances allant jusqu'à **15 km en milieu rural**.
- **Faible consommation d'énergie** : Idéal pour des applications autonomes sur batterie.
- **Communication bidirectionnelle** : Permet de transmettre et recevoir des données.

3. Inconvénients

- **Bande passante faible** : Limité aux transmissions de petites quantités de données (parfait pour les capteurs, mais pas pour des vidéos ou des fichiers lourds).
- **Nécessite une passerelle LoRaWAN** : Pour relier les capteurs à un serveur central.

4. Applications dans l'irrigation

- Suivi des capteurs **(humidité du sol, température) dans des zones isolées sans couverture Wi-Fi.**
- Connexion à une passerelle LoRaWAN**, puis envoi des données à un serveur via MQTT ou HTTP.**

I.7.2.4 Zigbee:

1. Description

Le Zigbee est un protocole sans fil basé sur une architecture en réseau maillé. Il est principalement utilisé dans des applications domotiques et IoT où plusieurs appareils doivent communiquer entre eux. Les dispositifs Zigbee forment un réseau local et échangent des informations directement entre eux, ce qui garantit une communication robuste.

2. **Avantages**

- **Basse consommation** : Optimisé pour des capteurs fonctionnant sur batterie.
- **Réseau maillé** : Les appareils peuvent se relier entre eux, ce qui augmente la couverture du réseau.
- **Fiabilité** : Idéal pour des environnements où les interférences sont présentes.

3. **Inconvénients**

- Portée limitée **: Chaque dispositif Zigbee doit être à portée d'un autre pour transmettre des données.**
- Complexité de mise en place **: Nécessite un coordinateur (comme une box domotique ou un dongle Zigbee) pour gérer le réseau.**

4. **Applications dans l'irrigation**

- **Réseau local de capteurs d'humidité** dans un jardin ou une serre.
- **Surveillance des données d'arrosage** via un réseau Zigbee entre les capteurs et un contrôleur central (ESP32).

I.7.2.5 Bluetooth Low Energy (BLE)

1. **Description**

Le **Bluetooth Low Energy (BLE)** est une technologie sans fil à faible consommation d'énergie utilisée pour des communications à courte portée. L'ESP32 dispose également de cette fonctionnalité, ce qui en fait un bon choix pour les applications nécessitant des communications locales[11].

2. **Avantages**

- **Très faible consommation d'énergie** : Idéal pour les appareils fonctionnant sur batterie.
- **Facilité d'intégration** : Large écosystème de dispositifs Bluetooth.

3. **Inconvénients**

- **Portée limitée :** Typiquement entre 10 et 100 mètres.
- **Bande passante limitée :** Peu adapté aux transferts de données lourdes.

4. **Applications dans l'irrigation**

- **Contrôle local** des systèmes d'irrigation via une application mobile.
- **Échange de données avec des capteurs proches** pour un contrôle en temps réel de l'humidité du sol.
-

I.8 Les avantages d'irrigation automatise "intelligente"

Tableau I.2 : Les avantages d'irrigation automatise

Économie d'eau :	L'arrosage se fait uniquement lorsque c'est nécessaire, évitant tout gaspillage.
Meilleure santé des plantes :	Les plantes reçoivent la bonne quantité d'eau au bon moment, favorisant leur croissance.
Automatisation complète :	Plus besoin d'intervention humaine constante, le système s'occupe de tout.
Gain de temps :	Le producteur ou jardinier n'a pas à surveiller ni déclencher manuellement l'arrosage.
Décisions basées sur des données :	Les capteurs fournissent des mesures précises permettant un arrosage adapté aux conditions réelles.
Possibilité de contrôle à distance :	Grâce à la connectivité (Wi-Fi, LoRa, etc.), le système peut être surveillé et contrôlé à distance.
Adapté à l'environnement :	Moins de gaspillage d'eau, réduction de l'empreinte écologique.
Fonctionnement intelligent et réactif :	Le système s'ajuste automatiquement aux changements climatiques ou aux saisons.

I.8 Conclusion

Ce premier chapitre a permis d'explorer en profondeur les principes théoriques des systèmes d'irrigation. Plusieurs méthodes ont été examinées, notamment l'irrigation de surface, l'irrigation localisée, ainsi que leurs déclinaisons modernes. Une attention particulière a été portée à l'irrigation automatisée utilisant le microcontrôleur ESP32, qui se distingue par sa capacité à intégrer des capteurs et à communiquer via des réseaux sans fil.

Parmi les solutions étudiées, l'irrigation intelligente pilotée par ESP32 ont été identifiées comme des approches efficaces pour optimiser la consommation d'eau. Ces technologies jouent un rôle essentiel dans la gestion durable des ressources hydriques, en permettant un arrosage précis, adapté aux besoins réels des plantes, et en réduisant les pertes d'eau à l'échelle locale comme mondiale.

CHAPITRE II

Conception et Modélisation

II.1 Introduction

Avec les défis croissants liés aux changements climatiques et à la rareté des ressources en eau, les technologies d'irrigation intelligentes sont devenues une nécessité pour atteindre une agriculture plus durable et efficiente. Ces systèmes reposent sur des microcontrôleurs comme **l'Arduino UNO**, qui collecte les données des capteurs d'humidité du sol et de température, les analyse, puis prend automatiquement la décision d'activer ou de désactiver la pompe à eau, sans intervention humaine directe ou dépendance à des seuils fixes.

L'intégration du module **Wi-Fi ESP8266** permet une communication efficace avec des plateformes Cloud ou des applications web, offrant à l'utilisateur la possibilité de surveiller en temps réel l'état du sol et la température, ainsi que de gérer à distance le processus d'irrigation via un smartphone ou un ordinateur.

Cette synergie entre Arduino et ESP8266 permet de développer un système intelligent et flexible, capable de s'adapter aux conditions environnementales. Cela permet de réduire la consommation d'eau, d'optimiser les conditions de croissance des plantes, et de minimiser les coûts d'exploitation. De telles solutions représentent une avancée significative vers la transformation numérique du secteur agricole et la promotion d'une production agricole durable[12].

II.2 Conception de l'architecture du système

La conception de l'architecture du système d'irrigation intelligent repose sur une intégration harmonieuse entre les capteurs, le module de commande (**ESP8266**), les actionneurs, ainsi que l'interface utilisateur pour le contrôle à distance. Cette architecture modulaire permet une gestion efficace de l'irrigation, optimisée par les données environnementales collectées en temps réel.

II.3 Composants principaux de l'architecture :

1- ESP8266 :

L'ESP8266 est un module Wi-Fi à faible coût, développé par l'entreprise **Expressif System**. Il est largement utilisé dans les projets d'**objets connectés (IoT)** grâce à sa capacité à se connecter à un réseau Wi-Fi et à échanger des données via Internet ou un réseau local.

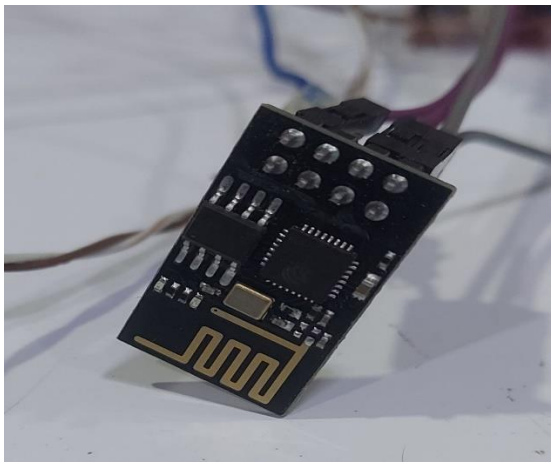


Figure II.1 : ESP8266

2-Capteurs environnementaux

2-1-Capteur d'humidité du sol : Mesure l'humidité présente dans la terre pour déterminer le besoin d'arrosage.

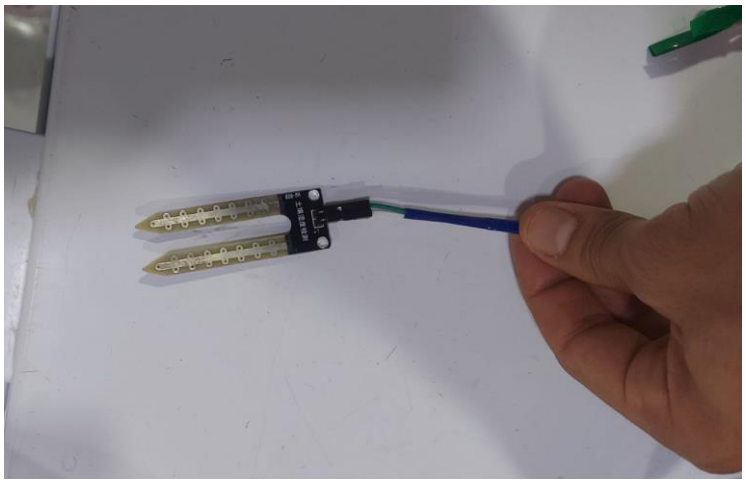


Figure II.2 : Capteur d'humidité du sol

2-2-Capteur de température DHT 22 : Le DHT22, également connu sous le nom de AM2302, est un capteur numérique de température et d'humidité largement utilisé dans les projets électroniques et les systèmes embarqués, notamment dans les applications liées à l'IoT et à l'automatisation agricole..

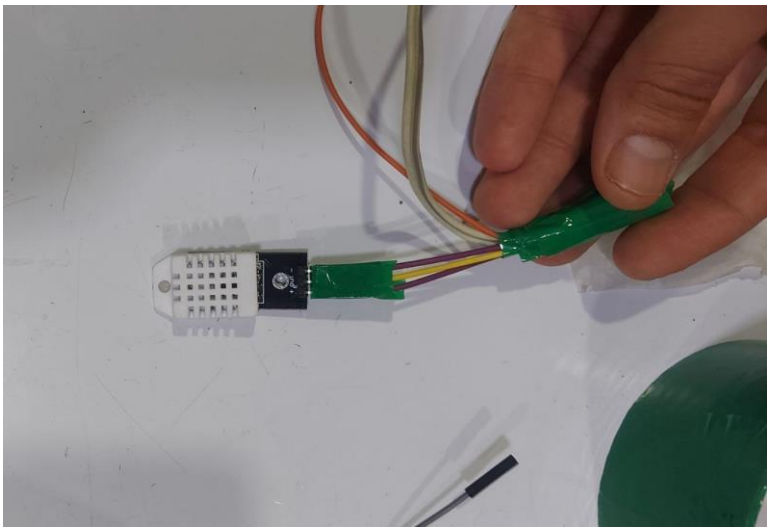


Figure II.3 : Capteur de température DHT 22

2-3-Électrovannes : Connectées à des conduites d'eau, elles sont commandées automatiquement par arduino pour ouvrir ou fermer l'arrosage en fonction des données reçues.

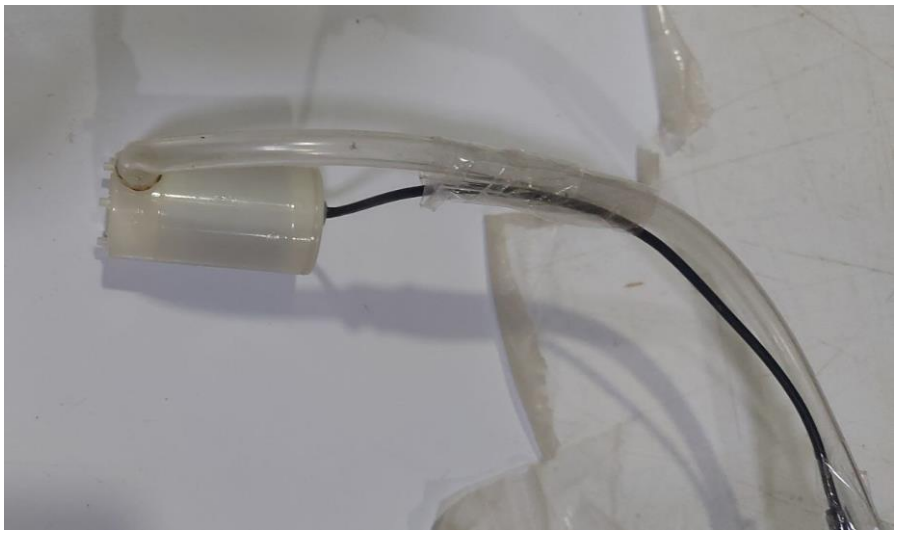


Figure II.4 : Électrovanne 12V 1/2

2-4-Réservoir d'eau ou source d'irrigation : Fournit l'eau nécessaire au système. Il peut être associé à une pompe contrôlée également par l'Arduino.

Source d'alimentation : Le système peut être alimenté par des panneaux solaires (pour une approche écoresponsable) ou une alimentation électrique conventionnelle.

Interface utilisateur : Application mobile ou interface web : Permet à l'utilisateur de visualiser les données en temps réel, de modifier les paramètres d'irrigation et de recevoir des alertes ou notifications sur l'état du système.

2-5- La carte Arduino Uno

La carte Arduino Uno est l'une des cartes les plus prisées de la famille Arduino. Basée sur le microcontrôleur ATmega328P, elle propose une variété de broches d'entrée/sortie numériques et analogiques, ainsi que des capacités de communication série pour interagir avec d'autres périphériques.

En raison de sa polyvalence et de sa facilité d'utilisation, l'Arduino Uno est largement utilisé pour les projets électroniques et les prototypes. Sa compatibilité avec divers capteurs, modules et périphériques en fait un choix idéal pour les débutants comme pour les experts en électronique.

De plus, la carte Arduino Uno est compatible avec l'IDE Arduino, un environnement de développement intégré convivial qui permet de programmer la carte à l'aide d'une version simplifiée du langage de programmation C++. Cette facilité d'utilisation la rend accessible à un large éventail d'utilisateurs, même à ceux qui n'ont pas de connaissances approfondies en programmation ou en électronique.

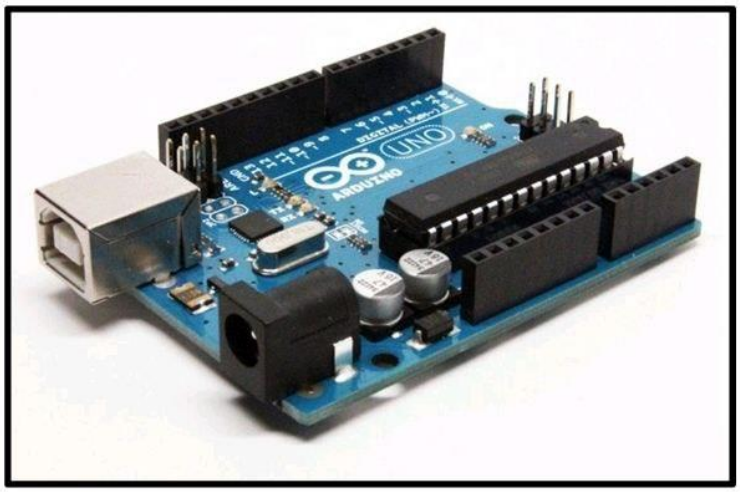


Figure II.5 : Carte Arduino Uno

2.5.1 Principe de Fonctionnement :

Le fonctionnement de la carte Arduino Uno repose sur son microcontrôleur, l'ATmega328P. Voici les principales étapes :

Alimentation : La carte Arduino Uno peut être alimentée par un adaptateur secteur, une batterie ou un port USB, fournissant généralement 5 volts.

Programmation : Un programme est écrit dans l'IDE Arduino sur un ordinateur, puis téléversé sur la carte via un câble USB. Le langage de programmation utilisé est basé sur C/C++ et adapté à Arduino.

Microcontrôleur : L'ATmega328P est le cœur de la carte, exécutant le programme téléversé et contrôlant les broches d'entrée/sortie.

Broches d'entrée/sortie : La carte Arduino Uno possède 14 broches numériques et 6 broches analogiques, utilisées pour lire des signaux en entrée ou envoyer des signaux en sortie vers des composants externes.

Fonctionnalités supplémentaires : La carte Arduino Uno dispose d'un oscillateur pour Générer des signaux d'horloge, d'un régulateur de tension pour fournir une alimentation stable au microcontrôleur, et d'interfaces de communication série (UART, SPI, I2C) pour communiquer avec d'autres périphériques.

Exécution du programme : Une fois le programme téléversé, le microcontrôleur exécute Les instructions du programme en contrôlant les composants connectés aux broches d'entrée/sortie.

La carte Arduino Uno fonctionne en exécutant un programme préalablement écrit qui contrôle les interactions entre le microcontrôleur et les composants externes, permettant ainsi de réaliser une grande variété de projets électroniques[13].

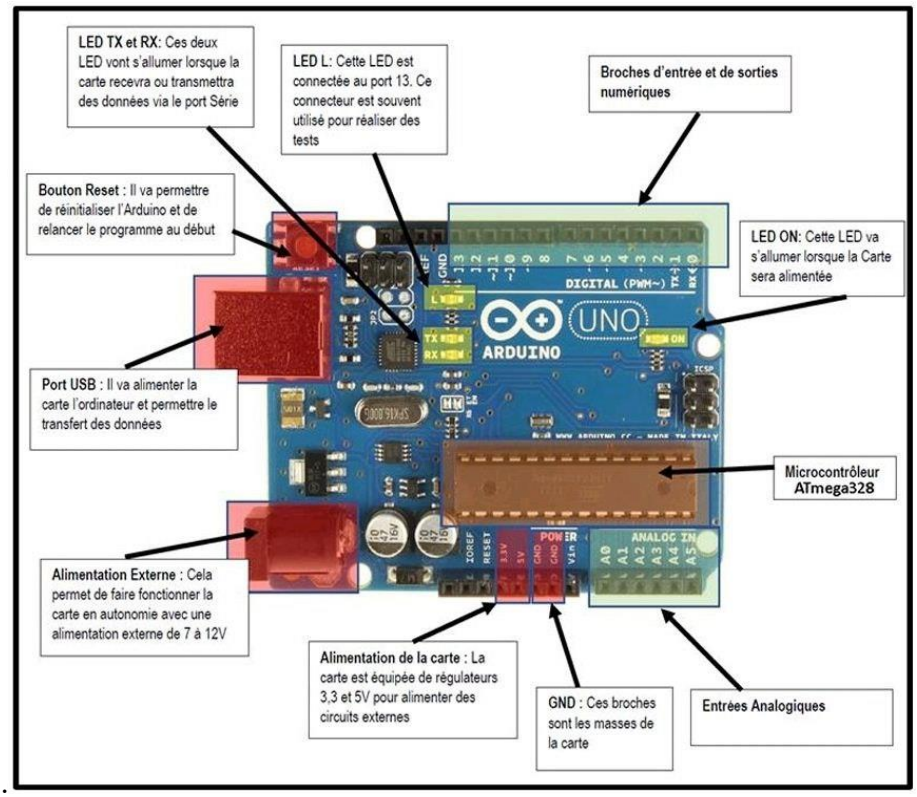


Figure II.6 : Composants carte Arduino

Il est préférable de choisir ESP32 au lieu d'Arduino ?

II.4 Avantages et caractéristiques de l'ESP32 par rapport à l'Arduino

Le choix de l'ESP32 plutôt que d'un Arduino (comme l'Uno, Nano ou Méga, par exemple) repose sur plusieurs avantages techniques et pratiques :

1. **Connectivité Wi-Fi et Bluetooth intégrée :** ESP32 dispose de Wi-Fi et Bluetooth intégrés, ce qui est idéal pour les projets IoT, sans avoir besoin de modules supplémentaires.
2. **Meilleures performances :**
   - Processeur dual-core à 240 MHz pour l'ESP32, contre 16 MHz pour l'Arduino Uno.
   - Plus de puissance de calcul, ce qui permet de gérer des tâches plus complexes (traitement en temps réel, capteurs multiples, multitâche, etc.).

3. **Mémoire :**
   - Mémoire RAM et Flash bien plus importantes : jusqu'à 520 Ko de SRAM et 4 Mo (ou plus) de Flash.
4. **Multitâche :** L'ESP32 peut exécuter plusieurs tâches en parallèle grâce à son RTOS intégré (FreeRTOS).
5. **Prix :** Malgré ses fonctionnalités avancées, l'ESP32 reste très abordable, parfois au même prix qu'un Arduino Uno ou Nano.
6. **Nombre d'E/S (Entrées/Sorties) :** L'ESP32 propose plus de GPIOs, souvent programmables pour diverses fonctions (PWM, ADC, DAC, I²C, SPI, etc.).
7. **Capteurs et périphériques intégrés :** L'ESP32 embarque souvent des convertisseurs analogiques-numériques (ADC), convertisseurs numériques-analogiques (DAC), touch sensors, et même parfois un capteur Hall ou accéléromètre.[14]

Tableau II.1 : ESP32 contre Arduino

Avantages	ESP32	Arduino Uno/Nano
Wi-Fi / Bluetooth	Oui (intégrés)	Non (modules externs requis)
Vitesse processeur	Jusqu'à 240 MHz	16 MHz
Mémoire	Très élevée	Très limitée
Multitâche	Oui (FreeRTOS)	Non
Prix	Équivalent Ou légèrement supérieur	Très abordable
Polyvalence et E/S	Très élevé	Moyen

II.5 Interactions entre capteurs, actionneurs et plateforme Cloud

1- L'Arduino Uno agit comme le contrôleur central. Il lit les capteurs, contrôle les actionneurs et communique avec le Cloud pour surveillance et commande à distance.

2- Les capteurs collectent des données environnementales et envoient leurs valeurs à l'ESP32.

*-Capteur d'humidité du sol : mesure l'humidité présente dans la terre.

*-Capteur de température : mesure la température ambiante.

*-Les capteurs envoient des données analogiques ou numériques à l'ESP32 via les entrées GPIO.

- L'ESP32 analyse les données.

1. **Actionneurs :** Lorsque l'ESP32 détecte un besoin d'irrigation (sol trop sec), il active les

- L'ESP32 envoie un signal de commande (digital HIGH/LOW ou PWM) à l'actionneur via les GPIO pour l'activer ou le désactiver.
- Électrovanne ou pompe à eau : arrose les plantes.

2. **1.Plateforme Cloud :** L'ESP32 est connecté au Wi-Fi et échange des données avec une plateforme Cloud (comme Blynk, Firebase, Thingspeak, ou MQTT via Node-RED).

- Envoi de données capteurs pour affichage en temps réel.
- Stockage historique pour analyse (ex. : humidité moyenne sur 1 semaine).
- Commande à distance : l'utilisateur peut forcer ou stopper l'irrigation via une interface mobile ou web.

2.Réseaux de communication sans fil : LoRa, MQTT, Zigbee, ESP-NOW, etc.

Au lieu d'un lien direct avec une plateforme Cloud via Wi-Fi, l'ESP32 peut utiliser des protocoles de communication spécialisés pour transmettre les données ou les commandes dans un système distribué.

- ESP32 envoie les mesures des capteurs (ex. : humidité du sol, température) via
- LoRa : vers une passerelle Lora WAN qui redirige vers un serveur local ou distant.
- MQTT : vers un broker MQTT local (PC) ou distant (serveur MQTT ou Cloud).
- Zigbee : vers une passerelle Zigbee (d'ongle USB ou box domotique).
- ESP-NOW : directement vers un autre ESP32 sans besoin de Wi-Fi.[15]

II.6 Plateformes logicielles

Pour découvrir un système d'irrigation automatique basé sur un ARDUINO, le choix des plateformes logiques est crucial pour garantir la connectivité, l'interaction utilisateur et la facilité de développement. Nous aborderons sur trois couches : l'IoT, le Cloud et l'interface utilisateur.

1. Plateforme :

Le rôle de cette couche est de lire les capteurs (humidité, température, pluie, etc.), contrôler les actionneurs (électrovannes), et communiquer avec le Cloud.

Parmi les meilleures et les plus célèbres plateformes :

1. Arduino IDE :

- Facile à utiliser ESP32 /ARDUINO.
- Large communauté, nombreuses bibliothèques (WiFi, MQTT, capteurs).

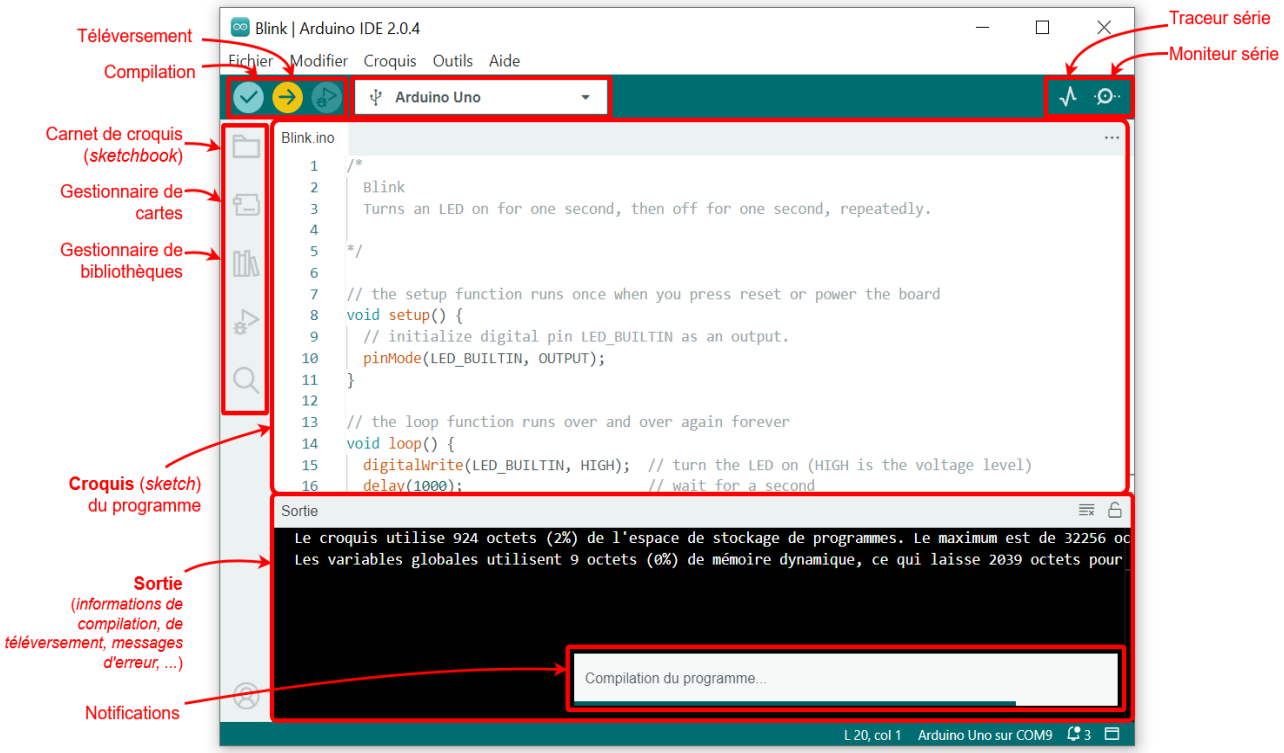


Figure II.7 : Arduino IDE Surface

Platform IO

- Facile à utiliser pour ESP32.
- Large communauté, nombreuses bibliothèques (WiFi, MQTT, capteurs).

En intégrant Platform IO dans Visual Studio Code, les développeurs peuvent bénéficier de plusieurs fonctionnalités ; en effet, Platform IO est conçu pour faciliter et améliorer le processus de développement de micro logiciels pour microcontrôleurs.

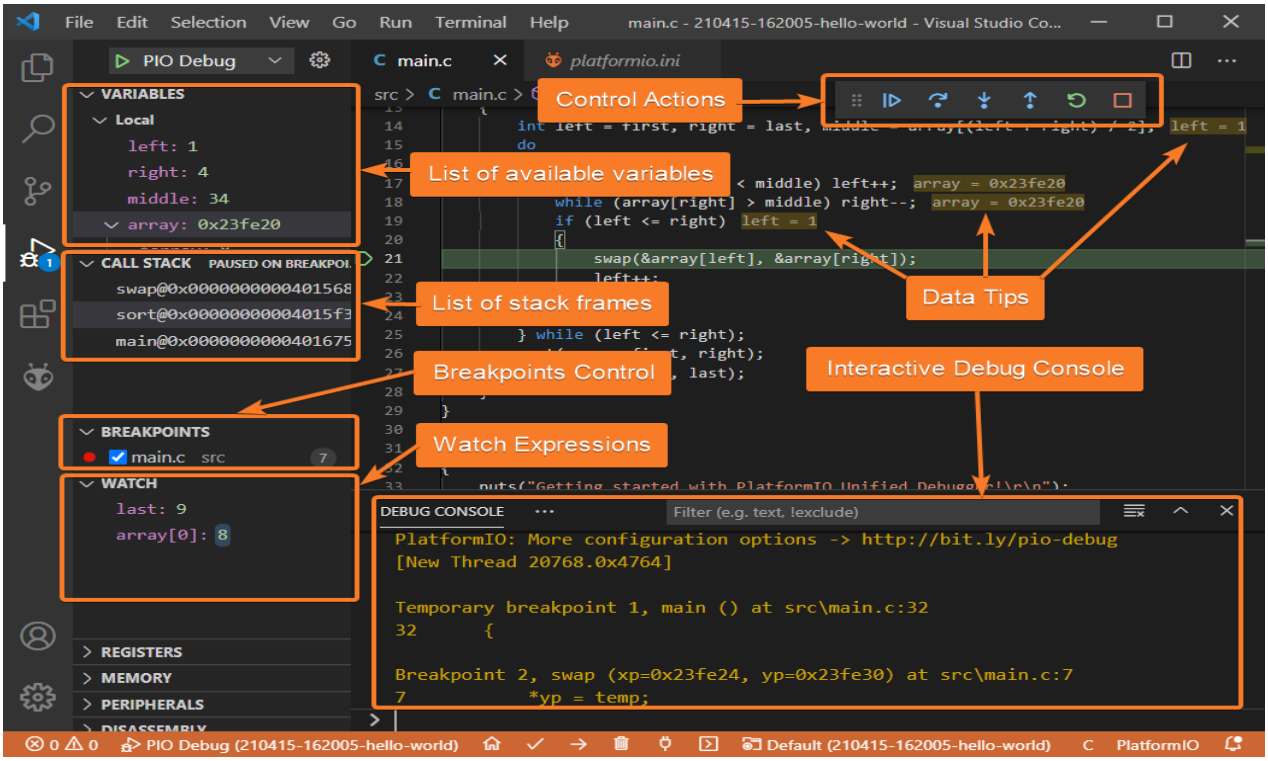


Figure II.8 : VS CODE Platform IO

2. A) Protocoles de communication :

Tableau II.2 : Protocoles de communication

Protocole	Portée	Consommation d'énergie	Débit	Internet requis ?	Idéal pour
LoRa	Longue (2–15 km)	Très faible	Lent (bon pour capteurs)	Non	Irrigation à distance sans Internet
Zigbee	Courte (10–100 m)	Faible	Moyen	Non	Ferme ou réseau local de capteurs

MQTT	Dépend du transport	Dépend du support (Wi-Fi/LoRa/etc.)	Rapide	Souvent	Contrôle via cloud ou serveur local
ESP-NOW	Courte (jusqu'à 200 m)	Faible	Rapide	Non	Communication entre ESP32 sans Wi-Fi

B) Plateforme Cloud (collecte, traitement, historique):

Tableau II.3 : Plateforme Cloud

Plateforme	Avantages	Remarques
Blynk (Nouveau)	Interface mobile intégrée, configuration facile	Requiert compte et Internet
Things Board	Open-source, puissant, tableau de bord web	Nécessite un serveur (local ou Cloud)
Firebase	Base de données temps réel, facile avec ESP32	Code plus complexe
Node-RED + Mosquito	Personnalisable, hébergement local ou Cloud	Très bon pour les projets locaux
Home Assistant	Parfait pour integration domotique	Plus complexe à configurer

3. Interface Utilisateur :

Pour une interface utilisateur (UI) dans un système d'irrigation automatique IoT, l'objectif est de permettre à l'utilisateur de :

- Surveiller les données (température, humidité, humidité du sol)
- Contrôler manuellement la pompe/électrovanne (ON/OFF)
- Programmer des seuils automatiques ou des horaires
- Recevoir des notifications ou alertes.

Dans l'interface utilisateur, nous pouvons compter sur les éléments suivants :

Node-RED Dashboard :

Ses caractéristiques comprennent les suivantes :

- Interface web simple en glisser-déposer.
- Accessible depuis navigateur local ou distant.

- Bonne option si couplée avec Mosquito MQTT.

Application Web Personnalisée :

Nous pouvons également adopter une application Web personnalisée.

- HTML/CSS/JS avec Framework comme React ou Vue.js.
- Backend en Flask (Python) ou Node.js pour gérer la communication.
- API REST ou Web Sockets avec ESP32.

Avec la diffusion des téléphones portables, nous pouvons utiliser

Blynk (idéal pour débutants à intermédiaires):

Ses caractéristiques les plus marquantes sont les suivantes :

- Application IOS/Android
- Créez l'interface en glisser-déposer
- Widgets : boutons, jauges, sliders, graphes
- Connecté au Blynk. Cloud ou en local
- Compatible ESP32 via bibliothèque Arduino

II.7Conclusion

L'intégration d'arduino dans un système d'irrigation intelligent vous permet de créer une solution puissante, flexible et économique, idéale pour s'adapter à la technologie agricole moderne. Grâce à de nombreuses fonctionnalités (connectivité, performances, compatibilités avec différents capteurs et protocoles), il constitue un choix optimal pour le développement de projets IoT de grande ou de petite taille. Le contrôle à distance, l'automatisation intelligente et la réduction de l'eau provenant d'autres zones contribuent à une agriculture plus responsable et durable.

Tout ce que nous avons vu dans ce chapitre sera appliqué dans les travaux pratiques du troisième chapitre.

CHAPITRE III :
Développement et Implémentation

III.1.Introduction

L'étude d'un système d'irrigation automatisé intelligent représente une avancée majeure dans le domaine Agriculture intelligente et durable. Ce système utilise des technologies telles que des capteurs, des systèmes de transmetteurs, des microcontrôleurs et des moteurs pour automatiser le processus d'irrigation des cultures et répondre aux besoins réels en eau des plantes et aux conditions environnementales[16].

III.2.Intégration des capteurs et actionneurs

III.2.1 Présentation du schéma

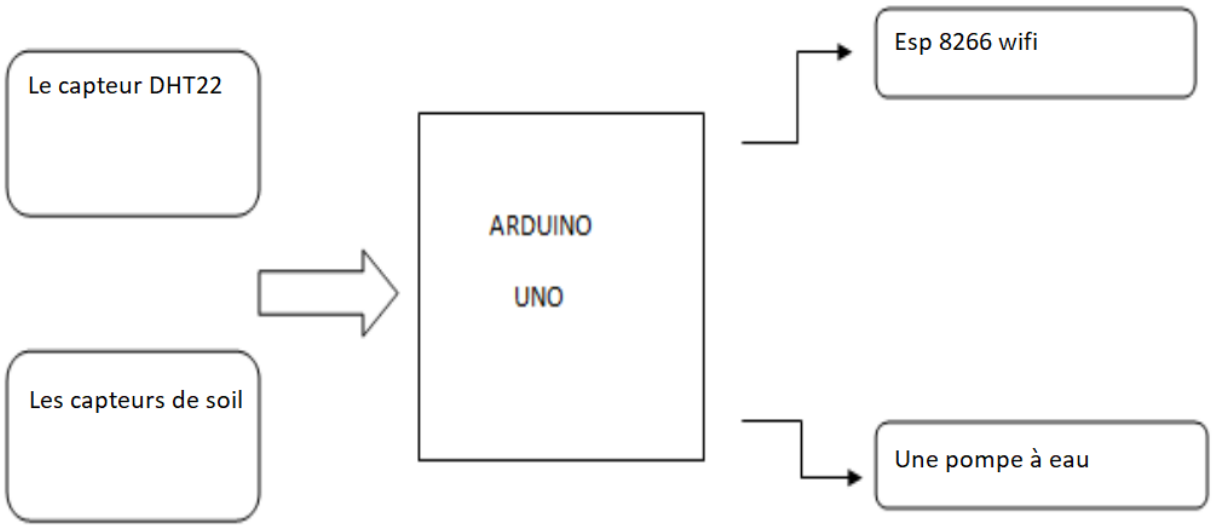


Figure III.1 : Schéma de notre configuration

III.2.2 Explication du schéma

Dans cette configuration, ****L'Arduino Uno**** agit comme un CPU qui reçoit des données de deux capteurs : le **Capteur d'humidité** et le **Capteur de chaleur*, tous deux branchés en tant qu'entrées analogiques. Sur la base de ces lectures, le système contrôle si la pompe à eau est allumée ou éteinte

Pour assurer des conditions idéales pour les plantes. Le module de communication ESP8266 WiFi** est également utilisé pour envoyer les données lues par les capteurs à la plateforme IoT pour une visualisation ou une analyse à distance, améliorant ainsi la capacité de l'utilisateur à surveiller les conditions de sol et de température sans avoir à être sur place.

III.2.3 Définition sur ISIS PROTEUS

ISIS PROTEUS est un logiciel de simulation électronique utilisé pour la conception et la simulation de circuits électroniques. Il permet aux ingénieurs et aux concepteurs de systèmes électroniques de créer des schémas de circuits, de simuler le fonctionnement de ces circuits, et de développer des prototypes virtuels avant de les mettre en oeuvre dans des applications réelles. ISIS PROTEUS offre une interface conviviale et des outils puissants pour la conception et la simulation de circuits électroniques, ce qui en fait un outil précieux pour les professionnels de l'électronique.

III.2.4 Sélection du matériel

Pour mettre en œuvre ce projet, les composants nécessaires sont le panneau Arduino UNO, le capteur d'humidité du sol et le capteur de température (DHT22), moteur DC. Relais 5V, photo coupleur (PC817), module Wifi ESP8266, résistance variable



Figure III.2 : Les composants

III.2.5 Schéma de la carte détaillé

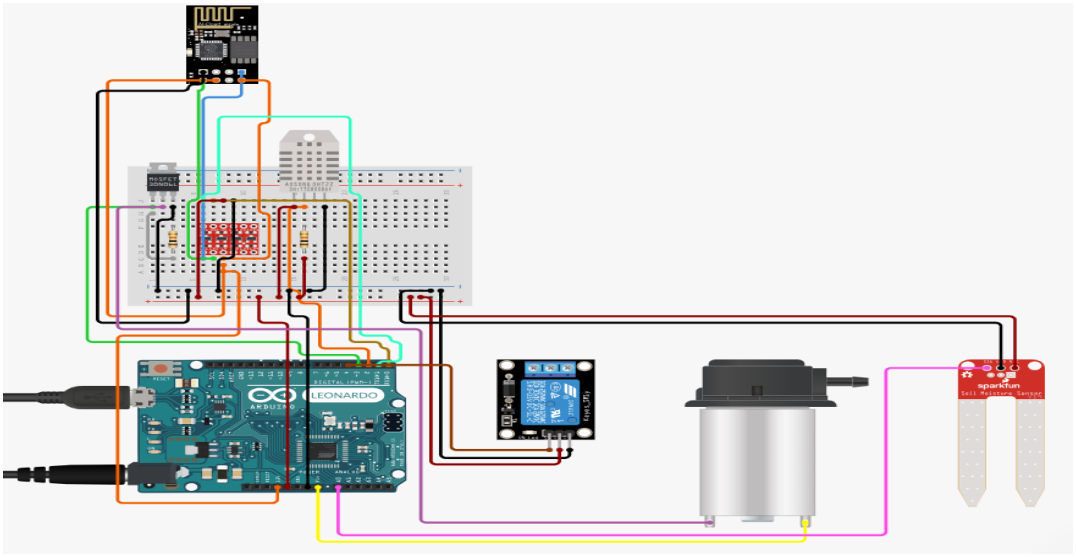


Figure III.3 : Schéma de simulation de la carte général

III.2.6 Explications détaillées du schéma

Le bloc d'entrée

Est la pierre angulaire d'un système d'irrigation intelligent, collectant les données environnementales nécessaires pour assurer un fonctionnement précis et intelligent de la pompe. Ce bloc est basé sur deux composants principaux : un capteur d'humidité du sol et un capteur de chaleur.

Le capteur d'humidité est utilisé pour mesurer la quantité d'humidité dans le sol, et est connecté à l'une des entrées analogiques de la carte Arduino (comme A0). Ce capteur permet au système de reconnaître l'état du sol en permanence, permettant au contrôleur de prendre des décisions pour allumer ou éteindre la pompe automatiquement, sans avoir besoin d'intervention manuelle. Ce capteur précis et fiable est conçu pour résister à des conditions météorologiques difficiles, ce qui le rend idéal pour les applications agricoles dans des environnements ouverts ou fermés.

Quant **au capteur de température**, il mesure la température du milieu environnant le sol. Il est connecté à un port numérique dans le panneau Arduino et envoie des données thermiques qui aident à améliorer la stratégie d'irrigation, car la température affecte directement les besoins en eau de la plante. Ces données contribuent à augmenter l'efficacité du système et à accroître son adaptation aux changements météorologiques.

Les données des deux capteurs sont envoyées au panneau Arduino UNO pour traitement, puis transmises à Internet en utilisant le module Wifi ESP8266, qui permet la surveillance et l'analyse à distance des valeurs environnementales via des plateformes de l'Internet des objets, fournissant une facilité de gestion et une meilleure prise de décision agricole.

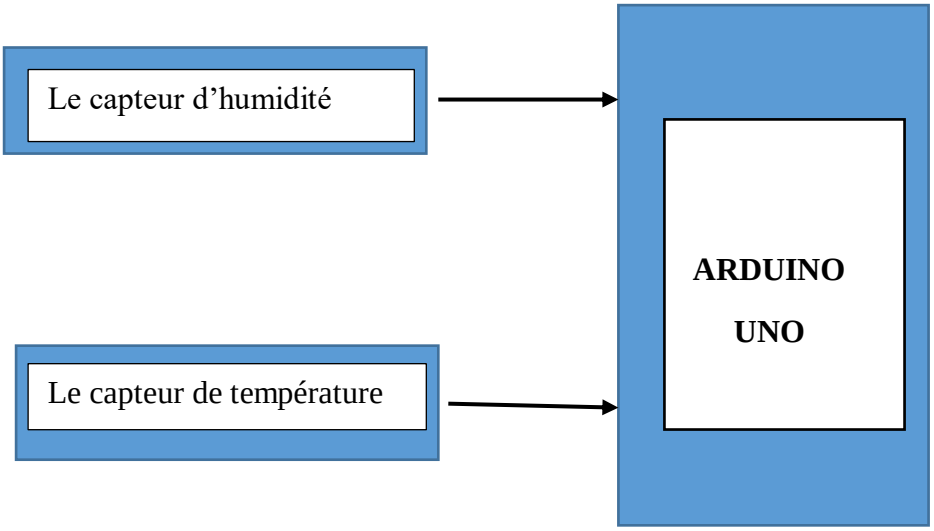


Figure III.4 : Schéma bloc d'entrée

Bloc de traitement : Le panneau Arduino UNO est le cœur battant du système d'irrigation intelligent, traitant les données envoyées par les capteurs d'humidité et de température. Cette carte se compose d'un microprocesseur, d'un ensemble de broches d'entrée et de sortie numériques et analogiques, ainsi que de composants électroniques qui permettent de contrôler le comportement du système. Un programme dédié est chargé sur la carte, qui comprend une logique logicielle déterminant comment gérer les signaux d'entrée provenant des capteurs, et prendre la décision appropriée d'allumer ou d'éteindre la pompe à eau. Les valeurs de lecture et l'état du système sont également envoyés à une interface externe via le module WiFi ESP8266, offrant la possibilité de surveiller et de contrôler le système à distance. Cette intégration entre le traitement local et la connectivité cloud améliore l'efficacité et la flexibilité du système pour s'adapter à diverses conditions climatiques et agricoles.

Bloc de sortie

Dans un système d'irrigation intelligent, le bloc de sortie est entraîné par un relais électrique (Relay) connecté à l'une des broches de sortie de la carte Arduino (comme la broche 7). Ce relais a pour tâche de contrôler l'activation ou la désactivation de la pompe à eau en fonction des lectures traitées par le panneau à partir des capteurs d'humidité et de température.

_ **Organigramme**

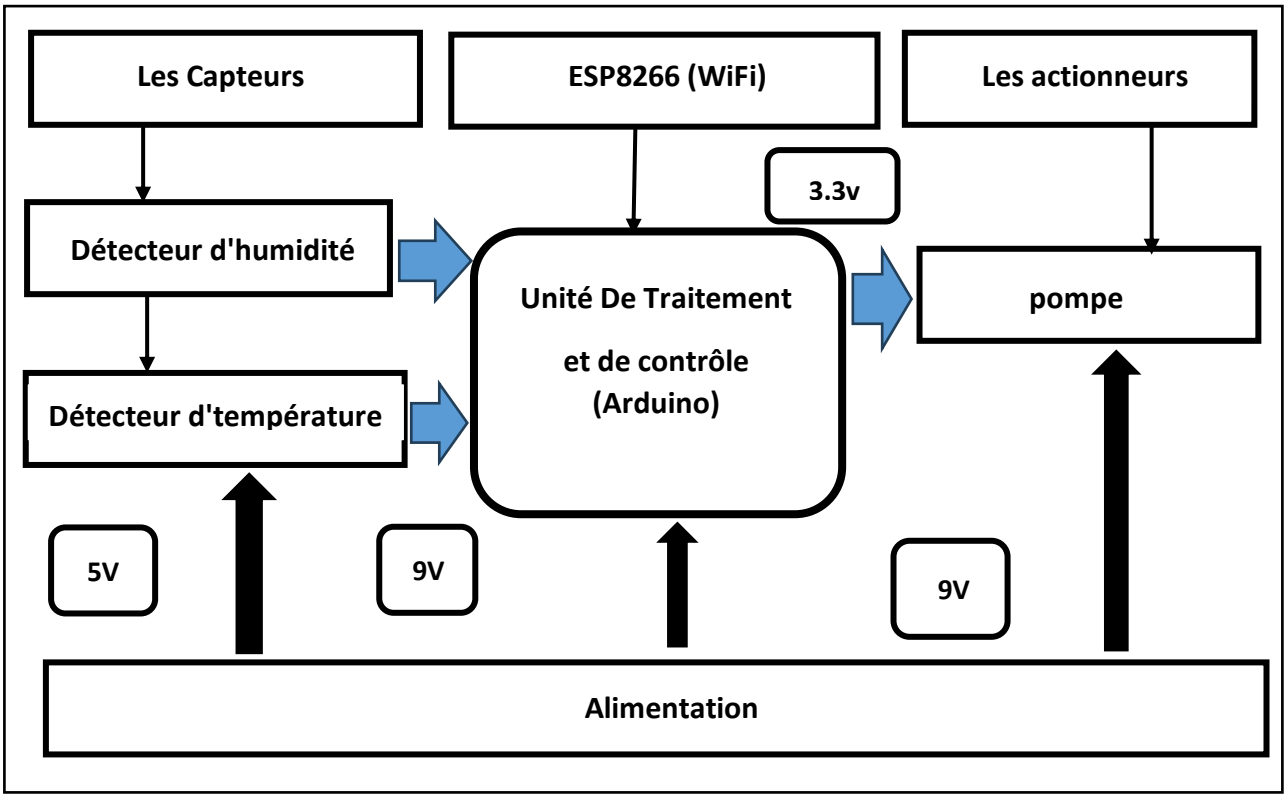


Figure III.5 : Schéma bloc d'entrée Structure organisationnelle

Organigramme du système d'irrigation basé sur Arduino

L'organigramme représente la séquence logique de fonctionnement du système d'irrigation intelligent basé sur **Arduino UNO**. Le système commence par lire les valeurs du capteur d'humidité du sol et du capteur de chaleur. Ces valeurs sont envoyées au panneau Arduino, qui les analyse et évalue dynamiquement la condition environnementale.

Si les relevés indiquent un besoin réel d'irrigation, le système active automatiquement le relais pour allumer la pompe à eau. Le processus d'arrosage est effectué jusqu'à ce que les valeurs environnementales s'améliorent, de sorte que le système désactive ensuite le relais et arrête la pompe, sans se fier à un temps spécifique ou une valeur fixe.

Si les conditions de sol et de température sont appropriées, le système reste en mode d'attente sans qu'aucune action ne soit mise en œuvre, ce qui contribue à rationaliser l'utilisation de l'eau et à éviter une irrigation excessive.

Toutes les informations collectées par les capteurs sont envoyées au module **WiFi ESP8266**, qui les transmet à la **plateforme IoT**, permettant à l'utilisateur de surveiller et de contrôler le système à distance de manière fluide et efficace.

III.5 Simulation

III.5.1 Logiciel IDE ARDUINO

III.5.1.1 Définition

Un logiciel IDE (Integrated développement Environnement) Arduino est un environnement de développement intégré spécialement conçu pour programmer des cartes Arduino. Il comprend un éditeur de code source, un compilateur, un débogueur et souvent d'autres outils utiles pour simplifier le processus de développement et de téléchargement de code sur la carte Arduino. L'IDE Arduino est disponible gratuitement et est compatible avec différents systèmes d'exploitation tels que Windows, macOS et Linux[17].

III.5.1.2 Présentation de logiciel

- **L'interface** :

  L'interface du logiciel Arduino se présente de la façon suivante :

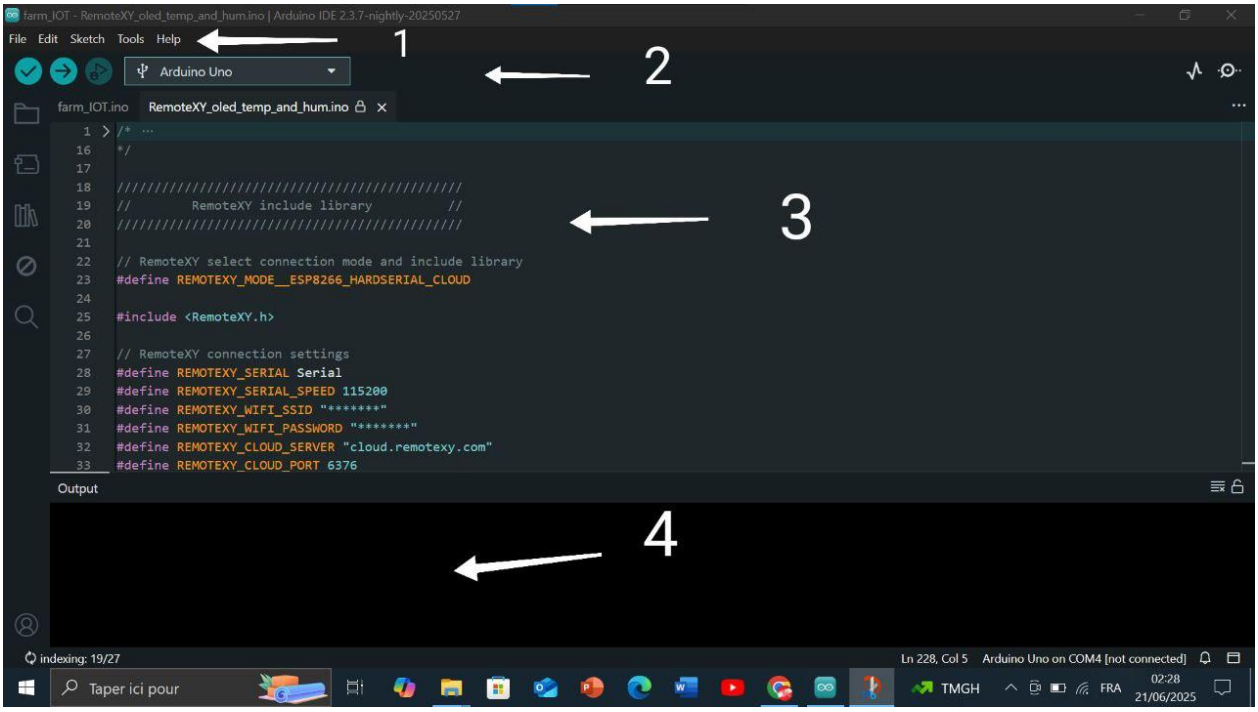


Figure III.6 : Interface Arduino

1. **Barre de menus :** En haut de la fenêtre, vous trouverez la barre de menus classique avec des options telles que Fichier, Édition, Outils, etc. C'est là que vous pouvez accéder à différentes fonctionnalités du logiciel.

2. **Barre d'outils :** Juste en dessous de la barre de menus, il y a une barre d'outils avec des icônes pour des actions fréquemment utilisées comme Nouveau, Ouvrir, Enregistrer, Téléverser, etc.

3. **Zone de texte du code :** Au centre de la fenêtre se trouve la zone de texte où vous écrivez votre code Arduino. C'est un éditeur de texte standard avec une coloration syntaxique pour le langage Arduino.

4. **Zone de messages :** En bas de la fenêtre, il y a une zone où s'affichent les messages de compilation et de téléversement. C'est là que vous verrez les erreurs éventuelles lors de la compilation de votre code.

● **Les boutons :**

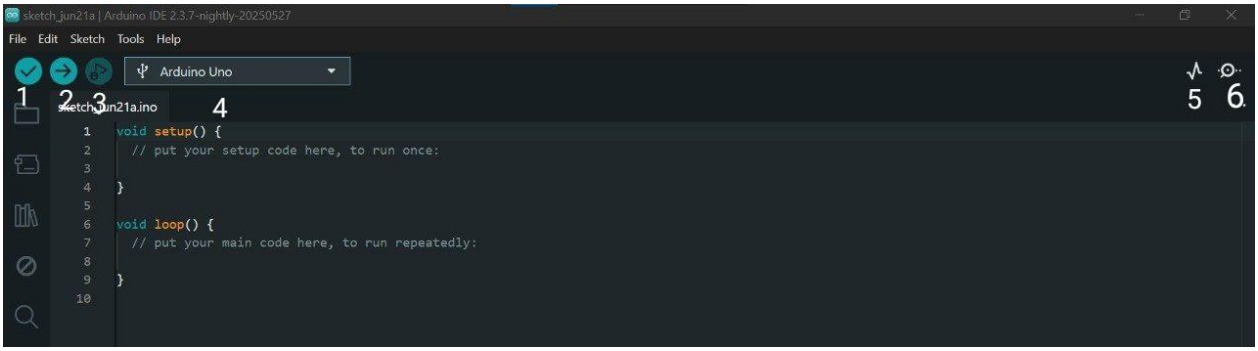


Figure III.7 : Les boutons Arduino Uno

✓ **1 :** Compile le code pour vérifier s'il contient des erreurs, mais ne le téléverse pas sur la carte.

✓ **2 :** Utilisé pour compiler le code et téléverser le sketch sur votre carte Arduino.

✓ **3 :** crée un nouveau fichier

✓ **5 :** Permet d'ajouter une bibliothèque externe à votre projet Arduino.

✓ **6 :** Ouvre le moniteur série, qui permet de lire les données envoyées par la carte Arduino et d'envoyer des données à la carte depuis l'ordinateur.

III.5.2 Le langage Arduino :

Pour écrire le programme sur l'interface Arduino et compiler le fichier hex du programme on passe par les étapes suivantes :

➢ **Ouvrir l'IDE Arduino :** Lancez l'IDE Arduino sur votre ordinateur.

➢ **Copier le code :** Copiez le code de votre programme dans l'IDE Arduino.

➢ **Vérifier le code :** Cliquez sur le bouton de vérification (checkmark) dans l'IDE pour vérifier que votre code ne contient pas d'erreurs de syntaxe.

➢ **Compiler le code :** Si le code est correct, cliquez sur le bouton "Téléverser" (flèche vers la droite) pour compiler le code. Cela va transformer votre code en un fichier hex.

➢ **Localiser le fichier hex :** Une fois la compilation terminée, le fichier hex sera généré dans un répertoire temporaire sur votre ordinateur. Vous pouvez trouver l'emplacement exact en regardant dans les préférences de l'IDE Arduino.

➢ **Copier le fichier hex :** Trouvez le fichier hex dans le répertoire temporaire et copiez-le dans l'emplacement souhaité pour le stocker ou le partager.

III.6 Réalisation :

Voici les étapes de réalisation de notre projet d'irrigation intelligente :

▪ **Définition des objectifs :** Identifions clairement les objectifs de notre projet, tels que l'automatisation de l'arrosage des plantes, la conservation de l'eau ou l'amélioration de la productivité agricole.

▪ **Conception du système :**

Concevons l'architecture globale de notre système d'irrigation intelligent. Définissons les composants de base tels que les capteurs d'humidité du sol, les capteurs de température, ainsi que les électrovannes et les tuyaux de distribution d'eau. En plus de l'unité ESP8266. Il est également important de déterminer comment ces éléments sont liés ensemble pour assurer un fonctionnement automatique, efficace et cohérent du système.

▪ **Acquisition des composants :** Procurons tous les composants nécessaires pour construire ce système. Assurons-nous d'avoir l'Arduino Uno, ESP8266, les capteurs, les vannes, les tuyaux, ainsi que tout autre matériel requis.

▪ **Assemblage des matériaux :** Assembler les composants selon le schéma de conception spécifié. Connectons les capteurs d'humidité et de chaleur du sol à l'Arduino Uno, fixons les vannes aux tuyaux et assurons-nous que tout est correctement fixé.

▪ **Programmation Arduino :** Écrivons le code nécessaire pour que l'Arduino contrôle le système d'irrigation en fonction des données du capteur. Programmons Arduino pour lire les niveaux d'humidité et de chaleur du sol, activer les vannes en conséquence, et ajuster les paramètres d'irrigation si nécessaire.

▪**Centre de données :** Le module ESP8266 envoie des données à stocker et traiter pour apparaître sur l'interface de l'application sous forme de graphiques, en plus de leur ordre, déterminé en comptant les jours et les semaines,,,,

▪ **Test et débogage :** Testons notre système pour nous assurer qu'il fonctionne correctement. Assurons-nous que les capteurs détectent correctement l'humidité du sol, la chaleur, que les vannes s'ouvrent et se ferment comme prévu, et que le système réagit de manière appropriée.

III.6-1 Conception d'un système Arduino UNO + ESP8266 avec contrôle à distance via RemoteXY

RemoteXY est une plateforme permettant de concevoir une interface graphique pour smartphone ou navigateur, afin de contrôler une carte Arduino à distance. L'intégration avec le module WiFi **ESP8266** et la connexion au **serveur Cloud RemoteXY** permet une gestion du système depuis n'importe quel endroit, sans configuration complexe du réseau local.

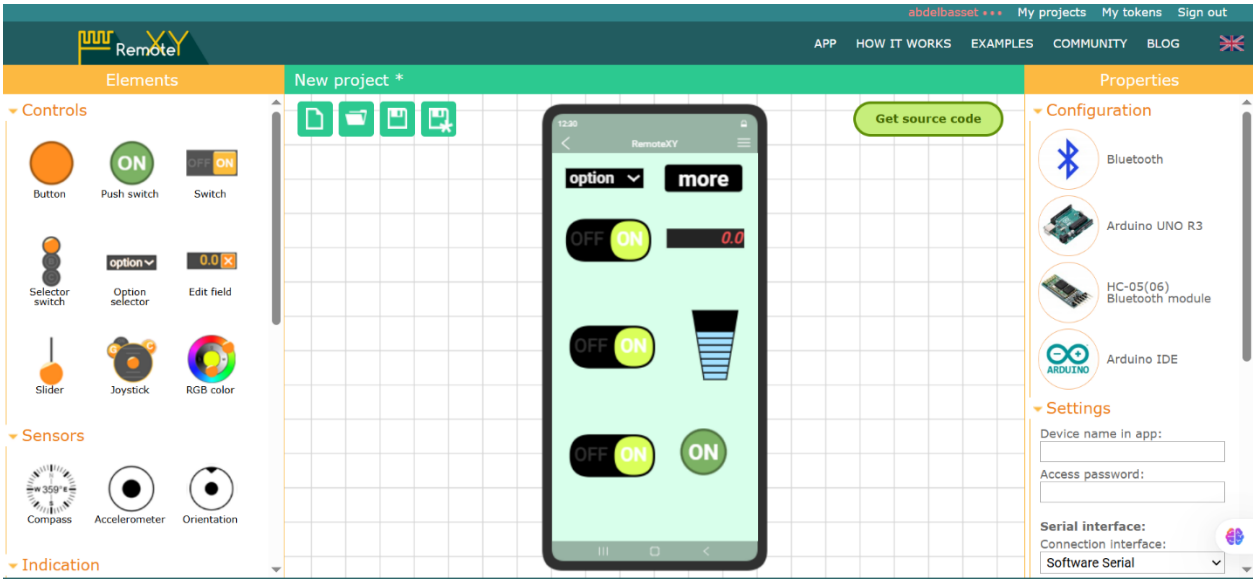


Figure III.8 : Interface RemoteXY

III.6.2- Étapes de mise en œuvre

III.6.2.1 Conception de l'interface utilisateur

Dans l'éditeur RemoteXY, l'utilisateur peut créer une interface graphique en glissant-déposant des éléments tels que des boutons, des indicateurs ou des curseurs, et les associer à des broches spécifiques d'Arduino (exemple : LED sur la broche 13).

III.6.2.2 Configuration du projet

Dans les paramètres du projet, on choisit les options suivantes :

- **Type de connexion** : Serveur Cloud
- **Carte** : Arduino UNO
- **Module WiFi** : ESP8266
- **Interface série** : Serial matériel (RX = 0, TX = 1) à 115200 bauds
- **Paramètres WiFi** : Nom du réseau (SSID) et mot de passe



Figure III.9 : Définissez les options de votre carte et la méthode de connexion

III.6.2.3 Génération du token

RemoteXY fournit un **jeton unique (Token)** lié à l'interface graphique. Ce token est inséré dans le code et utilisé lors de la connexion via l'application mobile.

№	Board name	Token	Device state	Server	Device port	App port	Actions
1	SMART FARME	9e8a105fefcce536bf490a9dc34d85c4	disconnected	cloud.remotexy.com	6376	6375	QR code Edit Delete

Figure III.10 : My could tokens

III.6.2.4 Génération du code source

Une fois l'interface finalisée, le code Arduino est généré automatiquement, incluant la bibliothèque RemoteXY. Celle-ci peut être ajoutée à l'IDE Arduino via le gestionnaire de bibliothèques ou manuellement sous format ZIP.

III.6.2.5 Connexion matérielle entre Arduino et ESP8266

Le module ESP8266 est connecté à la carte Arduino via l'interface série :

- TX de l'Arduino → RX de l'ESP8266
- RX de l'Arduino → TX de l'ESP8266 (avec diviseur de tension si nécessaire)

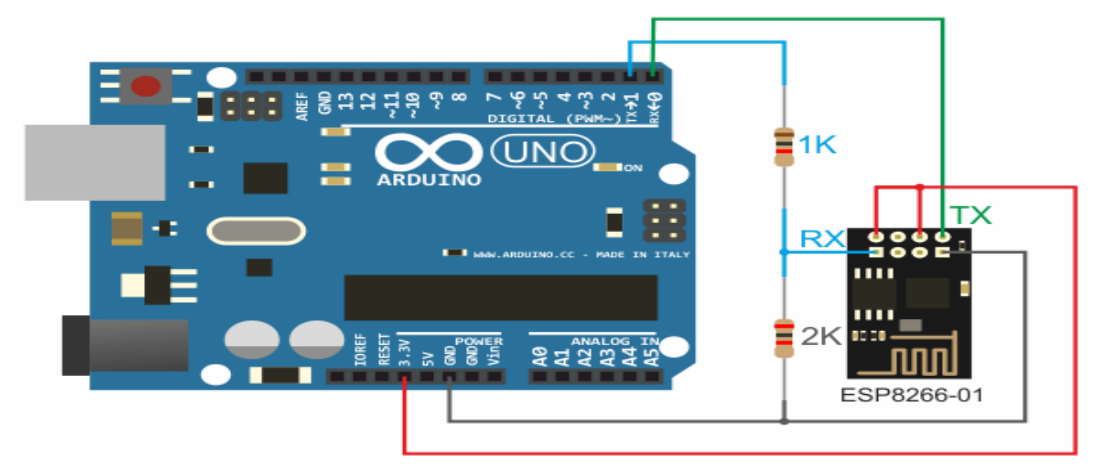


Figure III.11 : Schéma pour connecter ESP8266 à Arduino UNO via une interface série

III.6.2.6 Téléversement du code

Avant de téléverser le code sur Arduino, il est recommandé de déconnecter l'ESP8266 pour éviter les conflits sur la liaison série. Une fois le code chargé, reconnecter le module WiFi.

III.6.2.7 Connexion via l'application RemoteXY

Depuis l'application mobile RemoteXY, sélectionner le mode **"Cloud server"**, entrer le **Token**, et se connecter. L'interface conçue s'affiche et permet le contrôle en temps réel.

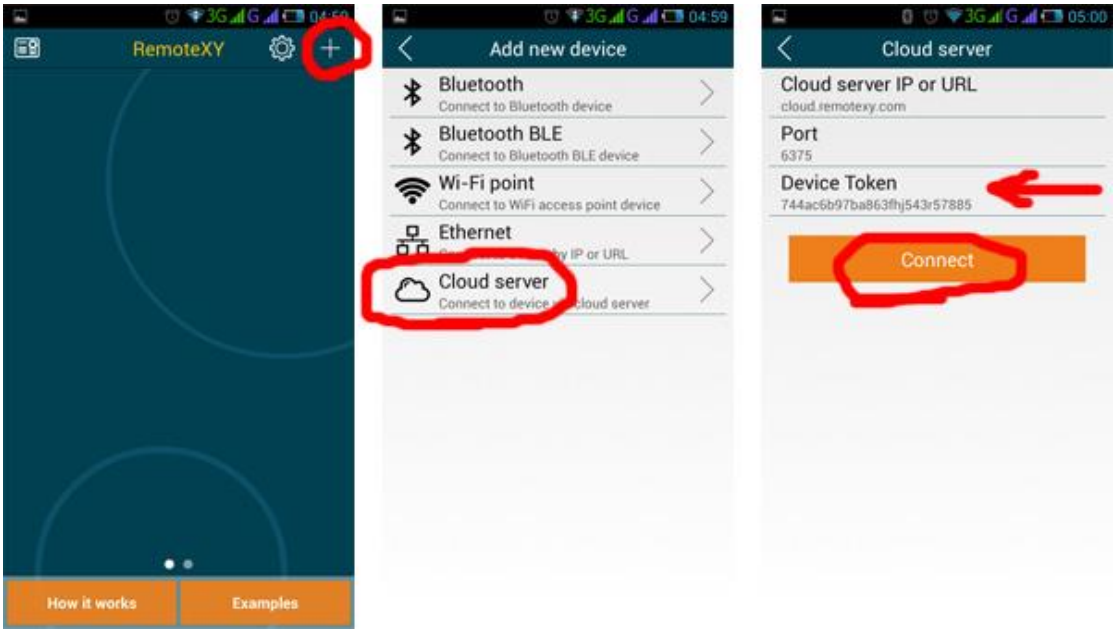


Figure III.12 : Connectez-vous au panneau en utilisant l'application mobile

III.7 Résultat

III.7.1 Code finale

```
#define REMOTEXY_MODE__ESP8266_HARDSERIAL_CLOUD
#include <RemoteXY.h>
#define REMOTEXY_SERIAL Serial
#define REMOTEXY_SERIAL_SPEED 115200
#define REMOTEXY_WIFI_SSID "YOUR_SSID"
#define REMOTEXY_WIFI_PASSWORD "YOUR_PASS"
#define REMOTEXY_CLOUD_SERVER "cloud.remotexy.com"
#define REMOTEXY_CLOUD_PORT 6376
#define REMOTEXY_CLOUD_TOKEN "990d2c6442e7d793b947303db7e30d39"

#include <Servo.h>
#include <EEPROM.h>
#include <DHT.h>

// ... باقي التعاريف وتهيئة RemoteXY ...
// ... بداية دالة setup() ...

void setup() {
  RemoteXY_Init();
  myservo.attach(5);
  pinMode(pin_water_pump, OUTPUT);
  // ... تهيئة المداخل والمخارج ...
  RemoteXY.edit_max_t_1 = EEPROM.read(100);
  // ... قراءة القيم المحفوظة من EEPROM ...
}

```

```
// ... بداية دالة loop() ...

void loop() {
  RemoteXY_Handler();
  myservo.write(RemoteXY.slider_water_valve * 1.8);

  float hum1 = dht1.readHumidity();
  float temp1 = dht1.readTemperature();
  float hum2 = dht2.readHumidity();
  float temp2 = dht2.readTemperature();

  // تحديث القيم المعروضة في الواجهة
  if (isnan(temp1)) strcpy(RemoteXY.text_temp_1, "Error!");
  else dtostrf(temp1, 0, 1, RemoteXY.text_temp_1);
  // ... نفس الشيء لباقي المتغيرات ...

  // مراقبة القيم وتشغيل/إطفاء المخرجات
  if (temp1 > max_t_1) digitalWrite(temp_1_pin, HIGH);
  if (temp1 < low_t_1) digitalWrite(temp_1_pin, LOW);
  // ... باقي الشروط ...

  // التحكم في المضخة يدويا
  digitalWrite(pin_water_pump, (RemoteXY.switch_water_pump == 0) ? LOW : HIGH);

  // إضاءة المؤشرات LEDs
  RemoteXY.led_water_pump_g = (digitalRead(pin_water_pump) == HIGH) ? 255 : 0;

  // عند الضغط على الزر حفظ القيم في EEPROM
  if (RemoteXY.button_save == 1) {
    digitalWrite(13, HIGH);
    RemoteXY.led_save_g = 255;
    EEPROM.update(100, RemoteXY.edit_max_t_1);
    // ... باقي التحديثات ...
    strcpy(RemoteXY.text_save, "saved");
    delay(2000);
  } else {
    digitalWrite(13, LOW);
    RemoteXY.led_save_g = 0;
    strcpy(RemoteXY.text_save, "");
  }
}
```

Figure III.13 : Code Final D'Arduino Uno

III.6.1.2 Test pratique :

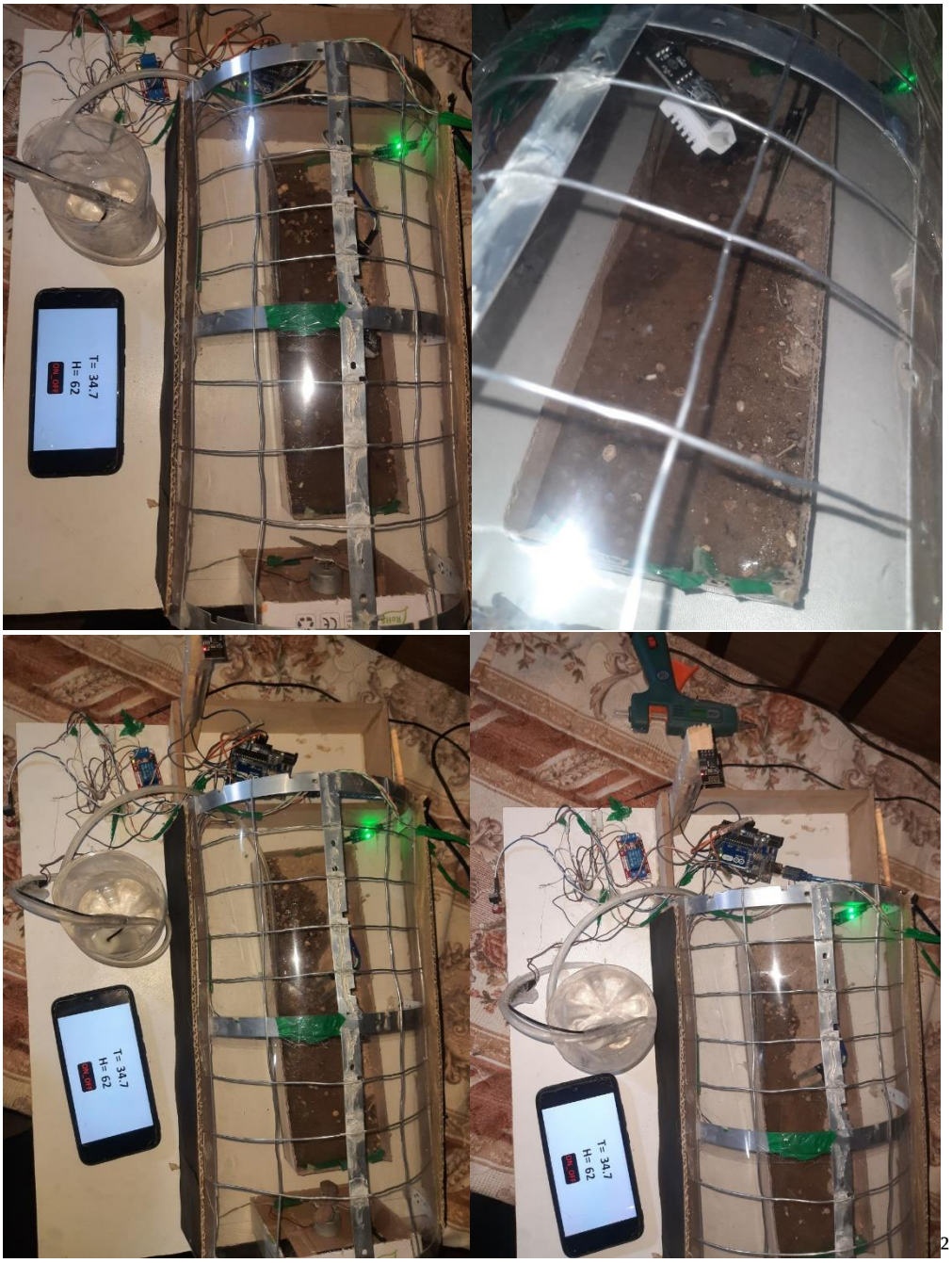


Figure III.2

Pour tester le système d'irrigation intelligent basé sur un panneau **Arduino UNO**, le module de communication **WiFi ESP8266** et l'interface de contrôle **RemoteXY**, nous suivons les étapes suivantes pour vérifier l'intégrité de l'installation et l'efficacité des performances :

1. Vérifier les connexions électriques

Nous commençons par assurer la connexion correcte de tous les composants : capteur d'humidité, capteur de chaleur (tel que LM35 ou DHT11), unité de relais, pompe à eau et unité ESP8266, en fonction de la disposition électronique du système.

2. Télécharger le logiciel

Le logiciel est téléchargé sur la carte Arduino à l'aide du logiciel Arduino IDE, et ce logiciel inclut une logique intelligente pour interagir avec les données des capteurs sans dépendre de seuils fixes, permettant une plus grande flexibilité dans la prise de décisions.

3. Configurer l'interface de contrôle via RemoteXY

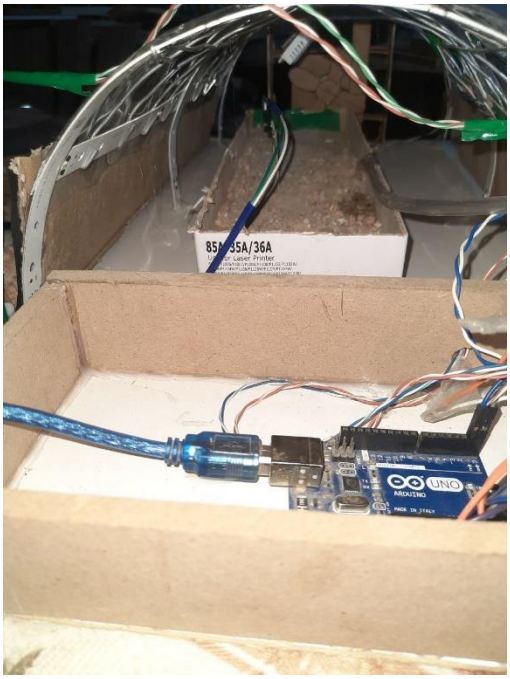
Nous concevons une interface graphique via la plateforme RemoteXY, qui comprend des indicateurs de lecture des capteurs et des boutons de contrôle de la pompe, puis nous générons le code intégré et nous le relions à la carte via ESP8266 en utilisant la connexion au Cloud (Cloud Server).

4. Installer des capteurs dans le sol

Le capteur d'humidité est placé directement dans le sol agricole, et le capteur de chaleur est dans une position appropriée pour surveiller les températures ambiantes ou du sol.

5. Fonctionnement du système via l'alimentation électrique

L'alimentation est connectée pour alimenter tout le système, activant le traitement et initiant la collecte de données à partir des capteurs.





6. Surveillance des données à distance

Grâce à l'application RemoteXY sur un smartphone, les valeurs environnementales réelles peuvent être visualisées en temps réel, et la pompe peut être activée ou désactivée manuellement si nécessaire.

7. Test d'interaction intelligente

La réponse de la pompe est automatiquement surveillée lorsque les conditions d'humidité ou de température changent, lorsque le système allume ou éteint la pompe selon l'analyse interne du logiciel sans se baser sur des valeurs prédéterminées.

8. Surveiller le système pendant longtemps

Nous suivons le fonctionnement du système sur une période de temps pour assurer la précision de la réponse et l'efficacité de la distribution d'eau de manière intelligente et économique, sans avoir besoin d'intervention manuelle continue.

9. Analyse des résultats et évaluation de la performance

En fin de compte, nous analysons le comportement du système sur la base des lectures et des données enregistrées, évaluant son efficacité pour réduire le gaspillage d'eau et obtenir une réponse agricole intelligente.

10. Ajuster les paramètres intelligents et la configuration

Si nécessaire, les paramètres du système peuvent être modifiés directement via l'interface de l'application RemoteXY, par exemple en changeant la fréquence des opérations d'arrosage ou en activant/désactivant le fonctionnement manuel de la pompe. Comme le système ne repose pas sur des seuils d'humidité fixes, l'ajustement est basé sur l'analyse dynamique des données des capteurs, ce qui offre une grande flexibilité pour améliorer le comportement du système en fonction de la nature du sol et du climat

11. Conclusion et évaluation

Sur la base des résultats des tests sur le terrain, les performances du système peuvent être évaluées pour sa précision dans la réponse aux exigences de l'usine, son efficacité en matière de consommation d'eau et sa facilité de contrôle à distance. Le système a démontré une grande adaptabilité aux variables environnementales, grâce à l'intégration entre la carte Arduino, les capteurs de température et d'humidité, le module de communication **ESP8266** et la plateforme **RemoteXY** pour le contrôle du Cloud. De cette expérience, cette solution peut être considérée comme un exemple réussi d'application des techniques agricoles intelligentes dans le but d'optimiser l'utilisation des ressources

En suivant ces étapes systématiques, nous pouvons vérifier" l'efficacité du système d'irrigation intelligent et identifier tout déséquilibre opérationnel potentiel qui justifie une "modification ou une amélioration.

III.7 Conclusion

Dans cette section, nous avons mis en place un système d'irrigation intelligent qui fonctionne automatiquement à l'aide du panneau Arduino UNO couplé au module de communication WiFi ESP8266. La carte Arduino a été chargée de collecter des données provenant de capteurs d'humidité et de température du sol, puis de les analyser pour prendre des décisions intelligentes sur l'activation ou non de pompes à eau sans se fier à des seuils fixes.

Les expériences ont été réalisées dans un environnement agricole réel, en insérant les capteurs dans le sol et en connectant les composants électriques comme prévu. La plateforme RemoteXY nous a permis de surveiller les valeurs environnementales et d'exploiter le système automatiquement ou manuellement à distance, en utilisant une interface graphique via un smartphone. Ces expériences visent à évaluer l'efficacité du système pour répondre aux besoins en eau des plantes de manière précise et flexible, tout en réduisant le gaspillage dans les ressources en eau.

Conclusion Générale

Conclusion Générale

1. Contexte général du projet

Face aux pressions croissantes liées aux changements climatiques, à la raréfaction des ressources hydriques et à la nécessité d'une agriculture plus efficiente, la gestion intelligente de l'irrigation s'impose aujourd'hui comme une priorité stratégique. Ce travail s'inscrit dans cette dynamique en proposant la conception et la réalisation d'un système automatisé d'irrigation basé sur les technologies de l'Internet des Objets (IoT) et les microcontrôleurs à faible consommation, tout en tenant compte de la réalité du terrain algérien.

2. Apports du travail réalisé

Ce mémoire a permis d'explorer, dans un premier temps, les différentes techniques d'irrigation classiques et modernes, en mettant en lumière les limites des systèmes conventionnels en termes de gaspillage d'eau et de manque de précision. Par la suite, nous avons présenté une solution technologique basée sur l'utilisation d'un Arduino UNO associé à un module ESP8266, appuyé par des capteurs d'humidité et de température, afin d'assurer une gestion dynamique, autonome et économe du processus d'irrigation.

3. Implémentation et résultats obtenus

La partie expérimentale a permis de valider l'architecture proposée. Grâce à un algorithme de prise de décision conditionnelle, le système déclenche automatiquement l'irrigation uniquement lorsque les conditions du sol l'exigent. Une interface de supervision à distance via RemoteXY a également été intégrée, permettant à l'utilisateur de contrôler le système en temps réel via un smartphone ou un navigateur. Les résultats obtenus ont montré :

- Une réduction significative de la consommation d'eau (jusqu'à 50 % dans certains cas),
- Une meilleure régularité des apports hydriques,
- Une simplification notable de la gestion quotidienne pour l'agriculteur.

4. Limites rencontrées

Comme tout projet technique, certaines limites ont été identifiées au cours du développement :

- La portée restreinte du WiFi dans les zones rurales,
- La sensibilité de certains capteurs à l'humidité ambiante ou aux sols salins,
- La nécessité d'un calibrage précis des seuils pour éviter les erreurs de déclenchement.

5. Perspectives d'évolution

Plusieurs pistes d'amélioration peuvent être envisagées dans le futur :

- Intégration de l'intelligence artificielle pour prédire les besoins hydriques des plantes,
- Passage à des microcontrôleurs plus puissants comme l'ESP32 pour plus de flexibilité,
- Utilisation de la communication LoRaWAN pour les grandes exploitations agricoles,
- Alimentation du système via panneaux solaires pour garantir une autonomie énergétique totale,
- Développement d'une application mobile dédiée, avec notifications et tableaux de bord interactifs.

6. Impact et valeur ajoutée du projet

Le système proposé constitue une solution réaliste, évolutive et à faible coût, parfaitement adaptée aux besoins des agriculteurs algériens dans un contexte de transition vers l'agriculture intelligente. Il permet non seulement d'optimiser l'usage de l'eau, mais aussi de réduire les charges opérationnelles et d'améliorer la productivité des cultures.
Sur le plan académique, ce projet a permis de mettre en œuvre des compétences transversales en électronique, en programmation embarquée, en communication sans fil et en gestion de projet, consolidant ainsi notre formation d'ingénieur et préparant le terrain pour une insertion professionnelle dans des domaines d'avenir.

BIBLIOGRAPHIE

BIBLIOGRAPHIE

BIBLIOGRAPHIE

[1] Encyclopedia of Smart Agriculture Technologies. Springer, 2022.

[2] Bhattacharyya et al. Climate Smart Agriculture. Springer, 2020.

[3] Frühauf et al. KULUNDA : Climate Smart Agriculture. Springer, 2020.fonction-d-arrosage.html

[4] Dankan Gowda et al. Smart Agriculture and Smart Farming using IoT Technology. Journal of Physics: Conference Series, 2021.agrofibre-spunbond-systeme- irrigation_15990672.htm

[5] https://fr.blog.sencrop.com/choisir-son-systeme-dirrigation/

[6] Avantages des systèmes d'irrigation automatique Pakeerathan. Smart Agriculture for Developing Nations. 2023.

[7] Smart IRRIGATION WITH REAL TIME WEATHER…. IJNRD, 2023.

[8] Gilarranz et al. Intelligent Irrigation System Based on Arduino. arXiv, 2018.

[9] Résultats expérimentaux & Évaluation

Karar et al. Test fields avec drones + IoT pour irrigation intelligente

[10] https://www.microdrips.com/fr/blogue/arrosage-goutte-a-goutte/micro-irrigation/

[11] https://www.agri-tech.tn/economiser-leau-avec-une-irrigation-intelligente/

[12] **IEEE Explore** – مقالات بحثية حول تقنيات الري الذكي باستخدام Arduino وESP8266 https://ieeexplore.ieee.org.

[13] https://www.arduino-france.com/review/arduino-uno/

[14] Barooah, P. Smart agriculture policy design. 2023.

[15] Limitations et Contraintes

[16] Automatic Irrigation System Using Arduino Uno. IJPREMS, Août 2023https://www.gotronic.fr/blog/guides/arduino/

[17] Connexion ESP8266 – Arduino

RemoteXY.com. Documentation technique : communication série et configuration.

[18] Mémoire de la fin d'étude Master Instrumentation sous le titre Système **d'Irrigation Automatique Avec Arduino** 2023/2024 Ain Témouchent