الجـــــــــــــــــمـهـوريـــــة الجـــــــــــــزائـريـة الديمـــــــقـراطيـة الـشـــــــــعبيـة

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التـــــــــــــــــــــــــــعـليـم العـــــــالي و البـــــــــحث العـــــلـمـــي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جـــــــــــــامعة أبي بكـــر بـلـقـايد – تـلمســـــــــــــان –

Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen –

Faculté de TECHNOLOGIE

MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme** de **MASTER**

En : **Electronique**

Spécialité : **Instrumentation**

Par : **DARI MOHAMMED ANES & OUHADJ OUALID**

Sujet

Optimisation Agricole par IoT

Soutenu publiquement, juin 2026 , devant le jury composé de :

Mme KADDOURI NADERA	MCB	Université de Tlemcen	Président
Mr AHMED AMINE EL OUCHDI	MCB	Université de Tlemcen	Examinateur
Mme GHEFIR FATIHA DJAZIA	MAA	Université de Tlemcen	Encadreur

Année universitaire : 2025/2026

Résumé

Ce travail de Master, nommé « Optimisation Agricole par IoT », propose une stratégie technologique destinée à moderniser le système d'irrigation en Algérie face au risque du stress hydrique. Le système se base sur le concept de l'IoT (Internet des Objets).

L'architecture matérielle se base sur une carte Arduino Méga 2560 connectée à des capteurs qui mesurent l'humidité du sol, la température et le niveau d'eau. L'élaboration d'un algorithme de gestion qui privilégie la protection de la motopompe (éviter la marche à vide et la cavitation) avant d'autoriser l'arrosage automatique.

Le module SIM808 assure la transmission de données au Cloud ThingSpeak, qui permet une analyse via MATLAB pour une prise de décisions automatisées, tout en améliorant à la fois la productivité et la rentabilité des exploitations. En parallèle, une application mobile nommée **IRRIGATION**, conçue grâce à MIT App Inventor, propose une supervision à distance facile et pratique, et qui permet le switch entre le mode automatique et manuel. Ce modèle assure une gestion durable des ressources tout en optimisant les performances agronomiques.

Abstract

This Master's thesis, titled "Agricultural Optimization thru IoT," proposes a technological strategy aimed at modernizing the irrigation system in Alegria in the face of the risk of water stress. The system is based on the concept of IoT (Internet of Things).

The hardware architecture is based on an Arduino Méga 2560 board connected to sensors that measure soil moisture, temperature, and water level. The development of a management algorithm that prioritizes the protection of the motor pump (avoiding dry running and cavitation) before allowing automatic irrigation.

The SIM808 module ensures data transmission to the ThingSpeak Cloud, which allows for analysis via MATLAB for automated decision-making, while simultaneously improving both the productivity and profitability of the farms. In parallel, a mobile application named IRRIGATION, designed using MIT App Inventor, offers easy and convenient remote supervision, allowing for a switch between automatic and manuel mode. This model ensures sustainable resource management while optimizing agronomic performance.

ملخص

تتضمن هذه الرسالة الجامعية ، بعنوان "تحسين الزراعة من خلال إنترنت الأشياء"، استراتيجية تكنولوجية تهدف إلى تحديث نظام الري في الجزائر في مواجهة خطر الإجهاد المائي يعتمد النظام على مفهوم إنترنت الأشياء (IoT) .

تعتمد البنية التحتية المادية على لوحة Arduino Méga 2560 المتصلة بأجهزة استشعار تقيس رطوبة التربة ودرجة الحرارة ومستوى المياه. تطوير خوارزمية إدارة تعطي الأولوية لحماية مضخة المحرك (تجنب التشغيل الجاف والتجويف) قبل السماح بالري التلقائي.

يضمن وحدة SIM808 نقل البيانات إلى سحابة ThingSpeak، مما يسمح بالتحليل عبر MATLAB لاتخاذ القرارات الآلية، بينما يحسن في الوقت نفسه كل من إنتاجية وربحية المزارع. بالتوازي، يوفر تطبيق موبايل يسمى IRRIGATION ، تم تصميمه باستخدام MIT App Inventor ، يشمل إشرافًا عن بُعد سهلًا ومريحا، ويتيح التبديل بين الوضعين الآلي واليدوي. يضمن هذا النموذج إدارة مستدامة للموارد مع تحسين الأداء الزراعي.

Remerciements

Tout d'abord, nous voudrions remercier **Allah** Tout-puissant de nous avoir donné la force et la patience et capacité qu'Il m'a donnée d'accomplir ce projet.

Je remercie particulièrement mon encadrant**, Mme GHEFIR Fatiha Djazia**, pour son aide dans la réalisation de ce projet, pour ses précieux conseils et pour sa générosité à me faire profiter de son expérience dans l'organisation du travail et l'amélioration de sa qualité.

Nous tenons à exprimer nos sincère gratitude à la présidente de jury, Mme **KADDOURI NADERA,** de nous avoir fait l'honneur d'examiner notre travail.

Je remercie également **Mr AHMED AMINE EL OUCHDI** pour l'honneur qu'il m'a fait en acceptant d'être l'examinateur de ce travail. Je le remercie chaleureusement pour le temps consacré à l'évaluation de ce mémoire et pour les précieuses remarques qu'il y apportera.

Enfin, Je voudrais remercier toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à mes recherches et à l'élaboration de ce mémoire.

Merci.

Dédicace

À toutes les personnes qui ont marqué ma vie par leur présence, leur soutien et leur confiance, je dédie ce modeste travail.

À ma tendre mère :

Le pilier de ma vie, ma première école et ma source d'inspiration éternelle. Aucun mot ne saurait exprimer ma gratitude pour ta patience infinie et ta confiance inébranlable.

À mon cher père :

Mon premier soutien, mon guide et le modèle de force qui m'a appris à persévérer. Ce travail est le reflet de tes sacrifices silencieux.

À ma famille :

Pour son affection, ses encouragements constants, et sa présence précieuse dans les moments les plus importants de mon parcours.

À mes enseignants :

Pour avoir partagé leur précieux savoir et pour avoir contribué à forger les connaissances qui m'ont permis d'arriver jusqu'ici.

À mes amis et camarades :

Avec qui j'ai partagé les défis, les doutes, mais aussi les plus beaux souvenirs de ces années universitaires.

À tous ceux qui ont cru en moi :

Près ou de loin, pour leur soutien, leur confiance et leur bienveillance qui ont laissé une empreinte indélébile dans mon parcours.

DARI MOHAMMED ANES

Dédicaces

À ma tendre mère :

En reconnaissance de ses sacrifices, de sa patience et de ses prières qui m'ont permis de mener à bien mes études.

À mon cher père :

Pour ses grands sacrifices, sa rigueur, et son soutien moral et matériel tout au long de mon cursus universitaire. Vous êtes mon modèle de persévérance.

À mes frères et sœurs :

Pour leur présence constante, leurs encouragements précieux et leur soutien inconditionnel.

À mes proches et amis :

Près ou loin, pour leur amour, leurs encouragements et leur bienveillance.

OUHADJ OUALID

Table des matières

Introduction Générale **1**

I Principes de l'IoT et défis de l'agriculture de précision **3**
I.1 Introduction 4
I.2 L'Internet des objets (IoT) 4
I.2.1 Définition de l'internet des objets 4
I.2.2 Applications de l'IoT dans divers secteurs 5
I.3 L'irrigation : concepts, techniques et enjeux 6
I.3.1 Définition générale de l'irrigation 6
I.3.2 Types d'irrigation 6
I.3.3 Gestion traditionnelle de l'irrigation 10
I.3.4 Problématiques actuelles de l'irrigation 10
I.4 Application de l'IoT dans l'agriculture de précision 10
I.4.1 Les technologies primordiales de l'agriculture intelligente 11
I.4.2 Exemples d'applications de l'IoT en agriculture 14
I.5 Conclusion 15

II Généralités et architecture IoT **16**
II.1 Introduction 17
II.2 Hardware (partie matérielle) 17
II.2.1 Carte Arduino 17
II.2.2 Types de capteurs utilisés (sensors) 23
II.2.3 Module SIM808 (GSM/GPRS/GPS) 25
II.2.4 Afficheur LCD 16x2 26
II.2.5 Relais 28
II.2.6 La plaque d'essai 28
II.2.7 Les fils de liaisons 29
II.3 Software (partie logiciels) 29
II.3.1 Proteus 8 Professional 29
II.3.2 Environnement Arduino IDE 30
II.3.3 Plateforme ThingSpeak 30
II.3.4 MIT App inventor 31
II.4 Conclusion 32

III Mise en œuvre de l'Architecture IoT **33**
III.1 Introduction 34
III.2 Cahier des charges 34
III.2.1 Sécurisation de la pompe et surveillance du réservoir 35
III.2.2 Gestion de l'irrigation (humidité du sol) 36
III.3 Simulation 37
III.3.1 Affectation des broches (mapping des pins) 38
III.3.2 Schéma synoptique global 39
III.4 Présentation des résultats de la pratique et simulations 39
III.4.1 Capteur de température et d'Humidité ambiante (DHT11) 40
III.4.2 Capteur d'Humidité du sol 41
III.4.3 Capteur ultrasonique (HC-SR04) (Niveau du Réservoir d'eau) 42
III.4.4 Module de communication GSM/GPRS (SIM808) 43
III.5 Supervision et Interfaces Logicielles 44
III.5.1 Supervision locale permanente 45
III.5.2 stockage dans Cloud et optimisation IoT (ThingSpeak & MATLAB) 45
III.5.3 Supervision mobile 47
III.6 Conclusion du chapitre 50

Conclusion général et perspective **51**

Bibliographie **53**

Table des figures

I.1 Internet of things 4
I.2 Les domaines d'application de l'Internet des objets (IoT) 5
I.3 Système d'irrigation par surface (gravitaire) [21] 7
I.4 Système d'irrigation par aspersion [22] 8
I.5 Système d'irrigation par goutte-à-goutte [23] 9
I.6 Système d'irrigation par micro-aspersion [24] 9
I.7 Classification des technologies de communication sans fil [13] 11

II.1 La carte Arduino UNO 18
II.2 La carte Arduino Due 19
II.3 La carte Arduino Leonardo 19
II.4 La carte Arduino Mega2560 20
II.5 Description de la carte Arduino 21
II.6 Bloc d'alimentation pour la carte Arduino Mega 21
II.7 Microcontrôleur ATmega1280 22
II.8 Le capteur DHT11 23
II.9 Le capteur d'humidité du sol (hygromètre) 24
II.10 Le capteur ultrason 24
II.11 Détails opérationnels du capteur ultrasonique HC-SR04 25
II.12 Le module SIM808 (GSM/GPRS/GPS) 26
II.13 L'afficheur LCD 16x2 26
II.14 Le module I2C 27
II.15 Relais 28
II.16 La plaque d'essai 28
II.17 Les fils de liaisons 29
II.18 L'environnement Arduino IDE 30
II.19 Logo App Inventor 31
II.20 La fenêtre Designer 31
II.21 La fenêtre blocks 32

III.1 L'organigramme du travail 37
III.2 Schéma synoptique global 39
III.3 Circuit électronique 39
III.4 Capteur DHT11 via simulation 40
III.5 Capteur DHT11 via réalisation 40
III.6 Capteur Soil Moisture via simulation 41
III.7 Affichage de l'humidité du sol 42

III.8 affichage du niveau d'eau du réservoir 43
III.9 Configuration numéro téléphone 44
III.10L'affichage via l'écran LCD 45
III.11Les figures via ThingSpeak 46
III.12Le programme MATLAB via ThingSpeak 47
III.13Interface Designer d'application 48
III.14Commande de forçage (Allumer/Éteindre) de la pompe par SMS 49

Liste des tableaux

I.1 Comparaison des technologies de réseau IoT à courte et longue [13] 13

II.1 Description des broches de l'écran LCD 16x2 27
II.2 Fonction des broches du bus I2C 27

III.1 Évaluation des Risques Opérationnels [36] 35
III.2 Mapping des pins 38

Abréviation

Abréviation	Signification
ONU	Organisation des Nations Unies
IA	Intelligence Artificielle
IoT	Internet of Things
AIoT	Artificial Intelligence of Things
Wi-Fi	Wireless Fidelity
LPWAN	Low Power Wide Area Network
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
BLE	Bluetooth Low Energy
GPS	Global Positioning System
GNSS	Global Navigation Satellite System
GSM	Global System for Mobile Communications
GPRS	General Packet Radio Service
TCP	Transmission Control Protocol
IP	Internet Protocol
HTTP	HyperText Transfer Protocol
IDE	Integrated Development Environment
USB	Universal Serial Bus
PC	Personal Computer
EEPROM	Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory
SRAM	Static Random Access Memory
PWM	Pulse Width Modulation
ICSP	In-Circuit Serial Programming
RESET	Reset Signal
RAM	Random Access Memory
LED	Light Emitting Diode
SMS	Short Message Service
TTFF	Time To First Fix
SDA	Serial Data Line
SCL	Serial Clock Line
API	Application Programming Interface
SIM	Subscriber Identity Module
VIN	Voltage Input
GND	Ground
INT	Interrupt
DC	Direct Current

Introduction Générale

L'agriculture actuelle se trouve confrontée à un défi majeur : accroître la qualité et la quantité de la production alimentaire pour répondre à l'ambition des Nations Unies (ONU) d'éliminer la faim, tout en adoptant des pratiques de développement durable. Dans ce contexte.
l'apparition de l'agriculture intelligente (Smart Agriculture) représente une évolution profonde, passant d'une gestion standardisée à une gestion personnalisée des exploitations. Cette technologie permet de convertir des données environnementales brutes en décisions automatisées et intelligentes, optimisant ainsi l'utilisation des ressources essentielles comme l'eau et l'énergie.
L'irrigation est le pilier central de la croissance végétale, particulièrement dans les régions arides, dans certaines régions de l'Algérie, exemple Tlemcen, où les ressources hydriques sont limitées. Cependant, la gestion traditionnelle de l'irrigation, basée sur l'expérience pratique ou des calendriers fixes, montre aujourd'hui ses limites : elle ignore les besoins réels des cultures en temps réel, provoquant un gaspillage d'eau massif, une surconsommation énergétique et une dégradation de la fertilité des sols par lessivage des nutriments. Face à la crise climatique et à l'épuisement des nappes phréatiques, il devient impératif d'adopter des systèmes d'irrigation intelligents capables d'ajuster l'apport en eau selon les besoins spécifiques de la plante et les conditions climatiques.
Le présent projet s'inscrit dans cette dynamique d'innovation en proposant la conception et la réalisation d'un prototype d'irrigation intelligente et de gestion de l'eau. Ce système repose sur une architecture matérielle robuste utilisant la carte Arduino Mega 2560, complétée par un réseau de capteurs mesurant l'humidité du sol, la température ambiante et le niveau du réservoir. et grâce à une connectivité hybride via le module SIM808, les données sont transmises vers le cloud ThingSpeak pour une analyse avancée par MATLAB Analysis, permettant une supervision à distance via une application mobile dédiée. L'objectif est de garantir une gestion durable de l'eau tout en protégeant les infrastructures, notamment par la sécurisation de la pompe contre la marche à sec.
Pour présenter ce travail, notre mémoire est structuré en trois chapitres principaux :

- Le premier chapitre : est consacré aux généralités et aux concepts fondamentaux. Il définit l'IoT, tout en explorant les différentes techniques d'irrigation et les enjeux de l'agriculture de précision face aux problématiques hydriques actuelles.
- Le deuxième chapitre : décrit l'architecture globale du système. Il détaille l'ensemble des composants matériels utilisés (hardware), tels que la carte Arduino et les capteurs, ainsi que l'environnement logiciel (software) incluant l'IDE Arduino, la plateforme ThingSpeak et l'outil de développement mobile MIT App Inventor.
- Le troisième chapitre : porte sur la réalisation pratique et la mise en œuvre du projet. Il expose le cahier des charges, les simulations réalisées sous Proteus, l'implémentation des algorithmes de contrôle, ainsi que l'analyse des résultats obtenus via les interfaces de supervision locale, cloud et mobile.

Ce projet ambitionne ainsi de fournir une solution concrète pour l'optimisation des ressources hy-

driques, garantissant à la fois la pérennité des équipements de pompage et l'efficience agronomique.

Chapitre I

Principes de l'IoT et défis de l'agriculture de précision

I.1 Introduction

La progression actuelle des systèmes de production de base est caractérisée par une fusion numérique inédite, qui révèle une différence considérable avec les méthodes d'exploitation traditionnelles.
L'agriculture intelligente est essentielle pour augmenter la qualité et la quantité de la production alimentaire, ce premier chapitre vise à établir le cadre conceptuel indispensable à la compréhension des écosystèmes numériques dans le contexte rural. L'Internet des objets (IoT), propose des réponses encourageantes pour l'optimisation des processus agricoles par le biais de systèmes intelligents dans le cadre de l'agriculture intelligente. Ces systèmes offrent une surveillance, y compris le sol, la météorologie et l'état des cultures, et aussi une gestion efficace englobant l'eau, la récolte, le contrôle des maladies, l'énergie et la gestion des chaînes d'approvisionnement.

I.2 L'Internet des objets (IoT)

I.2.1 Définition de l'internet des objets

L'Internet des objets (IoT) se réfère à un réseau d'objets concrets dotés de capteurs, de programmes et de systèmes de communication qui leur permettent de se relier à Internet pour la collecte et la diffusion de données. Ces appareils sont capables d'échanger de l'information, ont la capacité de communiquer les uns avec les autres avec des systèmes informatiques et permettent de relier le monde physique au monde numérique en utilisant des capteurs intelligents.
L'utilisation des plateformes de traitement de données et des réseaux de communication, ce qui leur permet d'examiner leur milieu ambiant et de fournir des informations pertinentes pour la gestion et l'amélioration de diverses procédures.
Cette technologie est aujour d'hui utilisée dans plusieurs domaines tels que l'industrie, la santé, les villes intelligentes et, surtout, l'agriculture [1].

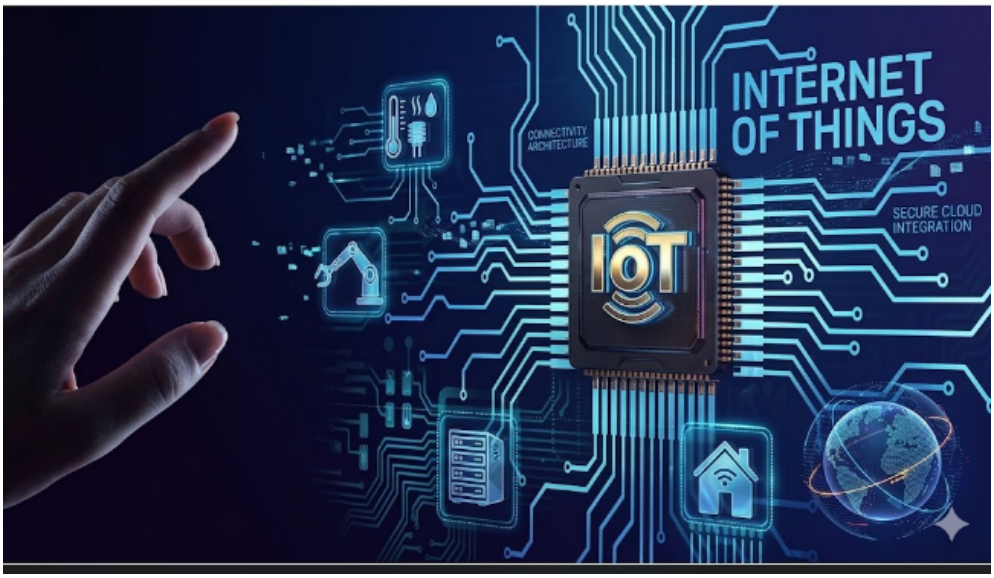


FIGURE I.1 – Internet of things

I.2.2 Applications de l'IoT dans divers secteurs

La croissance de l'Internet des objets (IoT) est remarquable et il s'affirme désormais comme un composant technologique essentiel dans différents secteurs d'activité. L'IoT change radicalement notre méthode de gestion des ressources, de prise de décisions et d'automatisation des procédures grâce à la liaison d'équipements matériels et à la collecte de données en temps réel via des capteurs [2].
L'Internet des objets (IoT) se présente comme un outil technologique essentiel dans différents secteurs, mais quatre domaines se distinguent clairement grâce à leur évolution rapide et leur impact majeur.

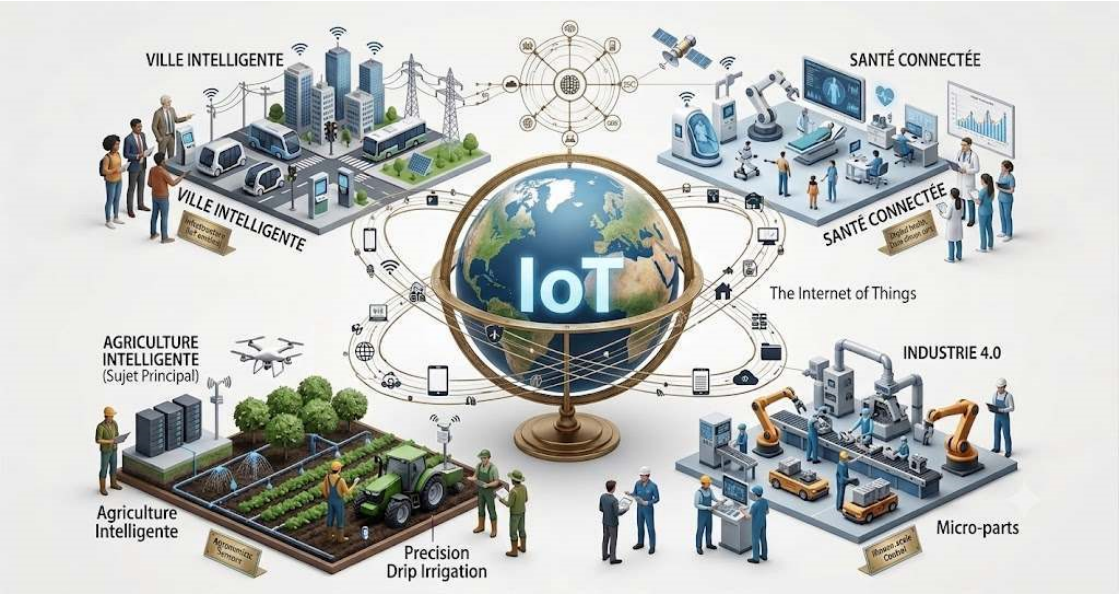


FIGURE I.2 – Les domaines d'application de l'Internet des objets (IoT)

a) Santé intelligente : Dans le domaine médical, l'IoT interconnecte les équipements et les capteurs de santé, pour garantir un suivi continu des patients. Cette technique favorise le suivi à distance, réduit le temps de réponse des équipes médicales et améliore la précision des diagnostics [2]. Et les dispositifs portatifs collectent les paramètres vitaux et transmettent ces informations à des plateformes dans le cloud, ainsi qu'à des applications sur smartphone, avec des alertes préventives, pour assurer une supervision médicale constante.

b) Industrie 4.0 (Industrie intelligente) : L'Internet des objets a transformé radicalement le secteur industriel et les processus de production en liant les équipements et les installations. Cela a permis d'améliorer les méthodes de travail, la prévision des pannes, l'augmentation de la productivité générale et l'automatisation des tâches par les systèmes robotiques pour l'optimisation, la précision et l'efficacité [1]. On utilise des réseaux des réseaux de communication d'une grande fiabilité et des plateformes de stockage performantes[4].

c) Les Maisons intelligentes (Smart Homes) : L'intégration de cette technologie connectée dans le domaine domotique a permis aux habitants de gérer à distance et de manière centralisée leurs appareils domestiques (tels que les éclairages, les climatiseurs et les systèmes de sécurité) grâce à des applications installées aux smartphones[5], s'appuyant sur des connexions sans fil comme le Wi-Fi, le Bluetooth ou le Zigbee. Ces informations sont par la suite définies pour permettre aux algorithmes d'adapter le fonctionnement du logement basé sur les comportements et les préférences des résidents.

d) L'agriculture intelligente (Smart Agriculture) : L'agriculture intelligente, également connue sous le nom de smart agriculture, est l'un des secteurs les plus prometteurs pour l'application de l'IoT [3]. Elle représente le passage d'une gestion standardisée à une gestion personnalisée, où chaque action est bien ajustée afin d'optimiser les ressources, d'accroître les productions et de limiter l'empreinte environnementale [6].

I.3 L'irrigation : concepts, techniques et enjeux

I.3.1 Définition générale de l'irrigation

L'irrigation, technique agricole artificielle d'approvisionnement en eau pour les cultures, pallie le déficit pluviométrique naturel. Elle est essentielle à la croissance des plantes, notamment dans les régions arides ou peu pluvieuses aux ressources en eau limitées [7].
L'IoT dans l'agriculture moderne présente une technologie d'irrigation intelligente, qui se base sur l'acquisition et l'analyse de données comme l'humidité du sol, la température et les éléments climatiques. Cette méthode optimise l'efficience en matière d'eau et améliore les productivités agricoles.

I.3.2 Types d'irrigation

Il existe plusieurs méthodes d'irrigation utilisées en agriculture. Chaque méthode présente des avantages et des inconvénients selon le type de culture, le sol et les conditions climatiques [7].

a) Irrigation de surface (gravitaire) :
L'irrigation gravitaire, consistant à diriger l'eau sur le sol via des canaux, c'est une méthode simple et économique pour de grandes exploitations. mais elle présente des inconvénients : forte perte d'eau par évaporation, difficultés de gestion du volume d'eau, risque de déplacement des nutriments et nécessité d'un sol plat et uniforme[7][8].



FIGURE I.3 – Système d'irrigation par surface (gravitaire) [21]

.

b) Irrigation par aspersion :
L'irrigation par aspersion est une technique d'irrigation consistant à disperser l'eau en gouttes artificielles à l'aide de jets d'eau sous pression [7]. Cette méthode d'irrigation offre une distribution uniforme de l'eau et permet une grande flexibilité pour diverses productions. Elle facilite l'intégration de systèmes automatisés, mais présente des inconvénients, notamment un coût d'équipement élevé, une consommation énergétique importante, elle est sensible aux facteurs météorologiques (vent, évaporation) et peut entraîner l'apparition de pathologies végétales [7][9].
Dans les systèmes modernes, l'IoT facilite l'optimisation de l'irrigation grâce à des capteurs qui régulent automatiquement en fonction des conditions du sol et des conditions climatiques.



FIGURE I.4 – Système d'irrigation par aspersion [22]

.

c) Irrigation localisée :
L'irrigation localisée consiste à fournir l'eau directement au niveau des racines des plantes, en petites quantités et de manière contrôlée [7].

— **Goutte-à-goutte** :
Le système d'irrigation goutte-à-goutte permet une distribution localisée et efficace de l'eau [7], économisant ainsi de l'eau et réduisant les pertes par évaporation, tout en améliorant les rendements agricoles. Selon la FAO (2012). Cependant, il nécessite un investissement initial élevé, présente un risque de colmatage, et demande un entretien régulier [7][9]. Cette méthode est particulièrement adaptée à l'agriculture intelligente utilisant l'IoT grâce à ses capacités de gestion automatisée de l'eau.



FIGURE I.5 – Système d'irrigation par goutte-à-goutte [23]

.

— **Micro-aspersion** :
La micro-aspersion, positionnée entre le système de goutte-à-goutte et celui de l'aspersion, dispense de minuscules gouttelettes sur une région ciblée [7]. Conçue pour les vergers , elle combine un arrosage uniforme et une économie d'eau. Ses insuffisances : exposition au changement climatique, coûts chers et entretien exigeant [7].



FIGURE I.6 – Système d'irrigation par micro-aspersion [24]

I.3.3 Gestion traditionnelle de l'irrigation

La méthode traditionnelle d'irrigation repose largement sur des techniques pratiques, que ce soit par l'élaboration de programmes stricts ou par la compétence visuelle de l'agriculteur. Donc, les décisions d'irrigation se basent couramment sur des méthodes ou des constatations de surface, sans faire appel à des mesures exactes ou à des matériels technologiques sophistiqués [7]. Cette méthode présente des faiblesses majeures : elle ignore les besoins réels des cultures et la variation des facteurs météorologiques (humidité du sol, température, précipitations). Cela entraîne des excès d'eau.
Cela entraîne un lavage des nutriments et une dégradation du sol, ainsi que des manques d'eau, ce qui compromet le développement des plantes et la productivité agricole [7]. En outre, cette approche stimule un gaspillage considérable de ressources, notamment d'eau et d'énergie, ce qui représente un défi crucial dans les régions où l'approvisionnement en eau est restreint [8].

I.3.4 Problématiques actuelles de l'irrigation

L'agriculture d'irrigation est confrontée à d'importants défis qui menacent sa pérennité et son avenir. L'administration de cette ressource inestimable est particulièrement difficile à cause du manque d'eau et de la crise climatique, la sécheresse et l'épuisement des nappes phréatiques. Par ailleurs, les techniques d'irrigation conventionnelles utilisent une quantité significative d'énergie. Avec la montée des coûts de l'électricité et du combustible, beaucoup d'agriculteurs, surtout en milieu rural, voient leurs dépenses s'accroître considérablement. Cela menace la rentabilité économique de leurs opérations[7].
En outre, une mauvaise gestion de l'irrigation, notamment en présence d'excès, cause des dégâts importants sur l'environnement. Elle entraîne la suppression des nutriments existants dans le sol, augmente sa salinité et contaminerait les eaux souterraines, mettant en péril la fertilité terrestre et menaçant l'équilibre des écosystèmes [10]. Toutefois, face à l'extension ininterrompue de la population mondiale, nous devons accroître notre production alimentaire tout en sauvegardant nos ressources naturelles. Face à ces deux défis, l'utilisation de systèmes d'irrigation intelligents capables de gérer des informations en temps réel s'avère être une approche indispensable pour préserver l'eau, garantir une bonne productivité et protéger l'environnement [7].

I.4 Application de l'IoT dans l'agriculture de précision

.
L'IoT stimule le progrès technologique dans le domaine agricole [11].Ce progrès technologique encourage la transition de la gestion des terrains uniforme et expérimentale vers une agriculture précise, où chaque action est surveillée, assistée et perfectionnée en temps réel afin d'atteindre un équilibre entre productivité et durabilité environnementale.

I.4.1 Les technologies primordiales de l'agriculture intelligente

.

Pour réaliser l'ambition d'une agriculture numérique, il est crucial de synchroniser divers éléments technologiques clés, de la collecte des données sur site jusqu'à leur traitement hors lieu.

I.4.1.1 Les systèmes de communication

Les réseaux sans fil sont basés sur les réseaux utilisant les ondes radio, tels que le Wi-Fi, LoRa, ZigBee et Bluetooth. Les dispositifs de proximité tels que le Wi-Fi et le Bluetooth facilitent l'installation locale des équipements. En revanche, les technologies de réseau longue portée et basse consommation (LPWAN), à l'image de LoRa et ZigBee, se révèlent essentielles pour la transmission des informations provenant des capteurs sur d'étendues considérables tout en préservant l'énergie des modules [1].

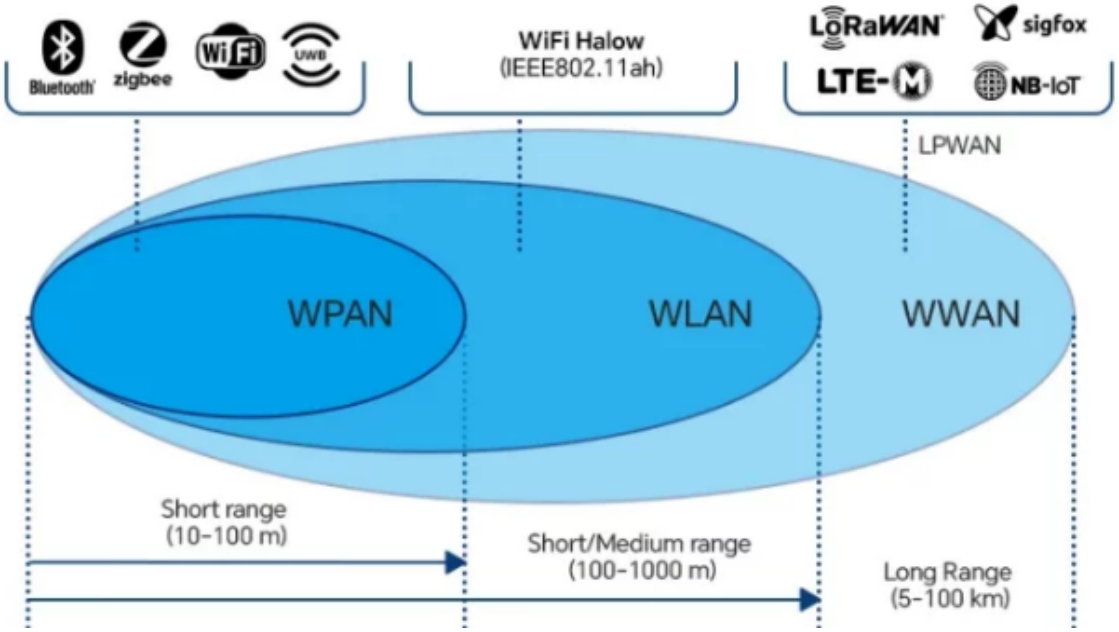


FIGURE I.7 – Classification des technologies de communication sans fil [13]

a) Wi-Fi : Le Wi-Fi est une technologie de communication sans fil établie sur la norme IEEE 802.11, qui permet une transmission rapide des données sur une portée limitée.
Dans l'agriculture, il est surtout utilisé dans des environnements restreints comme les serres ou les exploitations de taille réduite. Il permet une transmission en temps réel des données. Cependant, sa portée limitée et sa consommation énergétique élevée réduisent son utilisation dans les grandes surfaces agricoles.[13].

b) LoRa : LoRa est une technologie de communication à longue portée et à faible consommation d'énergie, adaptée aux applications IoT.
Elle est particulièrement utilisée dans les grandes exploitations agricoles, où les capteurs sont

répartis sur de vastes zones. Elle permet de collecter efficacement des données environnementales tout en assurant une longue durée de vie des batteries [12].

c) Zigbee : Zigbee est un protocole fondé sur la norme IEEE 802.15.4 et destiné aux communications à courte portée évitant toute consommation d'énergie importante. On l'utilise souvent dans les réseaux de capteurs interconnectés, par exemple dans les serres intelligentes. Grâce à sa capacité à fonctionner en réseau maillé, il est possible d'étendre la couverture et d'améliorer la communication entre les dispositifs [12].

d) Bluetooth : Bluetooth est une technologie radio à courte portée qui permet de connecter des appareils situés à proximité les uns des autres. En agriculture, elle sert surtout à la communication locale entre les capteurs et les appareils mobiles. On préfère la version Bluetooth Low Energy (BLE) pour économiser l'énergie [13].

TABLE I.1 – Comparaison des technologies de réseau IoT à courte et longue [13]

Caractéristiques	**LoRa / LoRaWAN**	**Bluetooth (BLE)**	**Wi-Fi**	**ZigBee**
Portée	2 – 15 km	10 – 100 m	50 – 100 m	10 – 100 m
Data Rate	0.3 – 50 kbps	1 – 2 Mbps	Jusqu'à 1 Gbit/s+	250 Kbit/s
Consommation d'énergie	Très basse	Très basse	Elevée	Très basse
Bande de fréquence	Sous-GHz	2.4 GHz	2.4 GHz, 5 GHz	2.4 GHz
Avantages pour l'agriculture	Idéal pour surveiller de grandes exploitations agricoles ; transmission de données sur de longues distances ; faible consommation pour capteurs dans les champs	Adapté pour les capteurs dans les serres ; faible consommation d'énergie ; connexion facile avec smartphones	Transmission rapide des données vers les plateformes de gestion agricole ; adapté aux serres intelligentes	Idéal pour réseaux de capteurs agricoles ; faible consommation ; possibilité de réseau maillé pour couvrir plusieurs zones
Inconvénients pour l'agriculture	Faible débit de données ; dépendance à une passerelle ; limitations de fréquence	Portée limitée pour les grandes exploitations ; nombre de capteurs limité ; interférences possibles	Consommation d'énergie élevée ; couverture limitée dans les champs éloignés ; congestion possible.	Débit de données faible ; portée limitée ; mise en place du réseau plus complexe.

I.4.1.2 Cloud Computing

Le Cloud représente un modèle d'informatique qui facilite l'accès à distance à des ressources de stockage et de traitement partagées grâce à Internet. Dans le domaine de l'agriculture intelligente, elle remplit un rôle crucial en tant que plateforme sécurisée servant à centraliser la vaste quantité de données dérivant des exploitations agricoles, abritant les algorithmes d'IA, et en permettant aux exploitants de suivre l'état de leurs cultures à tout moment via une application mobile.

I.4.1.3 Diffusion par satellite

Elle sert de complément aux réseaux terrestres pour assurer la liaison dans les régions rurales isolées ou non couvertes par les réseaux de téléphonie mobile. Elle permet la distribution d'informations issues de stations météorologiques éloignées et l'acquisition d'images satellites à grande

échelle [14][15].

I.4.1.4 Les capteurs

Les capteurs forment la base du système, puisqu'ils mesurent les paramètres physiques de l'environnement, à l'instar de l'humidité du sol, de la température et de la luminosité [15].
Les actionneurs, quant à eux, se voient recevoir des directives du système pour exécuter des actions physiques particulières, comme le déclenchement d'une électrovanne en vue de l'irrigation ou l'activation d'un dispositif de ventilation.

I.4.1.5 Les systèmes de positionnement et navigation par satellite (GPS)/(GNSS)

Offrent la possibilité de déterminer avec exactitude la position des parcelles, d'observer les changements dans le sol et de contrôler les tracteurs mobiles. Ils s'assurent que les ressources (eau, engrais) ne sont utilisées que là où leur besoin a été démontré [16].

I.4.1.6 Robots, drones et automatisation

L'utilisation de l'imagerie aérienne et des drones offre la possibilité d'une supervision continue et extensive de l'agriculture, en repérant le stress hydrique qui pourrait échapper à l'observation au sol [6]. De plus, les tracteurs autonomes et l'équipement automatisé assument les tâches répétitives ou détaillées (semis, désherbage, récolte), diminuant par conséquent la lourdeur du travail manuel et boostant les performances [17].

I.4.2 Exemples d'applications de l'IoT en agriculture

Mises en œuvre pratiques de l'IoT dans le secteur agricole. La mise en place de capteurs sur le site offre un moyen efficace de surveiller quatre aspects essentiels de l'agriculture :

— **Surveillance et pilotage des serres** : des capteurs connectés monitorent en continu les éléments de microclimat tels que la température, l'humidité de l'air et l'exposition lumineuse [15]. Ces données rendent possible l'ajustement immédiat du milieu de culture pour assurer un environnement optimal à la végétation.

— **Suivi et gestion des troupeaux** : en utilisant des colliers intelligents, les éleveurs ont accès à des informations exactes concernant la condition physique, l'emplacement et les déplacements de chaque animal, facilitant l'identification rapide d'un individu malade [18].

— **Suivi des cultures et des sols** : grâce à l'analyse de la croissance végétale et des caractéristiques du sol, les dispositifs IoT facilitent la détection précoce des menaces (comme le manque d'humidité, les maladies), ce qui permet à l'exploitant agricole de déployer des actions précises [19].

— **Projections météorologiques locales** : la mise en place de stations climatiques directement connectées aux sites permet de collecter des informations particulièrement spécifiques (vent, humidité...). Ces instruments simplifient la prédiction des variations climatiques et l'ajustement de l'emploi du temps des activités agricoles [15].

Le processus d'application de L'IOT dans l'irrigation est comme suit :

a) Optimisation de la prise de décision : optimisation de la prise de décision par l'analyse de multiples sources : L'irrigation intelligente s'appuie sur une fusion entre les données internes, fournies par les capteurs du sol, et les données externes provenant de prévisions climatiques. L'analyse précise de l'état d'humidité des cultures est facilitée par le traitement de ces flux sur des plateformes Cloud. Cette intelligence décentralisée modifie automatiquement et de façon dynamique les volumes d'eau fournis, assurant une réponse exacte aux exigences physiologiques de la plante et interdisant toute délivrance excessive[19].

b) L'impact de l'IoT sur l'efficacité des infrastructures Contrairement aux méthodes traditionnelles d'irrigation s'appuyant sur des horaires fixes ou des stratégies empiriques, l'IoT propose une réactivité instantanée.

c) Innovation durable et problématiques écosystémiques La fusion de l'Internet des Objets et de l'intelligence artificielle représente une solution technologique convenable en réponse aux enjeux de la punirie de l'eau.
Dans le domaine de l'agronomie, une gestion stricte de l'irrigation minimise le lavage des nutriments, inhibe la salinisation du sol et garantit la sauvegarde des aquifères contre les pollutions chimiques.

I.5 Conclusion

L'IoT (Internet des Objets) offre des perspectives remarquables dans de nombreux domaines, notamment la santé, la maison intelligente et l'industrie 4.0. Surtout dans le secteur de l'agriculture, l'IoT facilite la transformation des données environnementales en décisions automatiques, cette technologie renforçant simultanément la productivité et la rentabilité des exploitations, tout en encourageant une utilisation durable des ressources hydriques et énergétiques.

Chapitre II

Généralités et architecture IoT

II.1 Introduction

Pour accroître le rendement et la production agricole, il est devenu indispensable de mettre en place une surveillance intelligente et en temps réel, capable de transmettre des données via GSM/GPRS vers un tableau de bord IoT tel que ThingSpeak. L'objectif de ce chapitre est de présenter de manière détaillée les équipements nécessaires à la réalisation de ce système. Nous y décrirons l'usage, les attributs techniques et le mode de fonctionnement de chaque composant afin de couvrir l'intégralité des spécifications du projet et de garantir l'atteinte des résultats fixés. La présentation s'articulera autour de deux axes principaux : la partie matérielle (hardware), incluant notamment la carte Arduino et les différents capteurs, et la partie logicielle (software), regroupant les environnements de développement et de simulation.

II.2 Hardware (partie matérielle)

Une description des composants physiques qui constituent l'architecture de notre système est présentée dans cette section.

II.2.1 Carte Arduino

II.2.1.1 Définition

L'élément central de cette partie matérielle est la carte Arduino, qui est une carte électronique basée sur un microcontrôleur programmable, destinée à la création d'applications intégrées et au développement d'applications embarquées pour élaborer différents systèmes automatisés.
Elle se compose de deux éléments principaux : une petite carte programmable (le hardware) et d'un environnement de programmation facile à utiliser (l'IDE) pour écrire et envoyer des instructions à la carte.
Sur le plan matériel, le microcontrôleur est le composant principal d'une carte Arduino. Il est équipé de ports d'entrée/sortie qui permettent une interconnexion simple avec différents capteurs et actionneurs. Cela rend plus facile la collecte des données, le suivi et le contrôle des systèmes externes.
Du côté software, le langage de programmation utilisé est le C/C++ , en utilisant l'environnement de développement intégré Arduino IDE (Integrated Development Environment). qui fonctionne sous Windows, macOS et Linux, est disponible en tant que logiciel open source et est disponible gratuitement. Cela donne aux développeurs l'opportunité d'intégrer des bibliothèques et d'enrichir ses fonctionnalités.
Le programme élaboré avec l'environnement de développement intégré est compilé puis transféré sur le microcontrôleur via une connexion série, comme USB, RS232 ou Bluetooth, selon le module utilisé. Une fois téléversé, le microcontrôleur peut analyser les signaux provenant des capteurs et générer des signaux électriques pour contrôler et commander différents dispositifs. Et cela permet par exemple, en domotique, l'automatisation d'arrosage, l'allumage de la lumière à distance, la création des stations météo connectées, etc., la réalisation de systèmes robotiques.
L'utilisation d'Arduino présente plusieurs avantages, tels que sa simplicité d'utilisation, le faible coût et la rapidité de prototypage. Voici les éléments clés de la plateforme Arduino :

— Un port USB permettant la connexion à l'ordinateur

— Un microcontrôleur
— Les entrées analogiques
— Une alimentation externe
— Les entrées/sorties numériques
— Mémoire[25]

II.2.1.2 Le fonctionnement d'Arduino

Le principe de base de tous les PC est un système binaire basé sur deux chiffres, '0' (off) et '1' (on). C'est exactement le même principe qui s'applique à Arduino. où il existe différentes broches numériques et analogiques qui peuvent envoyer et recevoir des signaux. Les composants tels que les capteurs et les relais, et les LED, etc [26].
Les pins utilisés en numérique ont une sortie binaire soit (0 logique qui correspond à l'état bas du pin ou 0 V) ou l'état haut (1 logique qui correspond à l'état haut du pin ou 5 V), ce qui amène le fonctionnement des pins en mode tout ou rien[26].
Les pins utilisés en analogique ont une sortie de valeur (0 à 255).

II.2.1.3 Types de carte Arduino

Il existe plusieurs types de cartes Arduino, chacune ayant ses propres caractéristiques et fonctionnalités spécifiques. Voici une énumération de quelques modèles d'Arduino utilisés .[27]

2.2.3.1 Arduino UNO

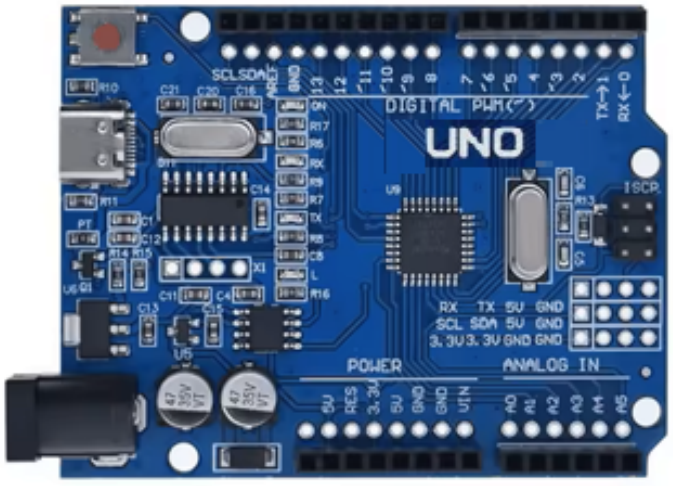


Figure II.1 – La carte Arduino UNO

— Le microcontrôleur : ATmega328P
— Flash : 32 (ko)
— EEPROM : 1 (ko)
— SRAM : 2 (ko)

— Les broches E/S numériques : 14
— Les broches E/S analogiques : 6
— La vitesse du processeur : 16 MHZ

2.2.3.2 Arduino Due



FIGURE II.2 – La carte Arduino Due

— Le microcontrôleur : Atmel SAM3X8E
— Flash : 512 (ko)
— EEPROM : 0 (ko)
— SRAM : 96 (ko)
— Les broches D'E / S numériques : 54
— Les broches d'entrées analogiques : 12
— La vitesse du processeur : 84 MHZ

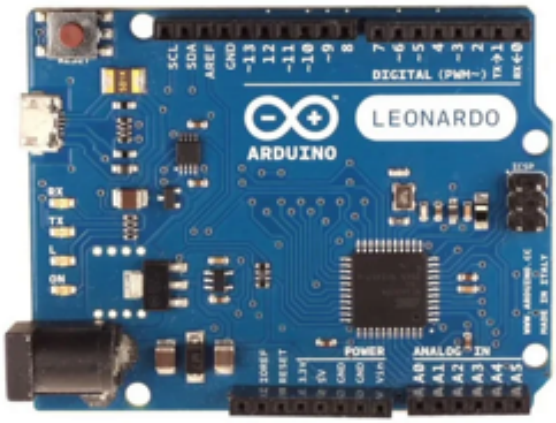


FIGURE II.3 – La carte Arduino Leonardo

2.2.3.3 Arduino Leonardo

— Le microcontrôleur : ATmega32U4
— Flash : 32 (ko)
— EEPROM : 1 (ko)
— SRAM : 2,5 (ko)
— Les broches E/S numériques : 20
— Les broches E/S analogiques : 12
— La vitesse du processeur : 16 MHZ

2.2.3.4 Arduino Mega 2560

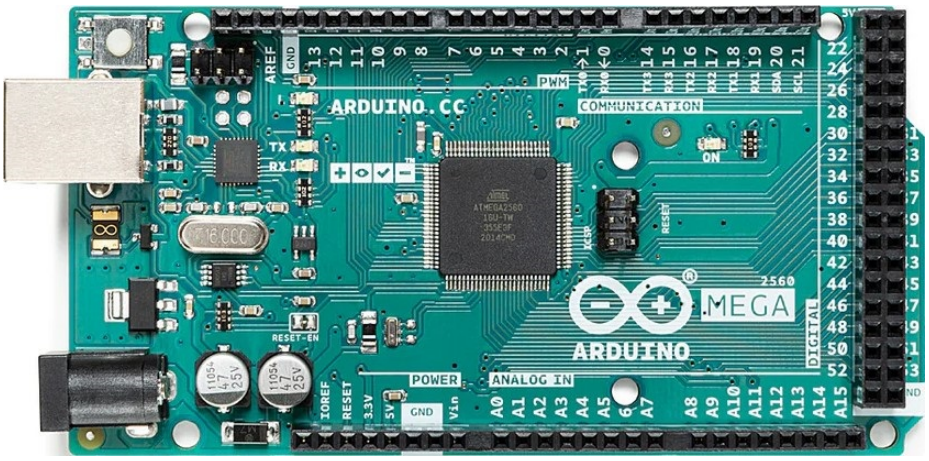


FIGURE II.4 – La carte Arduino Mega2560

Parmi sa large sélection de cartes de développement, Arduino propose la Mega 2560. Une carte électronique programmable qui repose sur un microcontrôleur plus performant et dispose d'une connectivité nettement plus large que l'Arduino UNO. Elle est destinée aux projets plus sophistiqués qui nécessitent de nombreuses entrées et sorties numériques et analogiques, ou une capacité de stockage mémoire plus conséquente (comme les imprimantes 3D, la robotique de pointe ou les systèmes à multiples capteurs). Tout comme la carte UNO, celle-ci intègre ses propres régulateurs de tension et un oscillateur à quartz qui fonctionne à 16 MHz pour garantir la synchronisation et la précision temporelle du système [26].
L'Arduino Mega 2560 est équipé de 54 broches d'entrée/sortie, parmi lesquelles 15 sont dédiées à la modulation par largeur d'impulsion (PWM). Avec la présence de 16 entrées analogiques, quatre ports série destinés aux dispositifs, un port USB, une prise d'alimentation, un connecteur ICSP (bootloader) et un bouton de remise à zéro RESET[26].
Il existe également d'autres types de cartes Arduino, comme l'Arduino Pro Mini, l'Arduino Micro, l'Arduino Yun, l'Arduino Explorer, l'Arduino Robot, et bien d'autres encore.

II.2.1.4 Description de la carte Mega

La figure suivante illustre la description de la carte Arduino.

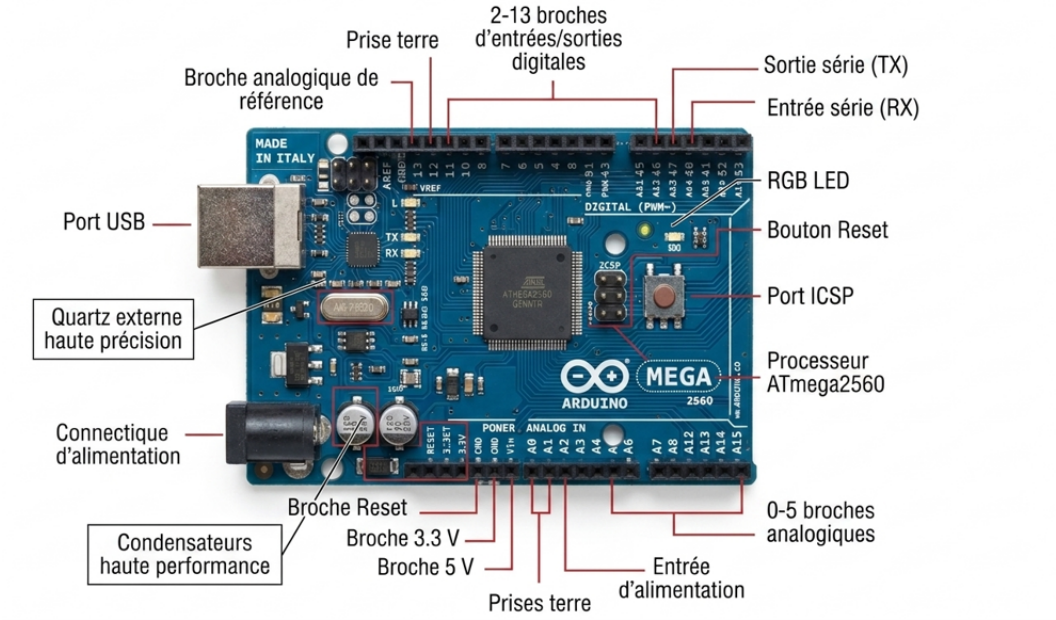


FIGURE II.5 – Description de la carte Arduino

2.2.4.1 Bloc d'alimentation

La carte Arduino Mega 2560 nécessite une alimentation électrique pour fonctionner de manière optimale. Elle est équipée d'un mécanisme automatique de choix de la source, qui peut se faire via le port USB : En branchant la carte à un ordinateur, une tension de 5 V est fournie, avec une limite de courant maximal de 500 mA. Ce lien assure à la fois l'alimentation et le transfert du programme (connexion série).
Par l'intermédiaire d'une alimentation externe : En se servant d'un adaptateur secteur ou d'une batterie reliée à la prise Jack de la carte. Il est conseillé de maintenir une tension entre 7 V et 12 V. Par la suite, un régulateur intégré s'occupe de réduire et de stabiliser cette tension à 5 V, nécessaire pour le fonctionnement principal de la carte.

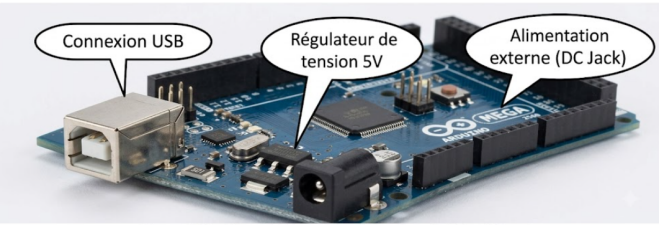


FIGURE II.6 – Bloc d'alimentation pour la carte Arduino Mega

2.2.4.2 Le microcontrôleur ATmega1280 Dans le domaine des systèmes embarqués, un microcontrôleur se définit comme un système informatique complet, miniaturisé et intégré sur un unique circuit intégré. Pour interagir avec son environnement, ce composant s'appuie sur des interfaces d'entrées et sorties qui se déclinent en deux grandes catégories : les voies numériques, limitées aux états logiques discrets (0 ou 1), et les voies analogiques, capables de traiter des grandeurs de tensions électriques variables.

L'ATmega1280 est le microcontrôleur Atmel qui constitue le cœur de certaines versions de la carte Arduino Mega (comme la Mega 1280). Ce circuit intégré se distingue par une capacité d'interaction numérique et de communication particulièrement vaste, ce qui le rend idéal pour les projets complexes nécessitant un grand nombre de périphériques et d'actionneurs numériques[26].

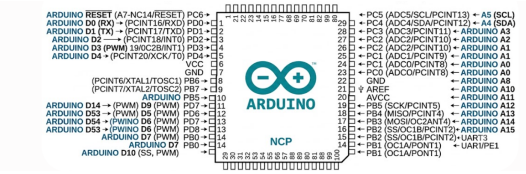


FIGURE II.7 – Microcontrôleur ATmega1280

L'organisation interne de sa mémoire se structure autour de la vitesse d'horloge de 16 MHz et de trois entités distinctes :

- **La mémoire Flash (128 Ko) :** stocke le code programme. C'est une mémoire non volatile qui conserve les données même hors tension.
- **La mémoire SRAM (8 Ko) :** servant de mémoire vive, elle offre l'accès rapide nécessaire à la manipulation dynamique des variables et au traitement des données en cours d'exécution.
- **La mémoire EEPROM (4 Ko) :** c'est la zone de sauvegarde permanente et non volatile. Les informations y restent sécurisées, même après une mise hors tension complète.

2.2.4.3 Connectivité et communication La carte offre un nombre exceptionnel d'entrées et de sorties, ainsi que de multiples interfaces de communication série matérielle :

- **Entrées analogiques :** 16 broches (jusqu'à A15). Chaque broche fonctionne sur des états logiques stricts, correspondant à une tension de HAUT (5 V) et BAS (0 V). Ces broches sont capables de gérer une intensité maximale comprise entre 20 mA et 40 mA, incluant une résistance de tirage (pull-up) interne activable par code.

- **Broches numériques/PWM :** Il est équipé de 54 broches numériques (identifiées de D0 à D53 sur la carte), configurables par logiciel de manière individuelle comme des entrées ou des sorties, et parmi ces 54 broches, 15 broches numériques sont spécifiquement dédiées à la génération de signaux PWM (Pulse Width Modulation), permettant de simuler des signaux analogiques (par exemple, pour faire varier la vitesse d'un moteur ou l'intensité lumineuse d'une LED).

- **Ports série (UART) :** 4 ports série matériels complets, permettant de communiquer simultanément avec plusieurs modules (Wi-Fi, Bluetooth, GPS, etc.). La puce possède 4 ports série matériels (UART) indépendants (désignés de USART0 Sortie série (TX) à USART3 Entrée série (RX)), offrant la capacité de communiquer simultanément avec plusieurs modules (comme un module Wi-Fi, un module Bluetooth, ou un écran série) sans surcharge logicielle[28].

2.2.4.4 Interfaces de programmation et indicateurs

1. **Port ICSP :** ce connecteur à 6 broches permet effectivement la programmation directe du microcontrôleur ATmega2560, court-circuitant le bootloader USB (comme indiqué dans l'image).
2. **Bouton Reset :** appuyer sur ce bouton redémarre le programme chargé dans le microcontrôleur.
3. **Indicateurs visuels (LEDs intégrées) :** La carte intègre trois LEDs de signalisation :
   — **LED de test (L) :** connectée à la broche numérique 13, elle clignote au démarrage pour indiquer que la carte fonctionne.
   — **LEDs de communication série (TX et RX) :** indiquent respectivement l'émission (TX) et la réception (RX) des données sur la liaison série. Elles clignotent lors du téléversement d'un programme.

II.2.2 Types de capteurs utilisés (sensors)

Dans plusieurs domaines (industrie, recherche scientifique, agriculture, etc.), nous avons besoin de contrôler de nombreux paramètres physiques (température, force, position, vitesse, luminosité, etc.). Le capteur est l'élément indispensable pour la mesure de ces grandeurs physiques.

II.2.2.1 Capteur de température et d'humidité (DHT11)

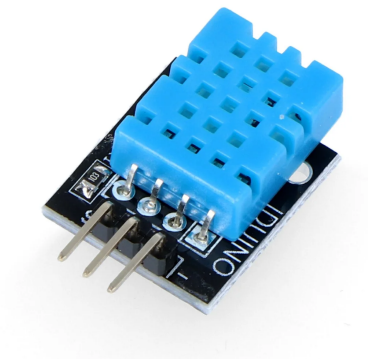


FIGURE II.8 – Le capteur DHT11

C'est un capteur simple qui mesure la température et l'humidité.
— Alimentation 3,5 V à 5 V.
— Consommation de courant de 2,5 mA.
— Signal de sortie numérique
— Plage de température de 0°C à 50°C
— Précision pour mesurer la température à 25°C d'une variation d'environ 2°C
— La résolution pour mesurer la température est de 8 bits, 1°C.
— L'humidité peut mesurer de 20 % HR à 90 % HR.
— Précisément pour une humidité de 5 % HR pour des températures comprises entre 0 et 50°C
— La résolution est de 1% HR, il ne peut pas capter des variations inférieures à cela .[29]

II.2.2.2 Capteur d'humidité du sol (hygromètre)

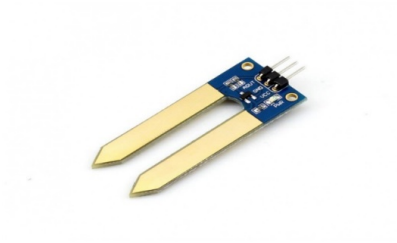


FIGURE II.9 – Le capteur d'humidité du sol (hygromètre)

Le taux d'humidité est mesurable via ce capteur branché à l'Arduino. Il suffit de le planter dans le sol pour obtenir un signal analogique dont la tension fluctuera selon le taux d'humidité sur ses dents, indiquant ainsi si un arrosage est nécessaire [26].
Caractéristiques :

- Alimentation : 5 Vcc
- Dimensions : 65 x 20 mm
- Sortie : analogique
- Connecteur mâle 3 broches (pas 2,54 mm)
- Poids : 5 g

II.2.2.3 Capteur ultrason HC-SR04



FIGURE II.10 – Le capteur ultrason

Le détecteur HC-SR04 utilise les ultrasons pour déterminer la distance à laquelle se trouve un objet, le capteur pourra facilement détecter s'il y a un obstacle devant lui. Son principe de fonctionnement est comme suit : L'émetteur envoie un train d'ondes qui va se réfléchir sur l'objet à détecter et ensuite revenir à la source. Le temps mis pour parcourir un aller-retour permet de déterminer la distance de l'objet par rapport à la source. Plus l'objet sera loin, plus il faudra longtemps pour que le signal revienne.
Pour détecter le niveau (la distance d), on utilise l'équation : $v = d/t$ Donc $d = v \times t$.

- t étant le temps vu au-dessus entre le début de l'émission et le début de la réception.
- v étant la vitesse du son qui est de 330 $m \cdot s^{-1}$.

Le capteur possède 4 bornes, utilisées comme suit :
- Vcc = Alimentation +5 V DC.
- Trig = Entrée de déclenchement de la mesure (Trigger input).
- Echo = Sortie de mesure donnée en écho (Echo output).
- GND = Masse de l'alimentation.[30]

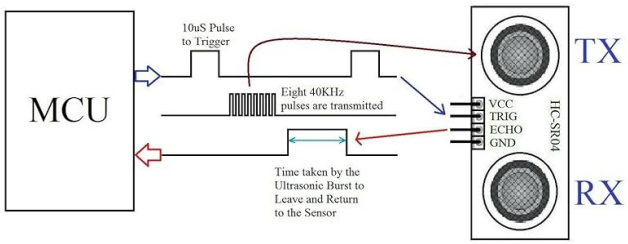


FIGURE II.11 – Détails opérationnels du capteur ultrasonique HC-SR04

II.2.3 Module SIM808 (GSM/GPRS/GPS)

II.2.3.1 Définition

Le SIM808 est un module de la société SIMCom. Il intègre trois technologies clés :

1. **Téléphonie et données 2G :** GSM/GPRS quadribande (850/900/1800/1900 MHz).
2. **Géolocalisation :** récepteur GPS / GNSS haute sensibilité.
3. **Connectivité locale :** Bluetooth 3.0/2.1 + EDR.

Le module SIM808 se distingue des SIM800 et SIM900 grâce à l'introduction d'une fonctionnalité GPS performante, en plus du module GSM.

II.2.3.2 Caractéristiques

- Démarrage à froid : -148 dBm
- Précision : env. 2,5 mètres
- Envoyez et recevez des données GPRS (TCP/IP, HTTP, etc.)
- Effectuez et recevez des appels vocaux à l'aide d'un casque ou d'un haut-parleur externe à 32 Ω + un microphone à électret.
- Temps de premier positionnement (TTFF) : démarrage à froid – 32 s (typ.), démarrage à chaud – 1 s (typ.), démarrage à tiède – 5 s (typ.)
- Quadribande 850/900/1800/1900 MHz – connectez-vous sur n'importe quel réseau GSM mondial avec n'importe quelle carte SIM 2G (aux États-Unis, nous suggérons T-Mobile) .[32]



FIGURE II.12 – Le module SIM808 (GSM/GPRS/GPS)

II.2.4 Afficheur LCD 16x2

II.2.4.1 Définition

Nous avons utilisé des écrans LCD pour afficher les grandeurs mesurées par divers capteurs du projet, tels que la température du sol et de l'air, l'humidité et la lumière. L'écran à cristaux liquides, c'est un écran LCD 16*2 qui affiche les caractères sur 2 lignes et 16 colonnes, possède 16 broches comme indiqué dans le tableau suivant[32].



FIGURE II.13 – L'afficheur LCD 16x2

N°	Nom	Rôle
1	VSS	Masse
2	Vdd	+5V
3	V0	Réglage du contraste
4	RS	La sélection du registre (commande ou donnée)
5	R/W	La lecture ou écriture
6	E	L'entrée pour validation
7 à 14	D0 à D7	Bits des données
15	A	Anode pour rétroéclairage (+5 V)
16	K	Cathode pour rétroéclairage (masse)

TABLE II.1 – Description des broches de l'écran LCD 16x2

II.2.4.2 Module I2C



FIGURE II.14 – Le module I2C

Pour notre projet, nous avons décidé d'utiliser un écran LCD à 16 broches pour afficher les données transmises par le capteur. Cependant, il prend plus de place sur l'Arduino, prend plus de temps à installer et nécessite une programmation plus compliquée. Pour résoudre ces problèmes, nous avons décidé d'introduire un bus I2C (Inter-Integrated Circuit) qui n'utilise que 4 broches sur l'Arduino et qui est beaucoup plus facile à installer. Les détails de ce bus I2C sont présentés dans le tableau ci-dessous[33].

N°	Nom	Rôle
1	GND	La masse
2	VCC	L'alimentation +5 volts
3	SDA	(Serial data) : sert à transporter les données
4	SCL	(Serial clock) : son rôle, c'est de transmettre des signaux d'horloge synchrones. "Signal indiquant la synchronisation de la ligne SDA"

TABLE II.2 – Fonction des broches du bus I2C

II.2.5 Relais



FIGURE II.15 – Relais

Une carte ARDUINO fonctionne avec une tension de 5 V. Pour des petits robots mobiles, cette tension est suffisante. Mais pour des robots plus gros et plus puissants, 5 V est loin d'être suffisant. Il y a donc deux alimentations séparées, l'une pour le circuit de 'commande' et l'autre pour le circuit de 'puissance'. Et pour faire le lien entre les deux circuits, il faut utiliser le module relais compatible ARDUINO. Il est très compact et utilisable avec toutes les cartes ARDUINO. Son utilisation est très facile et il possède deux LED pour visualiser l'état (LED verte pour l'état passant et la LED rouge pour l'état bloqué) du relais [25].

II.2.6 La plaque d'essai



FIGURE II.16 – La plaque d'essai

Cette carte permet de réaliser et tester des montages électroniques sans avoir recours à la soudure. Certaines rangées sont dédiées à l'alimentation électrique, notamment VCC (+) pour la tension positive et GND (-) pour la masse. Les autres emplacements servent à insérer directement les composants électroniques ou à connecter des fils afin de construire le circuit. Elle est principalement utilisée pour le prototypage et les essais avant la réalisation définitive du circuit.

II.2.7 Les fils de liaisons

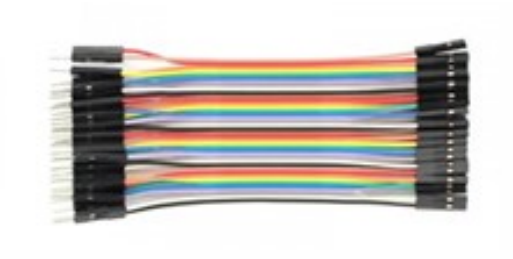


FIGURE II.17 – Les fils de liaisons

Ces fils permettent de relier différents composants entre eux, que ce soit sur une breadboard ou en dehors de celle-ci, en assurant une connexion directe et rapide.

II.3 Software (partie logiciels)

II.3.1 Proteus 8 Professional

Proteus est une suite de programmes destinée à l'électronique. Labcenter Electronics, une société, a élaboré des logiciels intégrés à Proteus, rendant ainsi la conception électronique assistée par ordinateur (CAO) plus aisée. Cette gamme de logiciels comprend principalement ISIS, ARES, PROSPICE et VSM. Cette suite de programmes est très prisée dans le domaine de l'électronique. Un vaste éventail d'entreprises et d'institutions éducatives (y compris les lycées et les universités) se sert de cette palette de logiciels. En plus de sa popularité, Proteus présente d'autres avantages.

— Pack contenant des logiciels faciles et rapides à comprendre et à utiliser.
— Le support technique est performant.
— L'outil de création de prototype virtuel permet de réduire les coûts matériels et logiciels lors de la conception d'un projet.

ISIS Le logiciel ISIS de Poteurs est principalement connu pour éditer des schémas électriques. Par ailleurs, De plus, le programme offre la possibilité de modéliser ces schémas, facilitant ainsi la détection des erreurs dès l'étape de conception.

ARES ARES est un dispositif de diffusion et de publication qui s'associe de manière idéale à ISIS. Il est alors facile de transférer un schéma électrique élaboré avec ISIS vers ARES pour la réalisation du PCB de la carte électronique. Bien que le façonnage d'un circuit imprimé soit optimal lorsqu'il est réalisé manuellement, ce logiciel permet de placer les composants et d'accomplir le trajet du circuit de manière automatisée [34].

II.3.2 Environnement Arduino IDE

IDE signifie Integrated Development Environment. Il s'agit du programme officiel d'Arduino, destiné principalement à la modification, la compilation et la publication de code sur les dispositifs Arduino. Un "sketch" fait référence au code écrit pour être exécuté sur un Arduino. L'outil couramment utilisé pour créer un logiciel Arduino Sketch s'appelle généralement l'IDE Arduino [34].

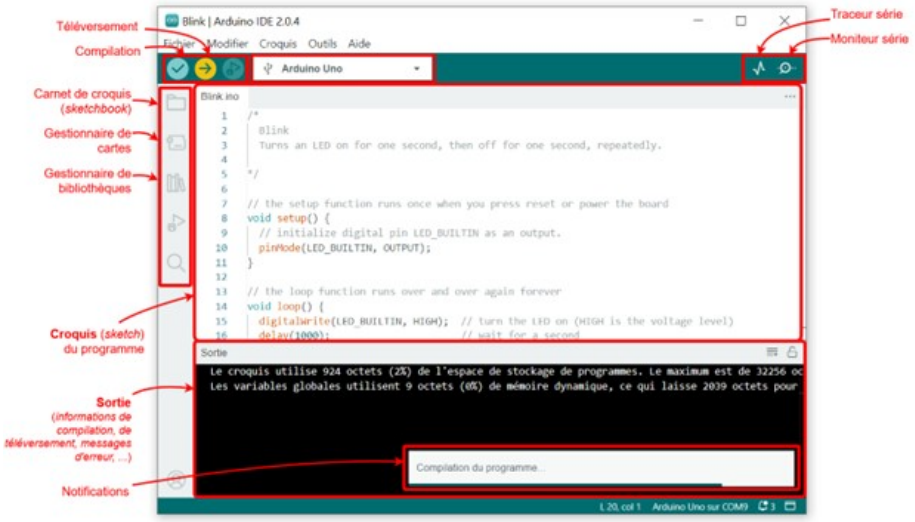


FIGURE II.18 – L'environnement Arduino IDE

II.3.3 Plateforme ThingSpeak

ThingSpeak se présente comme un environnement logiciel open-source dédié à faciliter le développement d'applications pour l'Internet des objets (IoT). L'architecture suggérée fournit aux programmeurs une série de modules pour simplifier la collecte et la manipulation des données :

- **Acquisition et agrégation de flux :** Cette plateforme simplifie la collecte sécurisée de données en temps réel provenant de différents capteurs et systèmes intégrés.
- **Stockage dans le cloud et conservation :** elle garantit un stockage organisé de ces données dans le cadre d'une infrastructure cloud centralisée.
- **Visualisation et tableaux de bord :** les informations enregistrées peuvent être instantanément présentées sous la forme de tableaux de bord interactifs.
- **Évaluation post-acquisition MATLAB :** permettre une connexion transparente à MATLAB autorise d'appliquer des algorithmes directement.
- **Modularité et interopérabilité :** facilite l'intégration avec les services web externes, les réseaux sociaux et les systèmes hors ligne grâce à des protocoles standardisés.

En raison de sa modularité et de son accessibilité, ThingSpeak s'est imposée comme une infrastructure privilégiée pour l'interfaçage d'architectures open-hardware telles qu'Arduino, ESP8266 et ESP32, notamment dans des contextes éducatifs ou de prototypage rapide.

II.3.4 MIT App inventor

Développé par Google et actuellement géré par le Massachusetts Institute of Technology (MIT), MIT App Inventor est un environnement de programmation graphique et convivial qui permet à tout le monde, même sans formation préalable en programmation et développement d'applications, de concevoir des applications pratiques pour smartphones et [35]. Cet instrument, fondé sur le principe de la programmation par blocs, facilite la création d'applications complexes à grande échelle tout en offrant une souplesse surpassant celle des environnements de programmation classiques [35].



FIGURE II.19 – Logo App Inventor

L'interface de conception (Designer) et l'interface de blocs (Blocks) constituent les deux panneaux principaux de l'environnement MIT App Inventor.
Le domaine de création : Cette zone est dédiée à l'élaboration du design de l'application et au choix des divers composants (capteurs, boutons, médias) qui y seront intégrés. L'espace de conception se divise en cinq zones de travail qui se complètent mutuellement.

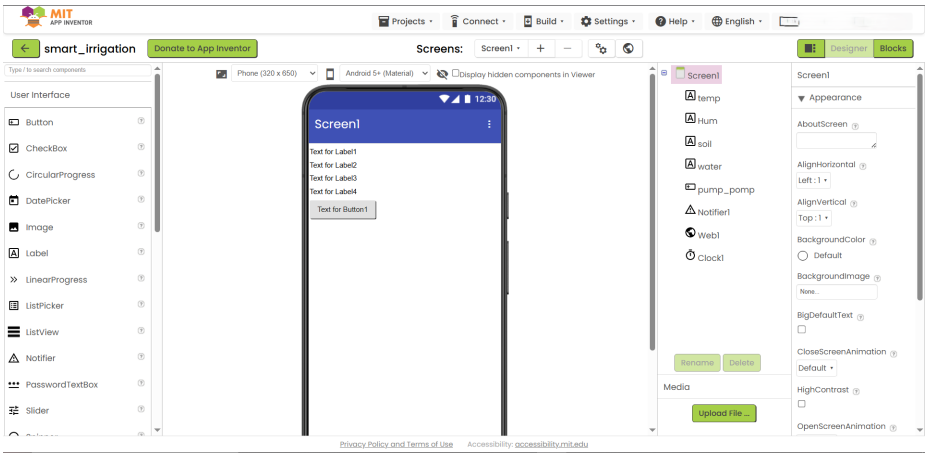


FIGURE II.20 – La fenêtre Designer

La fenêtre blocks : c'est le rassemblement des fragments de code tout comme on réunirait les pièces d'un puzzle.

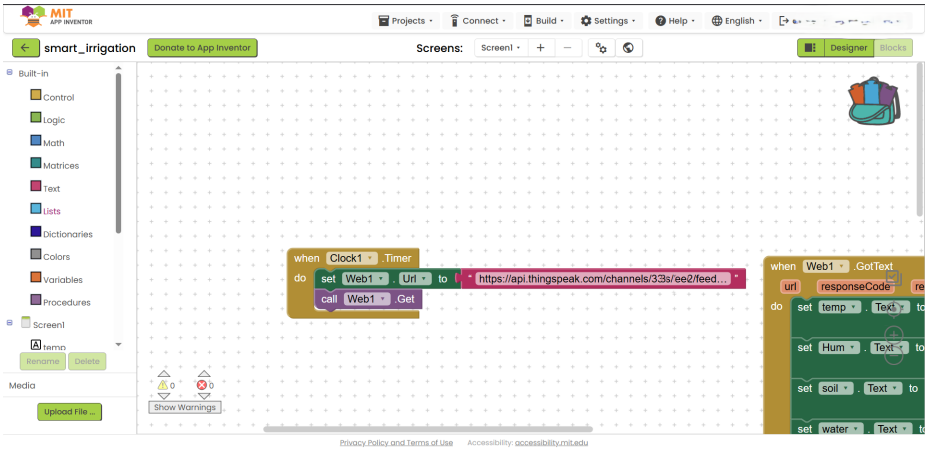


FIGURE II.21 – La fenêtre blocks

La validation fonctionnelle constitue une étape cruciale dans le processus de développement. Ainsi, il offre la possibilité d'effectuer une vérification en temps réel de l'application sur un appareil Android simplement en scannant le code QR généré par l'environnement de développement. Cette stratégie d'évaluation graduelle s'avère très bénéfique : elle facilite le processus de débogage en permettant d'identifier et de corriger les défaillances structurelles avant l'étape finale de déploiement du fichier APK [35].

II.4 Conclusion

Dans ce chapitre, on a mis en évidence les différents composants matériels et logiciels nécessaires à la création et à l'implémentation du système. Une analyse détaillée de la carte Arduino Mega 2560, des capteurs (température, humidité, humidité du sol), des modules de communication et des affichages a mené à une compréhension globale du fonctionnement de l'appareil. On a également mis en évidence l'importance des outils numériques tels que l'Arduino IDE, la plateforme ThingSpeak et le logiciel Proteus pour leur apport en programmation, simulation et traitement des données. Ces éléments représentent la base technique indispensable pour la réalisation concrète du projet, qui sera conçu et mis en œuvre dans les chapitres suivants.

Chapitre III

Mise en œuvre de l'Architecture IoT

III.1 Introduction

En relation avec les parties portant sur la recherche théorique et les équipements indispensables pour notre système, ce troisième chapitre se focalise sur la mise en œuvre pratique, la réalisation du circuit ainsi que la conception logicielle de notre prototype. Cette partie est cruciale car elle décrit les étapes nécessaires pour passer de la construction théorique à la réalisation pratique de notre système d'irrigation intelligente et de gestion de l'eau.
Nous débuterons par une analyse détaillée de la structure globale du système et de la configuration des broches de l'Arduino Mega 2560. Ce circuit a été conçu grâce au logiciel Proteus 8 afin d'éviter des problèmes matériels et d'améliorer le câblage. l'IDE Arduino pour l'élaboration et la mise en œuvre de l'algorithme de contrôle automatique et autonome.
Notre système propose une grande flexibilité grâce à ses différentes options de connexion. Nous avons priorisé le développement d'une application mobile 'IRRIGATION' facile à utiliser : celle-ci nous permet de surveiller et de gérer toutes les opérations en temps réel, quel que soit notre emplacement.
Pour assurer le développement de ces fonctionnalités à grande échelle spécifique à l'Internet des objets (IoT), le système est doté d'un composant de communication hybride SIM808 GSM/GPRS. Cet élément assure une liaison cellulaire robuste, consacrée à la transmission continue des données de terrain vers la plateforme cloud ThingSpeak et vers l'application sur le téléphone . Ces algorithmes mettant en œuvre une surveillance automatisée, anticipative et intelligente, capable de prédire les comportements du système.

III.2 Cahier des charges

L'objectif du système mis en place est d'automatiser l'irrigation agricole tout en assurant une gestion optimale et équilibrée de l'eau contenue dans le réservoir(ou les basins agricole). Ce projet vise à combattre le stress hydrique et le gaspillage d'eau, des enjeux essentiels et extrêmement pressants dans les régions arides, en particulier en Algérie. Notre prototype fonctionne en recueillant des données environnementales en direct grâce à différents capteurs, ce qui permet l'implémentation de contrôles autonomes ou manuellement via un smartphone.

- **Systèmes automatisés intelligents :** régulation de l'arrosage basée sur des seuils d'humidité du sol précis.
- **Systemes de sécurité matérielle :** protection prioritaire de la motopompe contre les avaries mécaniques.
- **Supervision des données multiplateformes :** consultation des données en temps réel sur écran LCD local, tableau de bord Cloud et application smartphone.
- **Contrôle hybride :** possibilité de basculer entre un mode automatique autonome et un mode de commande manuel à distance.

L'efficacité d'un système automatisé en milieu aride dépend de la préservation de son infrastructure de pompage. Une défaillance dans l'approvisionnement peut entraîner des pathologies techniques graves :

III.2.1 Sécurisation de la pompe et surveillance du réservoir

La pompe motrice, un élément crucial de l'actionnement, est soumise à des risques mécaniques. En cas d'insuffisance de ressources dans le réservoir, des risques mécaniques et thermiques significatifs peuvent survenir.

a) Évaluation des risques opérationnels :

Le tableau suivant fournit un récapitulatif des défis techniques liés à un problème de pression hydraulique, particulièrement des contextes thermiques nécessitant une performance optimale :

Problème opérationnel (Événement)	**Mécanisme physique (Phénomène)**	**Impact sur l'infrastructure et l'energie**
Absence d'eau dans le réservoir (Marche à sec)	Aspiration d'air ou chute de pression locale inférieure à la pression de vapeur, provoquant l'implosion violente de bulles de vapeur contre les parois des aubes (Cavitation sévère).	Érosion vibratoire accélérée (pitting) et destruction complète de la roue de la pompe en moins d'une heure de fonctionnement.
Rupture du flux de refroidissement	Absence de flux liquide nominal indispensable à la dissipation thermique du moteur électrique et à la lubrification essentielle des garnitures mécaniques (Stress thermique).	Grippage mécanique, dégradation irréversible des isolants électriques et risque élevé de grillage définitif du bobinage moteur.
Gaspillage de l'énergie électrique	Fonctionnement prolongé du moteur à débit massique nul (la pompe tourne dans le vide), entraînant une consommation électrique sans aucune utilité agronomique.	Augmentation injustifiée des coûts d'exploitation, baisse de l'efficacité globale et usure prématurée des composants de puissance.

TABLE III.1 – Évaluation des Risques Opérationnels [36]

b) Algorithme de contrôle et gestion des seuils critiques (La solution)

Pour minimiser ces risques, nous avons implémenté au sein du système une méthode de suivi en temps réel du niveau du réservoir par le biais d'un capteur à ultrasons (type HC-SR04).

1) Condition de sécurité (Niveau critique - réservoir vide) :

- **Fonctionnement :** Si le niveau de l'eau descend en dessous du seuil de sécurité critique, l'algorithme active un verrou logiciel (interlock). Cet appareil verrouille l'état " OFF " du relais de la pompe, négligeant toute sollicitation des détecteurs d'humidité du sol.
- **Système d'irrigation intelligent (mobile) :** Si le service est interrompu, l'application mobile (App inventor) envoie une notification urgente à l'utilisateur pour l'en avertir.

2) État Nominal (Niveau Suffisant) :

— **Action logicielle :** Le verrou de sécurité est ouvert tant que la quantité d'eau disponible est jugée appropriée. Ainsi, le système reprend son cycle habituel de contrôle, activant l'irrigation uniquement lorsque l'humidité du sol descend en dessous du seuil fixé.

Ce système de gestion est conçu pour optimiser l'administration des ressources tout en minimisant les coûts de maintenance corrective liés aux dysfonctionnements des pompes.

III.2.2 Gestion de l'irrigation (humidité du sol)

La régulation de l'arrosage repose sur la surveillance continue du statut hydrique de la terre. Les seuils décisionnels ont été calibrés de la manière suivante :

— **Zone de sécheresse (humidité $<$ seuil sécheresse) :** lorsque la teneur en eau du sol descend en dessous de ce seuil critique, le système bascule automatiquement en mode actif. L'Arduino Méga commute la broche numérique reliée au module relais afin de déclencher la pompe d'irrigation.

— **Zone de saturation (humidité $>$ seuil saturation) :** dès que le sol atteint ce niveau d'humidité optimal, la commande du relais est coupée instantanément. L'arrêt immédiat de la pompe permet de prévenir le gaspillage d'eau et de protéger les cultures contre l'asphyxie radiculaire.

— **Zone d'équilibre (Humidité comprise dans zone d'équilibre) :** le système se maintient dans un état de stabilité temporaire où la pompe demeure inactive (au repos).

Exemple la culture des fraises :

— **État de sécheresse (Humidité $<$ 65%)** : le sol est considéré comme trop sec. Le système active immédiatement l'irrigation (Pompe = ON).

— **État de Saturation (Humidité $>$ 80%)** : le sol a atteint sa capacité hydrique optimale pour la fraise. Le système coupe instantanément l'irrigation (Pompe = OFF).

— **Zone d'Équilibre (65% $<$ Humidité $<$ 80%)** : le système maintient l'état précédent. Si la pompe était en marche, elle continue d'irriguer jusqu'à atteindre le seuil haut. Si elle était à l'arrêt, elle reste inactive (stabilité temporaire).

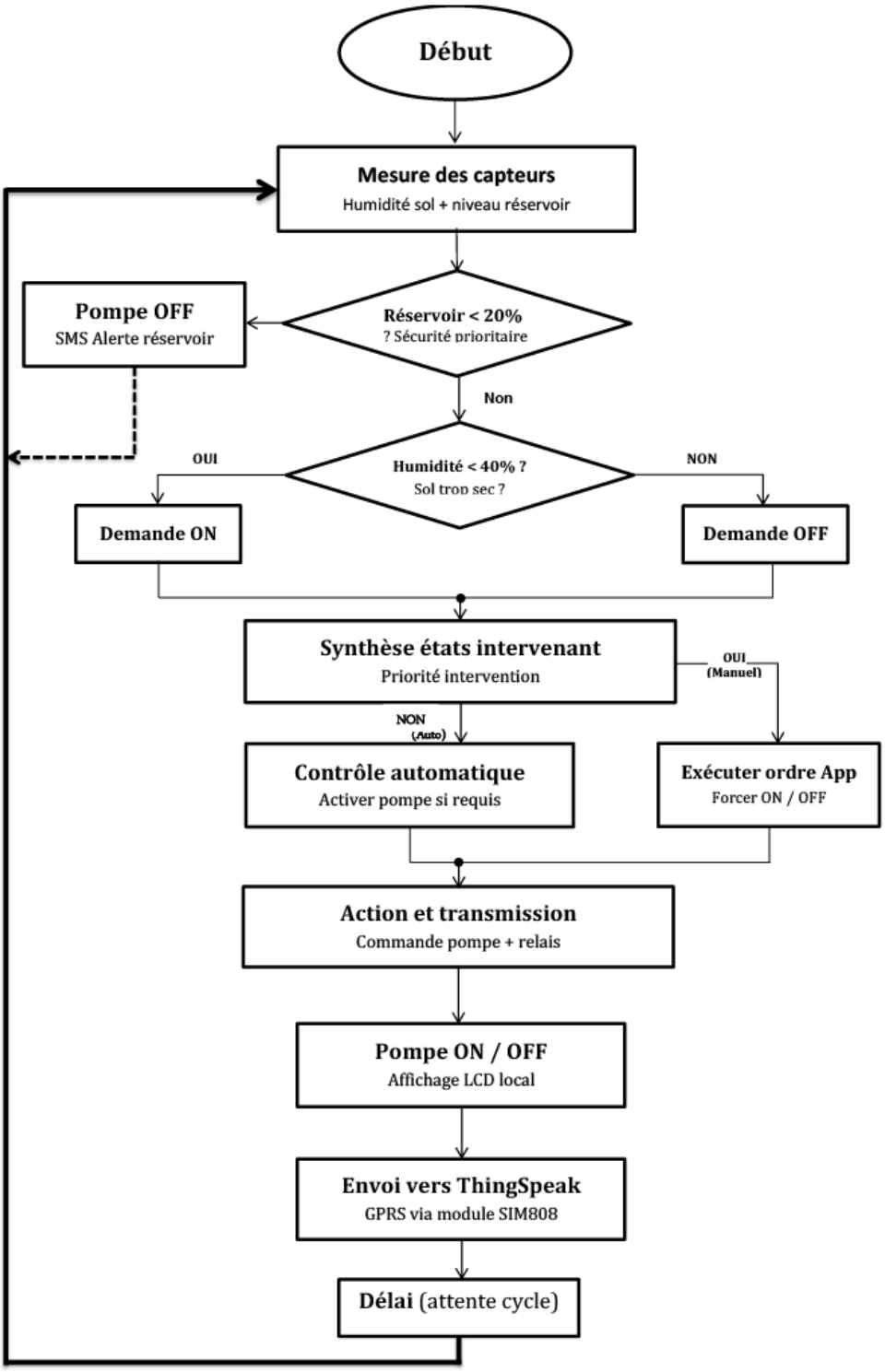


FIGURE III.1 – L'organigramme du travail

III.3 Simulation

Le système repose sur l'Arduino Méga 2560 comme support matériel, sélectionné en raison de sa vaste mémoire et de son grand nombre de ports d'entrées/sorties. Dans le cadre du monitoring

environnemental, le système emploie différents détecteurs : un capteur DHT11 pour les relevés thermo-hygrométriques liés au microclimat, un détecteur à résistance hygrométrique pour mesurer le degré d'humidité du sol, et un capteur ultrasonique pour contrôler le niveau d'eau.
En ce qui concerne l'actionnement, un relais 5 V est employé pour gérer en toute sécurité une motopompe de 12 V. Pour faire simple, c'est le module SIM808 GSM/GPRS qui assure la connexion et l'accès web, étant paramétré par le biais d'une liaison série sur le port Serial1.

III.3.1 Affectation des broches (mapping des pins)

Le tableau ci-dessous synthétise la configuration matérielle définitive et l'interfaçage complet des différents capteurs, de l'unité d'affichage et de l'actionneur avec les broches dédiées de la carte de commande Arduino Mega 2560 :

Système / Module	**Fonction du pin**	**Type de signal**	**Pin Arduino Méga 2560**
Afficheur LCD (16x2) I2C	VCC / GND SDA (Data) SCL (Clock)	Alimentation (5 V/-GND) Communication I2C Communication I2C	5 V / GND Pin 20 Pin 21
Capteur DHT11	VCC / GND DATA	Alimentation (5 V/-GND) Entrée numérique	5 V / GND Pin 7
Capteur Ultrasonique (HC-SR04)	VCC / GND TRIG ECHO	Alimentation (5 V/-GND) Sortie numérique Entrée numérique	5 V / GND Pin 9 Pin 8
Capteur d'Humidité du sol	VCC / GND DATA (Analogique)	Alimentation (5 V/-GND) Entrée Analogique	5 V / GND Pin A0
Module Relais (Pompe)	VCC / GND IN (Commande)	Alimentation (5 V/-GND) Sortie numérique	5 V / GND Pin 10
Module GSM/GPRS SIM808	VCC / GND TXD RXD	Alimentation (5 V/-GND) Transmetteur (TX) Récepteur (RX)	5 V / GND Pin 19 (RX1) Pin 18 (TX1)

TABLE III.2 – Mapping des pins

III.3.2 Schéma synoptique global

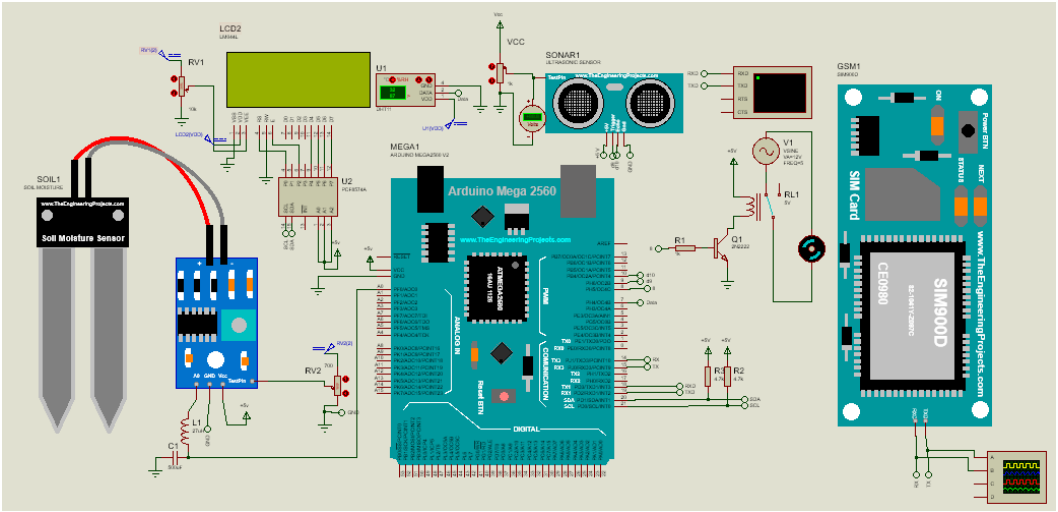


FIGURE III.2 – Schéma synoptique global

III.4 Présentation des résultats de la pratique et simulations

Les essais indiquent que le système réagit immédiatement lorsqu'il atteint des limites critiques. Dans le cas où le réservoir est vidé, la pompe arrête instantanément son fonctionnement et une notification est transmise à l'application mobile, garantissant ainsi la pérennité de l'équipement.

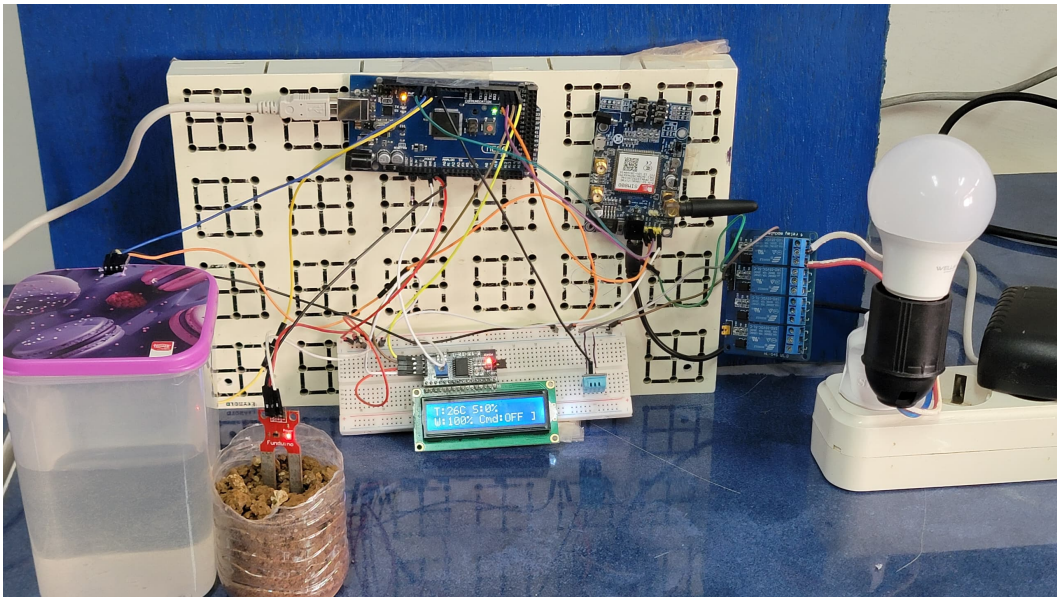


FIGURE III.3 – Circuit électronique

III.4.1 Capteur de température et d'Humidité ambiante (DHT11)

Ce composant est utilisé pour obtenir en temps réel les variables microclimatiques environnantes, y compris la température et le niveau d'humidité de l'air. Ces informations sont cruciales pour estimer approximativement le taux d'évapotranspiration des cultures et déterminer leurs besoins en eau.

— **Modélisation via proteus et développement de logiciel :** Illustration du schéma de liaison qui relie le connecteur de données du capteur au port numérique Pin 7 de la carte Arduino Méga 2560. Cette configuration incorpore une résistance de tirage (pull-up) pour renforcer la stabilité du signal et préserver l'intégrité de la communication, suivant le protocole particulier du DHT11.

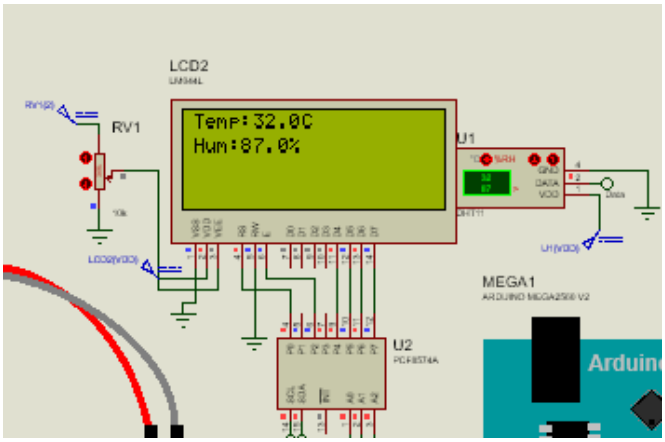


FIGURE III.4 – Capteur DHT11 via simulation

— **Vérification effectuée à l'aide du moniteur série :** affichage synchronisé des mesures via la console série de l'IDE Arduino : les indications de température en degrés Celsius (°C) et d'humidité ambiante en pourcentage (%).

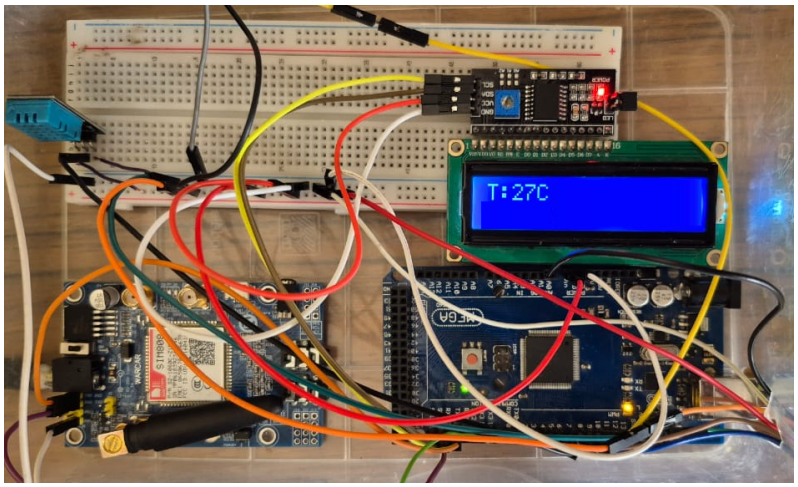


FIGURE III.5 – Capteur DHT11 via réalisation

III.4.2 Capteur d'Humidité du sol

On utilise ce mécanisme pour juger de l'état hydrique du substrat terrestre. Même si ce principe est basé sur l'évaluation de la résistance ou de la constante diélectrique de l'environnement, il offre la possibilité de déterminer précisément le degré de sécheresse ou de saturation du sol.

— **Modélisation avec Proteus et réalisation de logiciel :** exemple de l'architecture de câblage reliant la sortie analogique du capteur à la broche A0 de l'Arduino Mega 2560. Cette configuration de programme offre la possibilité de numériser les fluctuations de tension détectées en utilisant le convertisseur analogique-numérique (CAN) incorporé sur la carte.

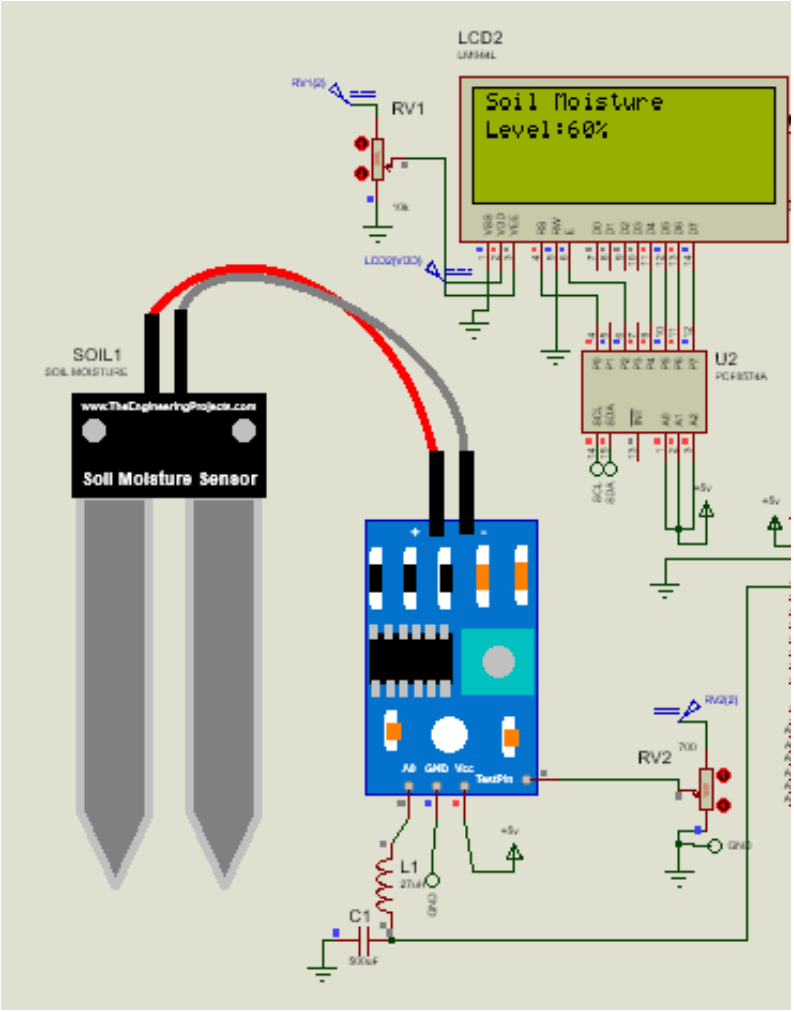


FIGURE III.6 – Capteur Soil Moisture via simulation

— **Expérimentation Validation par le biais du Moniteur Série :** Utilisation de la console série de l'IDE Arduino pour confirmer la réception des informations. Le programme lit d'abord les valeurs analogiques brutes (variant de 0 à 1023), puis réalise un processus de calibrage qui permet de les transformer et de les représenter comme un pourcentage d'humidité volumétrique (de 0% à 100%), information directement utilisable pour l'algorithme

décisionnel.

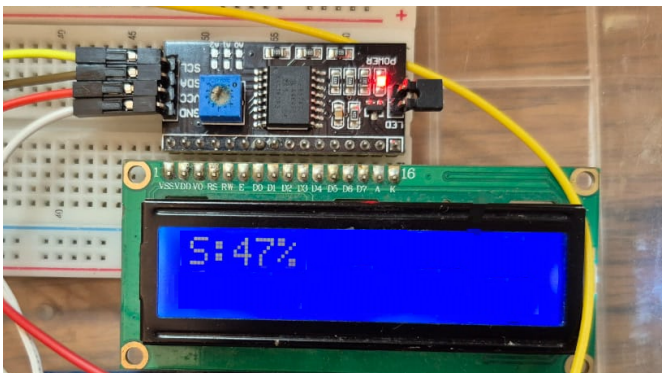


FIGURE III.7 – Affichage de l'humidité du sol

III.4.3 Capteur ultrasonique (HC-SR04) (Niveau du Réservoir d'eau)

Le dispositif fonctionne par l'émission des ondes sonores pour déterminer le délai du signal et calculer la distance entre le détecteur et la surface de l'eau.
L'intégration du capteur ultrasonique (HC-SR04) vise à surveiller le niveau d'eau disponible et à prévenir via des alertes liées à un fonctionnement à sec de la pompe.

Implémentation de logiciel : présentation de la liaison du capteur à l'Arduino Méga 2560, où la broche d'émission Pin 9 (TRIG) génère le premier signal et la broche de réception Pin 8 (ECHO) capte le signal réfléchi. Par la suite, le logiciel fait appel à des équations acoustiques pour établir la hauteur du liquide.

Évaluation expérimentale et exposition des résultats : On utilise une fonction de calibrage pour transformer la distance géométrique en proportion du volume d'eau disponible, variant de 0% à 100%. Ces informations sont présentées sur un écran LCD 16x2 (via le bus I2C) tout en étant envoyées à distance pour permettre leur consultation en direct sur l'interface de l'application " App Inventor ".

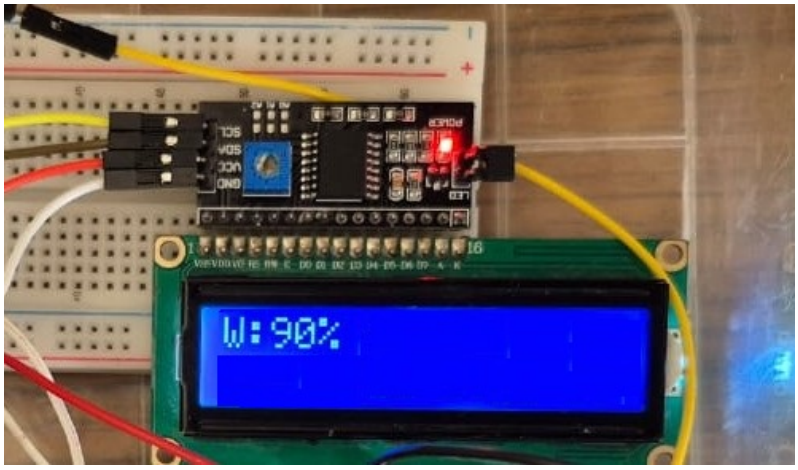


FIGURE III.8 – affichage du niveau d'eau du réservoir

III.4.4 Module de communication GSM/GPRS (SIM808)

Ce composant constitue l'élément central de l'architecture de télécommunication dans le contexte du projet. Cet appareil offre la liaison sans fil nécessaire pour la délocalisation des données et la réception de commandes à distance, en se connectant directement à l'Arduino Méga 2560 via son port série matériel dédié (Serial1).

Configuration réseau et initialisation logicielle : validation de l'enregistrement du module sur le réseau cellulaire.

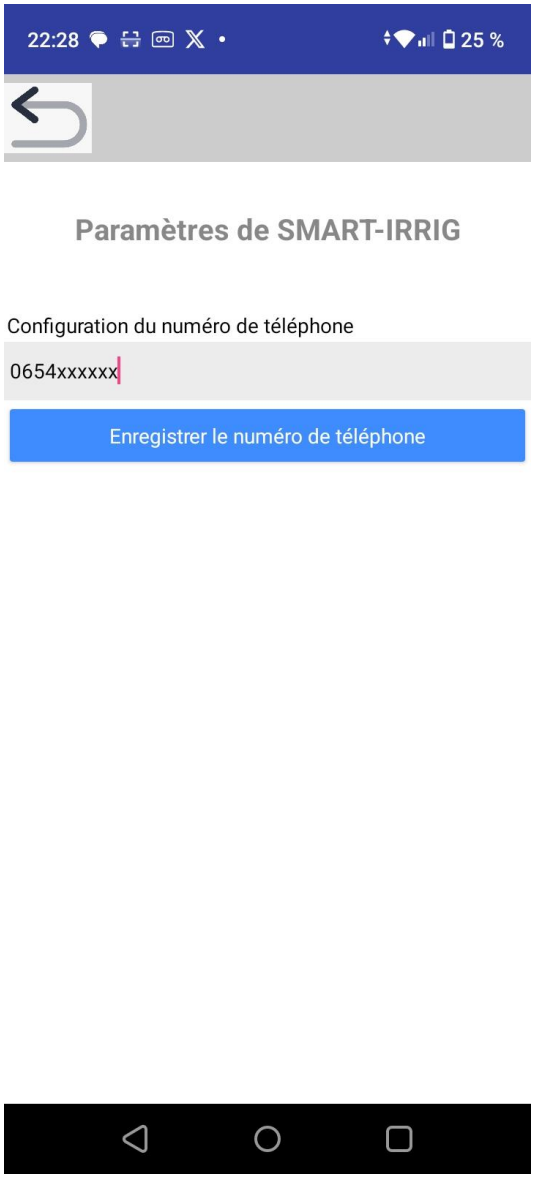


FIGURE III.9 – Configuration numéro téléphone

Validation expérimentale du flux IoT (ThingSpeak et MATLAB) : Modélisation et exécution réussies des requêtes de protocole HTTP. Le système transmet régulièrement les variables environnementales (température, humidité de l'air, humidité du sol et niveau du réservoir) au cloud ThingSpeak (organise la lecture asynchrone des requêtes et du traitement décisionnel sous MATLAB) et à l'application smartphone " IRRIGATION" (qui contrôle en temps réel l'état de la pompe motrice).

III.5 Supervision et Interfaces Logicielles

L'écosystème logiciel du prototype est structuré autour d'une triple interface de contrôle et de suivi :

III.5.1 Supervision locale permanente

L'affichage en temps réel des variables environnementales (température, humidité, niveau d'eau) est assuré directement sur site via l'écran LCD interfacé en I2C.

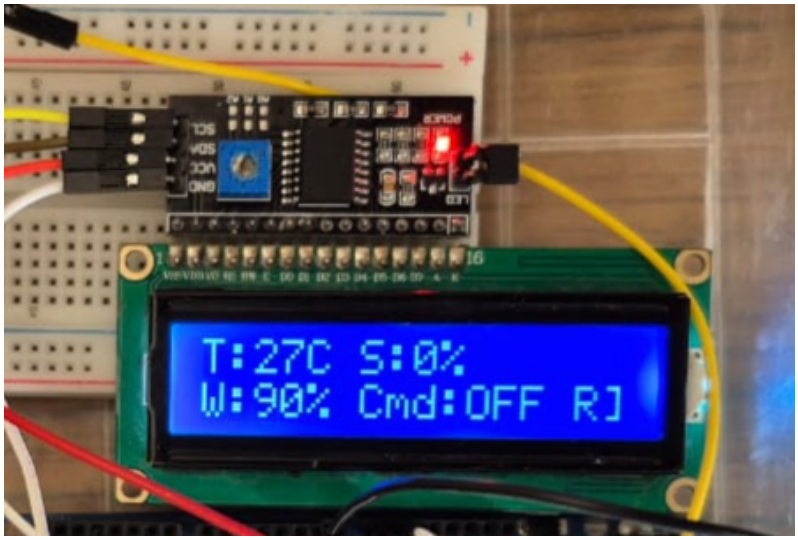


FIGURE III.10 – L'affichage via l'écran LCD

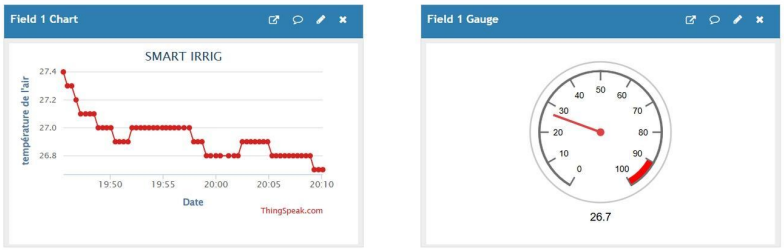
III.5.2 stockage dans Cloud et optimisation IoT (ThingSpeak & MATLAB)

À l'aide de requêtes HTTP encapsulées dans des commandes AT, le module SIM808 externalise périodiquement les données collectées vers le cloud ThingSpeak. À ce niveau, l'intégration de scripts MATLAB Analysis permet de traiter l'historique afin d'extraire des modèles prédictifs et d'optimiser la gestion de l'eau.

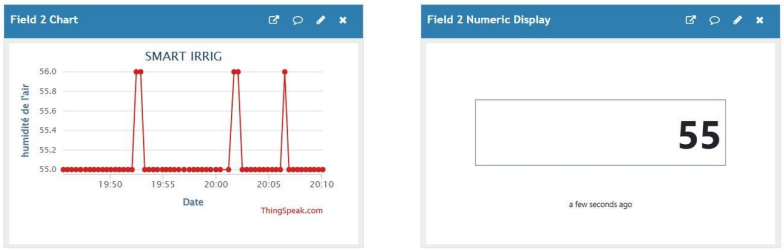
a) Intégration Cloud avec ThingSpeak

La transmission des données s'effectue via des requêtes HTTP.

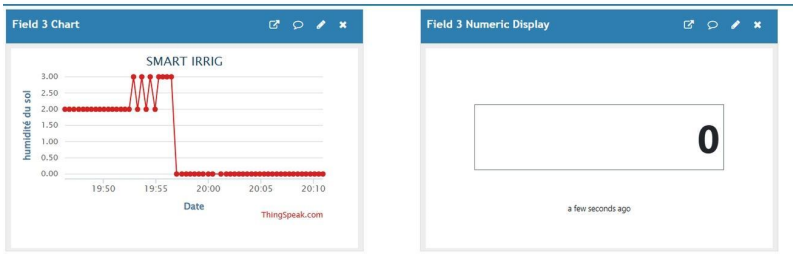
Canaux et champs : création d'un canal privé, création des champs dédiés pour l'humidité, la température et le niveau du réservoir.



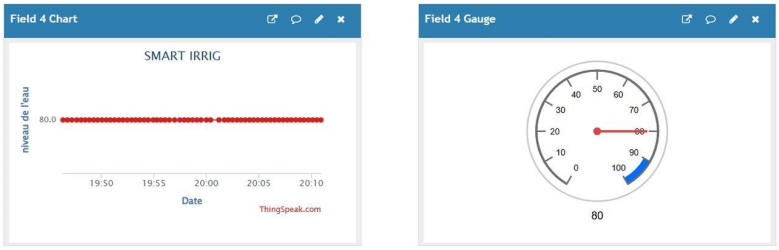
Field 1 - Température de l'air



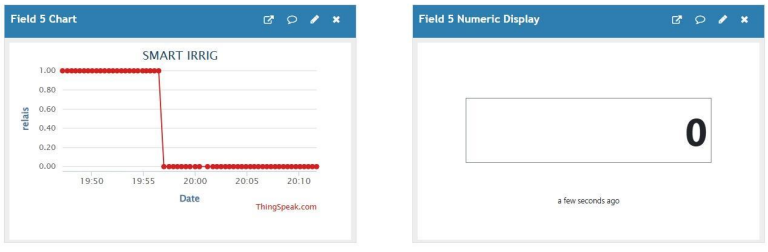
Field 2 - Humidité de l'air



Field 3 - Humidité du sol



Field 4 - Niveau de l'eau



Field 5 - État du relais (pompe)

FIGURE III.11 – Les figures via ThingSpeak

b) MATLAB Analysis

Utilisation de scripts intégrés pour traiter l'historique des données et optimisation de la gestion de l'eau.

code.m

/MATLAB Drive/code.m

```
channelID = 3367322;
readKey = 'YYWVSSP55Q03CK5Y';
writeKey = '0TE46V7M3RE4CE3X';

% 1. Lecture des données depuis ThingSpeak
data = thingSpeakRead(channelID, 'Fields', [3, 4], 'NumPoints', 1, 'ReadKey', readKey);


soil = data(1);       % Champ 3 : Humidité du sol
waterLevel = data(2);  % Champ 4 : Niveau d'eau

% 2. Application de votre logique conditionnelle
if waterLevel < 20
    % Si l'eau est insuffisante (inférieure à 20) -> Pompe éteinte
    pumpStatus = 0;
else
    % Si l'eau est supérieure ou égale à 20 -> On vérifie le sol
    if soil < 80
        % Si l'humidité est inférieure à 80 -> On active la pompe
        pumpStatus = 1;
    else
        % Si l'humidité est supérieure ou égale à 80 -> On arrête la pompe
        pumpStatus = 0;
    end
end

% 3. Écriture du résultat sur le Champ 6 de ThingSpeak
thingspeakwrite(channelID, 'Fields', 6, 'Values', pumpStatus, 'WriteKey', writeKey);
```

FIGURE III.12 – Le programme MATLAB via ThingSpeak

III.5.3 Supervision mobile

L'application mobile intelligente de gestion de l'irrigation fournit une interface utilisateur conviviale. En plus de représenter graphiquement l'état du système,elle offre également un interrupteur virtuel (Switch) qui permet une transition vers une commande manuelle à distance.
Développement de l'application mobile pour l'irrigation intelligente. L'application mobile propose un suivi en direct.
application mobile dédiée, permettant une intervention précise et réactive.

Concepteur d'interface : Élaboration d'un tableau de contrôle incorporant des affichages graphiques (manomètres) ainsi que des commandes tactiles.



FIGURE III.13 – Interface Designer d'application

L'interface de notre l'application mobile 'IRRIGATION' se matérialise par une interface mobile. Elle assure la supervision et le pilotage en temps réel, sa fonction principale étant la gestion de l'activation de la pompe d'irrigation connectée.
Les données climatiques et environnementales sont surveillées en temps réel par des capteurs connectés (DHT11, humidité du sol, ultrason). Le système affiche des icônes distinctes avec les valeurs numériques de la température de l'air 26.00°C, de l'humidité de l'air 58.00%, de l'humidité du sol 0%, et du niveau d'eau du réservoir 80%. L'état de la pompe est également rendu visible par une icône de moteur.
L'interface offre une fonctionnalité pratique pour une intervention prioritaire via deux boutons de

commande manuelle. Actionner la pompe (vert) / Interrompre la pompe (rouge) (dans le le cas du contrôle d'urgence) Dans le 'Mode Manuel' (bouton bleu 'État de Système'), des commandes comme 'Marche immédiate' ou 'Arrêt immédiat' offrent un contrôle total, ignorant les réglages automatiques basés sur l'humidité du sol.
Enfin, l'interface intègre un Contrôle Automatique, activable via le bouton 'Mode Auto' (couleur magenta). Une fois activé, le système effectue un contrôle autonome basé sur des seuils prédéfinis (par l'agriculteur), par exemple une humidité de 0%. Parallèlement, l'écran d'accueil présente un état global du système (Alimentation OK, Connexion GPRS OK, Réservoir Normal). Toutes les données et actions (alerte locale, SMS via SIM808) sont synchronisées localement, avec transmission des informations au Cloud GPRS pour une analyse analytique approfondie par des spécialistes.

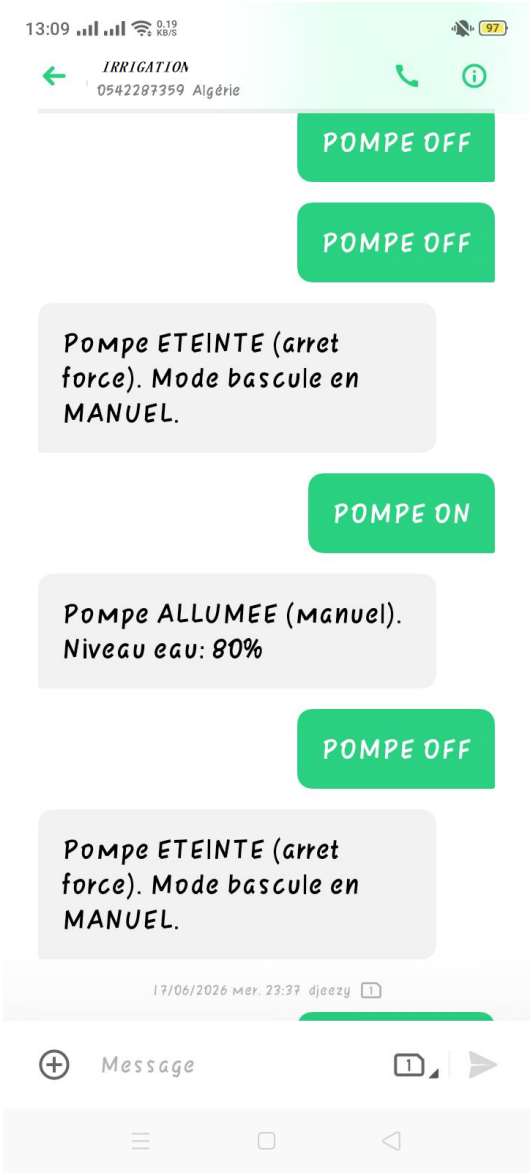


FIGURE III.14 – Commande de forçage (Allumer/Éteindre) de la pompe par SMS

III.6 Conclusion du chapitre

En conclusion, ce chapitre a permis de faciliter la réalisation du développement matériel et logiciel de notre système d'irrigation "IRRIGATION". En combinant la puissance de calcul de l'Arduino Méga 2560, la simplicité d'utilisation de l'application mobile IRRIGATION et l'analyse poussée fournie par la plateforme ThingSpeak en association avec MATLAB Analysis, nous avons démontré l'efficience d'une option IoT robuste. Ce prototype est ainsi idéal pour l'agriculture de précision, garantissant une gestion efficace des ressources hydriques en temps réel.

Conclusion générale et perspective

Conclusion

Au terme de ce projet, nous avons conçu et réalisé un prototype de système d'irrigation intelligente s'appuyant sur l'IoT. Ce travail a permis de répondre aux défis cruciaux de l'agriculture de précision, notamment la lutte contre le gaspillage de l'eau et le stress hydrique, des enjeux majeurs dans les régions arides comme l'Algérie.
L'application a mis en évidence l'efficacité d'une configuration axée sur la carte Arduino Mega 2560, capable de gérer simultanément les capteurs mesurant l'humidité du sol, le niveau du réservoir.
L'ajout du composant SIM808 a assuré une liaison robuste, permettant l'envoi des informations vers le cloud ThingSpeak et leur traitement par MATLAB afin d'optimiser la gestion prédictive des ressources, ainsi que l'envoi à l'application téléphone SMART AGRI qui permet la gestion des ressources en temps réel.
Voici les résultats clés obtenus grâce à cette réalisation :

- **Automatisation intelligente :** Le système ajuste en temps réel l'arrosage en fonction des besoins des cultures, évitant la surirrigation et le lessivage des nutriments.
- **Sécurisation de l'infrastructure :** L'utilisation d'un capteur ultrasonique permet de protéger la pompe contre les risques de marche à sec et de cavitation, prolongeant ainsi la durée de vie du matériel de l'agriculteur.
- **Supervision multiplateforme :** L'agriculteur dispose d'un contrôle total, que ce soit localement via un écran LCD ou grâce à une application mobile application SMART AGRI, développée sous MIT App Inventor.

En résumé, cette technologie représente une option efficace et commode pour la mise à jour des pratiques agricoles. Non seulement il permet d'importantes économies en matière d'eau et d'énergie, mais contribue aussi à la préservation de la fertilité des sols et des écosystèmes. À l'avenir, l'expansion de ce dispositif à des zones plus étendues et l'intégration de ressources énergétiques durables pourraient renforcer davantage son autonomie tout en accentuant son impact positif sur la durabilité de l'agriculture.

Perspective

des perspectives pour les travaux futurs, plusieurs axes de développement peuvent être envisagés afin de transformer ce prototype en une solution d'agriculture de précision à grande échelle. Sur le plan de l'autonomie, l'intégration de sources d'énergie renouvelables, telles que des panneaux solaires photovoltaïques, permettrait de s'affranchir de la dépendance au réseau électrique, rendant le système totalement autonome dans les zones rurales isolées. Concernant l'extension

géographique du dispositif, l'adoption de protocoles de communication longue portée et basse consommation, intégration de la technologie LoRa, offrirait la possibilité de surveiller de vastes parcelles tout en optimisant l'efficacité énergétique des capteurs.
Par ailleurs, l'intelligence du système pourrait être renforcée en passant d'une régulation par seuils exploité de l'historique des données sur ThingSpeak et des prévisions météorologiques en temps réel, ce qui permet au système d'etre capable d'anticiper les besoins hydriques et d'annuler les irrigations inutiles en cas de pluie. l'intégration des capteurs de nutriments (NPK), l'utilisation de drones pour la surveillance thermique aérienne permettrait d'obtenir une vision globale de la santé des cultures, cela assure une gestion durable et optimisée de l'ensemble de l'écosystème agricole.
niveau du réservoir pour protéger la pompe. Une évolution logique serait d'automatiser également le remplissage de ce réservoir à partir d'un puits ou d'une source d'eau externe dès que le niveau devient bas.
Ces perspectives visent à faire évoluer le prototype existant en une solution intégrale d'agriculture de précision, capable à améliorer la santé des plantations et l'usage des ressources.

Bibliographie

[1] Al-Fuqaha, A., Guizani, M., Mohammadi, M., Aledhari, M., et Ayyash, M. *Internet of Things : A Survey on Enabling Technologies, Protocols, and Applications*. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2015.

[2] L. Atzori, A. Iera, and G. Morabito, "The Internet of Things : A survey," *Computer Networks*, vol. 54, no. 15, pp. 2787–2805, 2010.

[3] Zhang, J. et Tao, D. *Empowering things with intelligence : A survey of the progress, challenges, and opportunities in artificial intelligence of things*. IEEE Internet of Things Journal, pages 7789–7817, 2020.

[4] Mahmood, Zaigham. *The Internet of Things in the Industrial Sector*. 2019.

[5] Stolojescu-Crisan, C., Crisan, C., et Butunoi, B. P. *An IoT-Based Smart Home Automation System*. Sensors, pages 3784, 2021.

[6] Castrignanò, A., Buttafuoco, G., Khosla, R., Mouazen, A. M., et Moshou, D. *Agricultural Internet of Things and Decision Support for Precision Smart Farming*. 2020.

[7] Food and Agriculture Organization. *Irrigation methods and systems*. Rome, 2021.

[8] World Bank. *Improving Irrigation Efficiency*. Washington, DC, 2020.

[9] INRA. *Techniques d'irrigation en agriculture*. Paris, 2018.

[10] World Bank. *Energy and Irrigation Nexus*. Washington, DC, 2020.

[11] Zhang, Y. et Tao, F. *AIoT : Intelligence of Things*. IEEE Access, 2020.

[12] Centenaro, M., Vangelista, L., Zanella, A., et Zorzi, M. *Long-Range Communications in Unlicensed Bands : The Rising Stars in the IoT*. IEEE Wireless Communications, 2016.

[13] MOKOSMART. *IoT Networking Technologies Guide*. 2020.

[14] Odheli, O., Lagunas, E., Maturo, N., Sharma, S. K., Chatzinotas, S., Montoya, J. F., et al. *Satellite Communications in the New Space Era : A Survey and Future Challenges*. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2021.

[15] Wolfert, S., Ge, L., Verdouw, C., et Bogaardt, M. J. *Big Data in Smart Farming*. Agricultural Systems, 2017.

[16] Qazi, S., Khawaja, B. A., et Farooq, Q. U. *IoT-equipped and AI-enabled next generation smart agriculture : A Critical Review, Current Challenges and Future Trends*. IEEE Access, 2022.

[17] Duckett, T., Pearson, S., Blackmore, S., et Grieve, B. *Agricultural robotics : the future of robotic agriculture*. arXiv preprint arXiv :1806.06762, 2018.

[18] Neethirajan, S. *Recent advances in wearable sensors for animal health management*. Sensing and Bio-Sensing Research, 2017.

[19] Kamilaris, A. et Prenafeta-Boldú, F. X. *Deep learning in agriculture*. Computers and Electronics in Agriculture, 2018.

[20] A. Muhammed, "Titre de la thèse ou du document scientifique," *Thèse de doctorat, HAL Open Science*, Ref. tel-05262853v2, 2025.

[21] Radio Algérie, "Article d'actualité sur l'eau ou l'agriculture en Algérie," *Radio Algérie News*, 22 Mars 2021. Disponible sur : https://radioalgerie.dz/news/fr/article/20210322/208940.html.

[22] Midi Libre, "Comment fonctionne l'irrigation en Lozère ?," *Journal Midi Libre*, 10 Octobre 2022. Disponible sur : https://www.midilibre.fr/2022/10/10/comment-fonctionne-lirrigation-en-lozere-10725452.php.

[23] Aujourd'hui le Maroc, "Irrigation localisée : 98% des superficies reconverties," *Aujourd'hui le Maroc Economie*, 2021. Disponible sur : https://aujourdhui.ma/economie/irrigation-localisee-98-des-superficies-reconverties.

[24] Lumaki, "Installation d'un système d'irrigation goutte-à-goutte pour un jardinage efficace et économe en eau," *Lumaki Jardinage & Ecologie*, 2023. Disponible sur : https://lumaki.fr/installation-dun-systeme-dirrigation-goutte-a-goutte-pour-un-jardinage-efficace-et-e

[25] Labbas, Anissa et Mechmache, Asma. *Serre agricole intelligente*. Mémoire de Master, Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen, Faculté de Technologie, Département de Génie Electrique et Electronique, 2023.

[26] V. Bartwal et S. Rawat, *Embedded Systems and Robotics with Arduino Mega*, CRC Press, Taylor & Francis Group, 2020.

[27] S. Monk, *Programming Arduino : Getting Started with Sketches*, McGraw-Hill Education, 2e éd., 2017.

[28] Abdessalam, I. et Mohand, D. *Commande numérique du massicot avec la carte Arduino MEGA 2560*. Mémoire de Fin d'Études, Université Mouloud Mammeri, 2016.

[29] Krama, A. et Gougui, A. *Etude et réalisation d'une carte de contrôle par Arduino via le système Android*. Mémoire de Master, Université Kasdi Merbah Ouargla, Faculté des Nouvelles Technologies de l'Information et de la Communication, 2015.

[30] S. Adhikary, A. Ghosh et S. Das, *Calibration, performance evaluation and comparative analysis of low-cost soil moisture sensors for precision agriculture*, Smart Agricultural Technology, vol. 7, p. 100398, Elsevier, 2024.

[31] Safsouf, Y., Ibourek, L. A., et Reha, A. *Casquette intelligente connectée à but préventif*. In Colloque sur les Objets et systèmes Connectés, 2019.

[32] Deraredj, R. *Etudes et réalisations de télémètres laser et à ultrasons*. Thèse de doctorat, 2015.

[33] Bellabd, Y., Tchikou, L., et Toubal, A. *Etude et Réalisation d'un Contrôleur d'Incubateur d'œufs*. Université Yahia Fares de Medea, 2019.

[34] Fezari, M. et Al Dahoud, A. *Environnement de développement intégré "IDE" pour Arduino. Applications WSN*. 2018.

[35] Belbachir Aboubakr. *Commande vocale pour équipements domestiques à base d'une carte Arduino*. Université Aboubakr Belkaïd Tlemcen, 2023.

[36] Karassik, I. J., Messina, J. P., Cooper, P., et Heald, C. C. *Pump Handbook* (4th ed.). New York, NY : McGraw-Hill Education, 2008.