

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université de Mohamed El Bachir El Ibrahimi de Borj Bou Arréridj
Faculté des Mathématiques et d'Informatique
Département d'informatique



MEMOIRE

Présenté en vue de l'obtention du diplôme

Master en informatique

Spécialité : "Réseaux et multimedia" et "Technologies de l'information et de la communication"

THEME

Application mobile d'agriculture intelligente

Présenté par :

GUEZZOU RABEH

BEZGHOUD ABDELMADJID

Soutenu publiquement le : 12 Juin 2025

Devant le jury composé de :

Président : BELAZOUG MOUHOUB

Examineur : BELHADJ FOUDIL

Encadreur : BENGUEDDOUDJ ABDEALLAH

2024/2025

Dédicace

Guezzou Rabeh :

Je dédie ce travail, en espérant qu'il soit une empreinte positive dans mon parcours scientifique, à l'âme de mon cher père, que Dieu ait son âme et l'accueille dans Son vaste paradis. Il m'a enseigné la valeur de l'effort et de la persévérance. À ma mère bien-aimée, que Dieu la protège et prolonge sa vie, elle qui a été et reste la source de tendresse et mon premier soutien. À mes frères chéris, qui ont été pour moi un appui et une aide à chaque étape. Je n'oublie pas non plus, en cette occasion, mes amis fidèles, qui ont illuminé mon chemin par leur présence et leur encouragement constant, et qui ont partagé avec moi les moments de joie et de défi tout au long de ce parcours. J'adresse ma profonde gratitude et ma reconnaissance à mes professeurs, dont le savoir et la guidance ont éclairé mon cheminement académique et ont contribué à la réalisation de ce projet. Je prie Dieu d'accorder sa miséricorde à mon père, de préserver et de guider ma famille et mes amis.

Bezghoud Abdelmadjid :

À ceux qui ont éclairé mon chemin et soutenu mes efforts tout au long de ce parcours académique.

À ma famille, source inépuisable d'amour, de patience et d'encouragement, dont le soutien indéfectible a été essentiel à la réalisation de ce travail.

À mes professeurs, qui ont partagé leur savoir avec passion et m'ont guidé avec expertise. Leur enseignement a façonné ma compréhension et alimenté ma curiosité.

À mes amis et camarades de promotion, dont le soutien moral, les échanges stimulants et l'esprit de camaraderie ont rendu cette expérience enrichissante et mémorable.

Remerciement

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude envers toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce projet de fin d'études.

Nos remerciements s'adressent en premier lieu à nos directeurs de mémoire, [Benguedoudj Abdallah], pour leur guidance experte, leur patience et leurs précieux conseils tout au long de ce travail. Leur soutien a été essentiel à l'aboutissement de cette recherche.

Nous souhaitons également remercier les membres du jury, pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre travail et pour leurs remarques constructives.

Notre reconnaissance va également à nos professeurs, dont l'enseignement de qualité a jeté les bases de nos connaissances et a nourri notre passion pour ce domaine.

Enfin, nous remercions chaleureusement nos familles et nos amis pour leur soutien moral indéfectible et leurs encouragements constants durant cette période intense.

Résumé

Ce travail présente la conception et le développement d'un système intelligent de gestion de l'irrigation agricole basé sur l'Internet des objets (IoT) et l'intelligence artificielle. Le système a été matérialisé sous forme d'une application mobile nommée Zar3i, destinée aux agriculteurs et chercheurs dans le domaine agro-technique. L'application utilise un microcontrôleur ESP32 pour lire en temps réel les données provenant de capteurs (température, humidité) et applique un traitement automatisé pour définir dynamiquement le moment et la durée d'irrigation selon les caractéristiques de chaque fruit cultivé. Elle s'appuie également sur une base de données agronomique locale et une interface utilisateur intuitive permettant de configurer les paramètres et de suivre les recommandations. L'architecture fonctionnelle de Zar3i a été modélisée à l'aide d'UML, et le système intègre des fonctions d'alerte et de contrôle à distance de la pompe, faisant de Zar3i un outil efficace pour soutenir une agriculture intelligente et durable.

Mots-clés : Agriculture intelligente – Internet des objets – Irrigation automatique – ESP32 – Application mobile – Capteurs – Zar3i.

Abstract

This project presents the design and development of an intelligent agricultural irrigation management system based on Internet of Things (IoT) and artificial intelligence technologies. The system was implemented as a mobile application named Zar3i, intended for farmers and researchers in the agro-tech field. The app utilizes an ESP32 microcontroller to collect real-time sensor data (temperature, humidity) and automatically analyzes it to determine optimal irrigation timing and duration based on each fruit type's specific needs. It relies on a local agronomic database and a user-friendly interface for configuration and recommendation tracking. The system architecture was modeled using UML, and it includes alert functions and remote pump control features, making Zar3i an effective tool for supporting smart and sustainable agriculture.

Keywords : Smart agriculture – Internet of Things – Automatic irrigation – ESP32 – Mobile app – Sensors – Zar3i.

ملخص

يعرض هذا العمل تصميم وتطوير نظام ذكي للتحكم في عملية الري الزراعي اعتماداً على تقنيات إنترنت الأشياء والذكاء الاصطناعي، وقد تم تطوير هذا النظام في شكل تطبيق موبايل يسمى Zar3i، موجه لفئة الفلاحين والباحثين في المجال الزراعي. يعتمد التطبيق على وحدة ESP32 لقراءة بيانات حقيقية من الحساسات (درجة الحرارة، الرطوبة) ويقوم بتحليلها آلياً لتحديد توقيت ومدة الري وفقاً لخصائص كل نوع من الفواكه والخضار المزروعة. كما يعتمد النظام على قاعدة بيانات زراعية محلية وواجهة تفاعلية تسهل ضبط الإعدادات ومتابعة التوصيات. تم تصميم هيكل التطبيق باستخدام UML وتم تضمين وظائف تنبيه وتحكم عن بعد في المضخة، مما يجعل Zar3i أداة فعالة لدعم الزراعة الذكية المستدامة.

الكلمات المفتاحية: الزراعة الذكية - إنترنت الأشياء - ري أوتوماتيكي - ESP32 - تطبيق موبايل - حساسات - Zar3i.

Table des matières

Liste des figures	ix
Liste des tableaux	xii
General Introduction	1
1 État de l’art	4
1.1 Introduction :	5
1.2 Technologies pour l’irrigation intelligente :	5
1.2.1 Définition et importance de l’irrigation intelligente	5
1.2.2 Types de systèmes d’irrigation :	5
1.2.3 la crise l’eau : causes et enjeux	9
1.2.4 Solutions classiques et innovantes :	11
1.2.5 Agriculture de précision :	12
1.2.6 Capteurs, automatismes et IoT :	13
1.2.7 Limites des solutions existantes :	14
1.3 Application de techniques de machine learning au traitement de données visuelles :	15
1.3.1 Introduction au machine learning dans l’agriculture :	15
1.3.2 Apprentissage profond et réseaux de neurones convolutifs (CNN) :	16
1.3.3 Applications agricoles des CNN :	16
1.3.4 Présentation d’études similaires :	17
1.3.5 Enjeux et défis :	18
1.4 Développement d’une solution intégrée pour la détection des cultures et l’automatisation de l’arrosage avec ESP32 :	19

1.5	Conclusion :	20
2	Conception du système :	21
2.1	Introduction :	22
2.2	Description détaillée de Notre Solution "Zar3i – Agriculture intelligente intégrée" :	22
2.3	Comparaison de Zar3i avec d'autres applications :	30
2.3.1	Solution proposée :	32
2.4	Cahier des charges :	33
2.4.1	Objectifs du système :	33
2.4.2	Spécifications matérielles et logicielles du projet Zar3i :	34
2.4.3	1. Partie matérielle (Hardware) :	34
2.4.4	2. Partie logicielle (Software) :	38
2.4.5	Coût estimé des composants du projet :	39
2.4.6	Exigences de performance :	39
2.5	Les Diagrammes Du UML :	40
2.5.1	Diagramme De Classe :	40
2.5.2	Diagramme de Cas d'Utilisation :	42
2.5.3	Diagramme de Séquence :	44
2.6	Conclusion :	48
3	Réalisation Et Resultats :	49
3.1	Introduction :	50
3.1.1	Présentation générale des objectifs du chapitre :	50
3.1.2	Rappel rapide de la portée technique du projet :	50
3.1.3	Méthodologie adoptée pour la réalisation et les tests :	50
3.2	Implémentation technique :	51
3.2.1	Présentation de l'interface Application :	51
3.3	Architecture et fonctionnement du prototype ESP32 :	66
3.3.1	Fonctionnement et pilotage de l'arrosage :	66
3.4	Évaluation du prototype Zar3i en environnement réel :	67
3.4.1	Test De Protoype Sur terrain :	67
3.5	Approche expérimentale et analyse de résultats :	72

3.5.1	Développement du modèle de classification des maladies végétales : . .	72
3.6	Résultats expérimentaux et analyse :	75
3.6.1	Métriques obtenues :	75
3.6.2	Visualisation des prédictions :	76
3.6.3	Limites observées :	80
3.7	Technologies et perspectives :	80
3.7.1	Définitions techniques :	80
3.7.2	Comparaison avec d'autres méthodes :	80
3.8	Axes de recherche futurs :	80
3.9	Conclusion :	82
Références		83

Table des figures

1.1	Irrigation par aspersion	6
1.2	Micro-irrigation	7
1.3	Irrigation de surface automatisée	7
1.4	Irrigation a la main	8
1.5	Architecture du système de irrigation de précision :	9
1.6	L'agriculture numérique : une multitude de données générées par les capteurs .	13
2.1	Fonctionnement du système intelligent de Zar3i	23
2.2	Organigramme du fonctionnement du mode d'arrosage automatique par pro- fondeur	25
2.3	Organigramme du fonctionnement du mode d'arrosage automatique par super- ficiel	26
2.4	Organigramme de gestion des alertes climatiques via Zar3i	28
2.5	module ESP32 30 pins	34
2.6	capteur de température DS18B20	35
2.7	capteur d'humidité du sol	35
2.8	module Pompe a eau 5V	36
2.9	module Module Relais 5V	36
2.10	Breadboard (plaque d'essai)	37
2.11	Diagramme De Classe	41
2.12	Diagramme de Cas d'Utilisation	43
2.13	Diagramme de Séquence Connexion	44
2.14	Diagramme de Séquence Demenssion De Terrain	45
2.15	Diagramme de Séquence Déviser Terrain	45
2.16	Diagramme de Séquence De Planter terrain	46

2.17	Diagramme de Séquence De Arroser terrain	47
3.1	Interface utilisateur pour le choix de la langue.	51
3.2	Interface d'authentification de l'application Zar3i.	52
3.3	Interface de saisie des dimensions et division du terrain.	52
3.4	Interface de dimensionnement du terrain.	53
3.5	Interface de division en 2 parties horizontales.	54
3.6	Division en 2 parties verticales.	54
3.7	Division en 4 parties.	55
3.8	Interface de sélection des plantes.	56
3.9	Interface de Plantation	57
3.10	Interface de sélection du mode d'arrosage.	58
3.11	Interface de démarrage d'arrosage.	59
3.12	Interface d'arrêt de l'arrosage.	60
3.13	Choix du type d'arrosage automatique.	61
3.14	Historique de l'arrosage en profondeur.	62
3.15	Historique de l'arrosage superficiel	63
3.16	Page des notifications.	64
3.17	Interface des statistiques.	65
3.18	Shéma du Prototype ESP32.	66
3.19	Test De Prototype Sur terrain	67
3.20	test de température	68
3.21	test d'humidité	69
3.22	Test De La pompe à eau	70
3.23	Test de relais	71
3.24	Évolution de la précision (accuracy) sur l'ensemble d'entraînement et de validation	74
3.25	Évolution de la perte (loss) sur l'ensemble d'entraînement et de validation . . .	75
3.26	1-resultat de 32 prediction	76
3.27	2-resultat de 32 prediction	77
3.28	3-resultat de 32 prediction	78
3.29	4-resultat de 32 prediction	79

Liste des tableaux

2.1	Conclusion comparative des applications	33
2.2	Coût estimé des composants du projet	39
3.1	Répartition des ensembles de données	73
3.2	Architecture du réseau convolutif	74
3.3	Résultats sur l'ensemble de validation	75
3.4	Comparaison hypothétique avec d'autres architectures	80

Introduction Générale :

Contexte et Problématique :

Contexte :

L'agriculture intelligente représente une réponse innovante aux défis actuels liés à la raréfaction des ressources, aux changements climatiques et à la nécessité d'améliorer la productivité agricole. Grâce à l'intégration de technologies telles que les capteurs connectés, l'Internet des Objets (IoT) et l'intelligence artificielle, elle permet une gestion plus précise et efficace des intrants, notamment de l'eau. L'irrigation intelligente, associée à l'analyse des données environnementales et visuelles, optimise l'utilisation des ressources tout en améliorant la qualité des cultures. Cette transition vers une agriculture de précision offre ainsi des solutions durables et adaptées aux besoins réels du terrain, tout en renforçant la résilience des systèmes agricoles face aux aléas climatiques.

Problématique :

Dans un environnement agricole en constante évolution, la nécessité de concevoir des outils technologiques simples, robustes et intelligents devient une priorité, notamment pour les exploitants agricoles de petite et moyenne échelle. Malgré la disponibilité de certaines solutions avancées, la majorité d'entre elles restent inaccessibles, trop coûteuses ou inadaptées aux réalités du terrain. De plus, ces solutions ne proposent souvent qu'un nombre limité de fonctionnalités, négligeant l'intégration entre la collecte de données en temps réel, l'automatisation des actions et l'analyse visuelle intelligente.

Face à ce constat, le présent projet propose de développer une solution complète et accessible d'agriculture intelligente, à travers l'application Zar3i. L'objectif est de créer un outil capable de combiner, dans une seule plateforme, le suivi environnemental (température, humi-

dité), le pilotage automatique de l'irrigation, la détection visuelle des anomalies sur les fruites et légumes, ainsi qu'un système de notifications intelligentes le tout en fonctionnement local, sans dépendance permanente au cloud, et à faible coût.

Objectifs du projet :

Ce projet vise à concevoir et réaliser un système d'irrigation intelligent capable d'ajuster automatiquement les doses d'eau en fonction des besoins réels des cultures, grâce à l'utilisation de capteurs et de technologies connectées. Par ailleurs, le système intégrera un modèle de classification basé sur l'apprentissage automatique pour évaluer la qualité des fruits, permettant ainsi une gestion complète et optimisée de la production agricole. Les objectifs spécifiques sont :

1- Étudier les technologies d'irrigation intelligente et les méthodes de classification des fruits et légumes .

2- Concevoir un système intégré combinant la gestion de l'irrigation, la classification de la qualité des fruits et légumes, et la détection de leurs maladies.

3- Réaliser un prototype fonctionnel et tester ses performances sur des données réelles.

Méthodologie adoptée :

Pour atteindre ces objectifs, une méthodologie en plusieurs étapes sera adoptée :

1- Revue bibliographique pour analyser l'état de l'art des systèmes d'irrigation intelligents et des techniques de machine learning appliquées à la classification des fruits et légumes.

2- Spécification des besoins à travers un cahier des charges précis.

3- Conception fonctionnelle et technique du système, incluant la modélisation UML (diagrammes de cas d'utilisation, séquence, classes, etc.).

4- Développement et intégration des modules d'irrigation et de classification.

5- Tests et validation expérimentale pour évaluer l'efficacité du système.

Plan du mémoire :

Le mémoire est structuré en trois parties principales :

Chapitre 1 : Technologies pour l'irrigation intelligente et applications du machine learning dans l'agriculture. Ce chapitre présente le contexte technologique, les capteurs, les systèmes IoT, ainsi que les méthodes d'apprentissage profond utilisées pour la classification des images agricoles.

Chapitre 2 : Conception du système. Ce chapitre détaille le cahier des charges, et les diagrammes UML qui définissent l'architecture du système.

Chapitre 3 : Réalisation et résultats. Cette partie est consacrée à la mise en œuvre pratique du système, aux tests effectués, et à l'analyse des résultats obtenus.

Chapitre 1

État de l'art

1.1 Introduction :

Ce chapitre présente les technologies clés de l'irrigation intelligente et les méthodes de machine learning appliquées à la classification des fruits. Il met en lumière l'importance de gérer efficacement l'eau en agriculture et d'automatiser l'évaluation de la qualité des fruits grâce à l'analyse d'images.

1.2 Technologies pour l'irrigation intelligente :

1.2.1 Définition et importance de l'irrigation intelligente

1.2.1.1 Définition :

Une irrigation consiste en un apport artificiel d'eau douce sur des terres à des fins agricoles, c'est donc une forme de précipitation artificielle, souvent automatisée avec une irrigation par aspersion mais aussi manuelle. L'irrigation est utilisée pour favoriser la croissance des cultures agricoles, l'entretien des paysages, et la végétalisation des sols perturbés dans les zones arides et pendant les périodes de pluies insuffisantes. Le terrain irrigué devient plus fertile [1]

1.2.1.2 Importance :

Face à la raréfaction des ressources hydriques et à la pression croissante sur l'agriculture due à la croissance démographique et aux changements climatiques, l'optimisation de la consommation d'eau devient essentielle. L'agriculture est en effet le secteur qui consomme la majeure partie de l'eau douce mondiale. L'irrigation intelligente permet de réduire significativement la consommation d'eau tout en améliorant la productivité et la qualité des cultures, en évitant le stress hydrique et les dommages liés à une irrigation excessive. Elle favorise également une agriculture durable en limitant les impacts environnementaux négatifs comme l'érosion des sols et la pollution des nappes phréatiques. Ainsi, l'irrigation intelligente joue un rôle crucial dans la transition vers une agriculture de précision et une gestion durable des ressources naturelles.

1.2.2 Types de systèmes d'irrigation :

Les systèmes d'irrigation constituent un élément fondamental pour la gestion de l'eau en agriculture. Ils permettent de distribuer l'eau aux cultures de manière contrôlée, avec des méthodes

variées adaptées aux types de cultures, aux sols, et aux conditions climatiques. On distingue principalement trois types de systèmes d'irrigation classiques, auxquels s'ajoutent les systèmes intelligents qui intègrent des technologies avancées pour optimiser leur fonctionnement. [2]

1.2.2.1 Irrigation par aspersion :

Ce système simule la pluie en projetant de l'eau sous forme de gouttelettes sur la surface cultivée à l'aide de buses ou d'arroseurs. distribuent l'eau sur les cultures avec un arrosage. Les systèmes d'irrigation par aspersion incluent :déplacement manuel ; système fixe ; rampe mobile sur roue ; canon arroseur, voyageur, asperseur ambulant en hauteur ou rotatif ; déplacement linéaire ; et pivot central.[2]



FIGURE 1.1 – Irrigation par aspersion

1.2.2.2 Micro-irrigation :

distribuent l'eau à la surface du sol, très près de la culture, ou sous le sol. Les systèmes de micro-irrigation incluent :goutte à goutte en surface ; goutte à goutte sous la surface ; micro-asperseurs ; diffuseurs ; micro-jets ; et arrosage manuel.[2]



FIGURE 1.2 – Micro-irrigation

1.2.2.3 Irrigation de surface automatisée :

l'eau s'écoule sur le sol par gravité, soit par inondation de la surface ou à l'aide de rigoles. Les systèmes d'irrigation de surface incluent : par gravité (gravitaire) ; par rigoles d'infiltration ; infiltration (à la raie) ; des planches par levées (risberme) ; par bassin ; par inondation non contrôlée ; et par submersion ; exclut les systèmes d'irrigation goutte à goutte en surface.[2]



FIGURE 1.3 – Irrigation de surface automatisée

1.2.2.4 Irrigation À la main :

Le simple arrosage à la main d'une surface de culture est un système d'irrigation, qu'il se fasse avec un tuyau d'arrosage ou avec un banal arrosoir en plastique. Cette pratique ne peut pas convenir à des grandes surfaces.[3]



FIGURE 1.4 – Irrigation a la main

1.2.2.5 Irrigation de précision :

Le concept d'agriculture de précision a émergé avec la démocratisation des technologies numériques et le développement des objets connectés. L'irrigation de précision consiste à piloter les apports d'eau en se basant sur des informations mesurées sur les parcelles.

Il faut tenir compte des données telles que :

- le développement des plantes ;
- les conditions météorologiques (température du sol, de l'air, vent, pluviométrie, etc.) ;
- la tensiométrie du sol.

À partir de ces valeurs et de leur évolution dans le temps, l'agriculteur adapte son irrigation pour :

- apporter la juste dose d'eau nécessaire aux plantes .
- limiter l'utilisation des ressources en eau et en énergie.

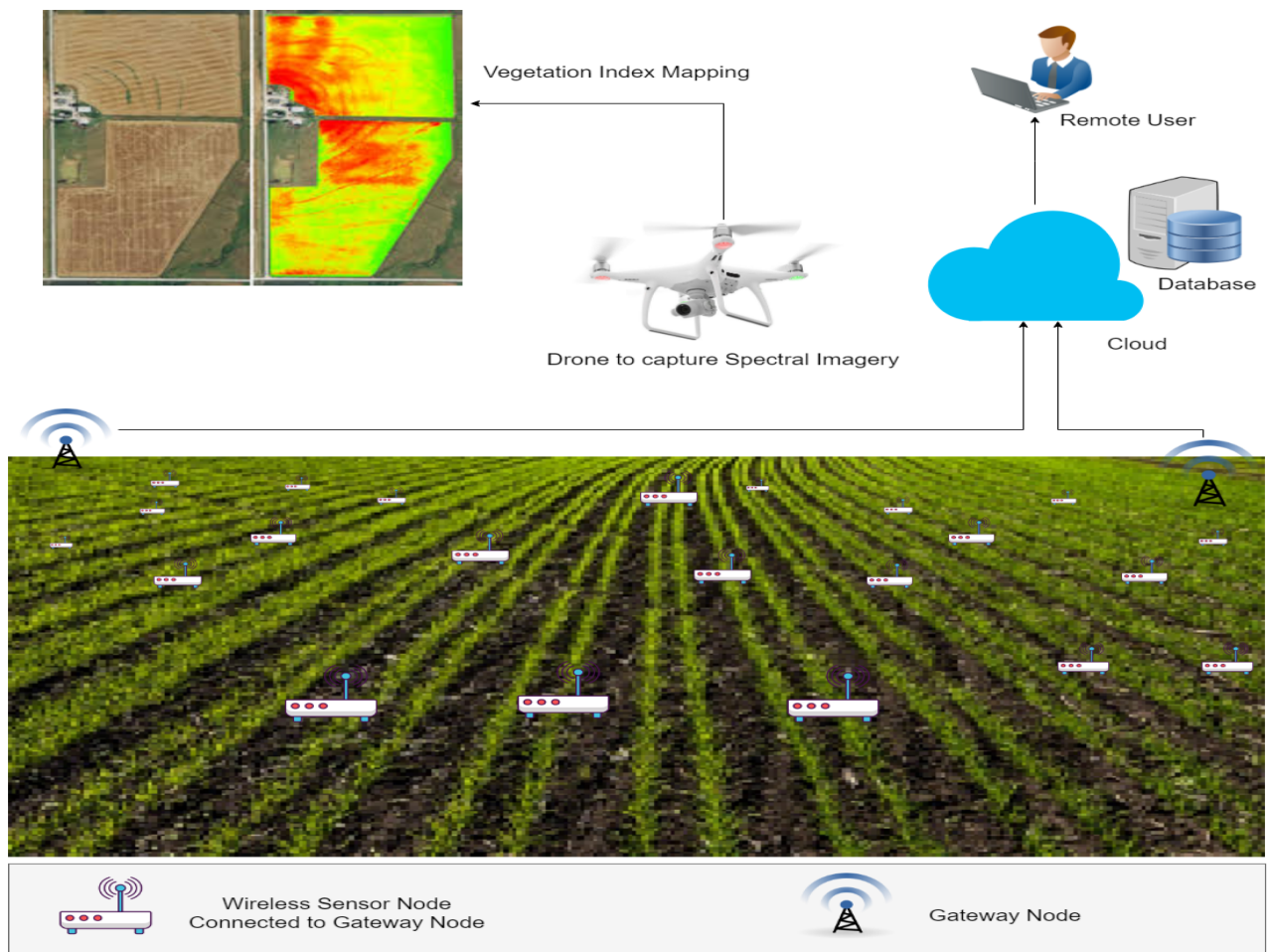


FIGURE 1.5 – Architecture du système de irrigation de précision :

1.2.2.6 Intégration de l'irrigation intelligente :

Les systèmes d'irrigation intelligents combinent ces types traditionnels avec des capteurs (mesure de l'humidité du sol, température, luminosité) et des automatismes pilotés par des microcontrôleurs ou des plateformes IoT. Cette intégration permet d'adapter en temps réel les doses d'eau aux besoins précis des cultures, améliorant ainsi l'efficacité de l'irrigation, la productivité agricole et la préservation des ressources en eau.[4]

1.2.3 la crise l'eau : causes et enjeux

En ce début du XXI^e siècle, la terre et ces formes de vie diverses et abondantes (notamment ses 6 milliards d'être humaine), sont confrontées à une grave crise de l'eau. Tous les signes suggèrent que cette crise s'intensifie et que la situation continuera d'empirer tant qu'aucune action

corrective ne sera menée. En effet, l'eau constitue l'élément qui garde le monde en vie, l'importance de l'eau pour la vie humaine n'est plus à démontrer car il est parmi les composants essentiels dans l'équilibre de l'écosystème dans le monde. Cette ressource qui répond aux besoins fondamentaux de l'homme est un élément clé de développement, en particulier pour générer et entretenir la prospérité par le biais de l'agriculture, de la pêche la production d'énergie, de l'industrie, des transports et du tourisme. En outre, l'eau est vitale pour tout l'écosystème du monde.[5]

1.2.3.1 Causes de la crise de l'eau :

- Une ressource déjà rare : Plus de 70% de la surface globale est recouverte d'eau, mais seulement 2,5% de cette masse est d'eau douce, le reste étant de l'eau salée des océans. Parmi cette eau douce, 1%, soit moins de 0,007% de la masse globale des eaux est d'accès facile, présente dans les lacs, rivières, réservoirs et nappes souterraines peu profondes. Seules ces réserves sont régulièrement reconstituées par les précipitations et la neige et peuvent être considérées comme une ressource renouvelable..
- Une répartition inégale : Les régions largement irriguées par de grands fleuves disposent d'importantes réserves en eau, malgré des variations entre saisons sèche et humide. Le bassin de l'Amazone charrie 16% de la masse des eaux fluviales du globe, tandis que les zones arides, représentant 40% des terres émergées, ne disposent que de 2% du total..
- Pollution de l'eau : L'industrie restitue aux fleuves et lacs la majeure partie de l'eau utilisée, mais souvent contaminée. L'eau de drainage de l'irrigation contient souvent engrais et pesticides qui polluent sources et rivières. Andras Szollosi-Nagy, Directeur de la Division des sciences de l'eau de l'UNESCO, qualifie la pollution des eaux de « bombe à retardement ». Concernant les réserves d'eaux souterraines en Europe, la couche supérieure de l'aquifère est condamnée. La concentration en nitrates et phosphates est si forte qu'il faudra forer un deuxième niveau, si celui-ci existe.
- Mauvaise gestion des ressources : Dans plusieurs régions, l'exploitation inefficace et non durable des nappes phréatiques et des cours d'eau aggrave la pénurie.

1.2.3.2 Enjeux liés à la crise de l'eau :

La pénurie d'eau a des impacts multiples et interconnectés :

- Sécurité alimentaire : La limitation de l'eau réduit la production agricole, mettant en danger la sécurité alimentaire mondiale.
- Conflits socio-économiques : La rareté peut provoquer des tensions entre utilisateurs, régions, et même pays, notamment dans les bassins transfrontaliers.
- Santé publique : Le manque d'eau potable et l'insuffisance d'assainissement augmentent les risques sanitaires.
- Écosystèmes fragiles : Les écosystèmes aquatiques souffrent des prélèvements excessifs, compromettant la biodiversité.

Face à ces enjeux, il devient impératif d'adopter des stratégies durables de gestion et d'utilisation de l'eau, parmi lesquelles l'irrigation intelligente occupe une place majeure en agriculture.

1.2.4 Solutions classiques et innovantes :

La gestion de l'irrigation a évolué au fil du temps, passant de méthodes traditionnelles simples à des solutions technologiques avancées visant à optimiser l'utilisation de l'eau tout en augmentant la productivité agricole.

1.2.4.1 Solutions classiques :

Les méthodes classiques d'irrigation comprennent l'irrigation par inondation, l'irrigation de surface, et les systèmes d'irrigation gravitaire. Ces méthodes, bien que largement utilisées en raison de leur simplicité et de leur faible coût initial, présentent plusieurs limitations, notamment une faible efficacité hydrique, des pertes importantes par évaporation et percolation, et une répartition inégale de l'eau. Elles nécessitent souvent une gestion manuelle intensive et ne tiennent pas compte des besoins réels des cultures ou des conditions environnementales en temps réel.[6]

1.2.4.2 Solutions innovantes :

Avec l'avancée des technologies numériques et des capteurs, de nouvelles solutions d'irrigation intelligente ont émergé. Ces systèmes intègrent des capteurs d'humidité du sol, des stations météorologiques, des automates programmables, et des plateformes IoT pour surveiller et contrôler

l'irrigation de manière automatisée et précise. L'objectif est d'ajuster l'apport en eau en fonction des données collectées, ce qui permet de réduire le gaspillage, d'améliorer la santé des plantes, et d'optimiser les ressources.[6]

Parmi les innovations récentes, on trouve également l'utilisation de techniques d'intelligence artificielle, telles que le machine learning, pour prédire les besoins en eau, détecter les anomalies, et prendre des décisions d'irrigation optimales. Ces systèmes offrent une gestion plus fine et proactive, capable de s'adapter aux variations climatiques et aux caractéristiques spécifiques des cultures.

1.2.5 Agriculture de précision :

L'agriculture de précision est un principe de gestion des parcelles agricoles visant à optimiser rendements et investissements, en tenant compte des variabilités des milieux et conditions entre parcelles et à l'échelle intra-parcellaire. Ce concept, apparu à la fin du XXe siècle, a influencé le travail du sol, les semis, la fertilisation, l'irrigation, la pulvérisation de pesticides, etc. Il requiert l'utilisation de techniques comme l'imagerie satellitaire et l'informatique, et s'appuie sur des moyens de localisation par GPS. Les promoteurs espèrent obtenir un système d'aide à la décision efficace à grande et petite échelle, optimisant les rendements tout en préservant les ressources naturelles, financières et énergétiques.[7]

Grâce à l'AP, il est possible d'adapter les pratiques culturales notamment l'irrigation, la fertilisation, et la protection phytosanitaire de manière ciblée et personnalisée, réduisant ainsi les intrants, les coûts, et les impacts environnementaux. L'irrigation intelligente s'inscrit pleinement dans cette démarche, en permettant une gestion fine de l'eau basée sur des mesures en temps réel et des modèles prédictifs.[7]

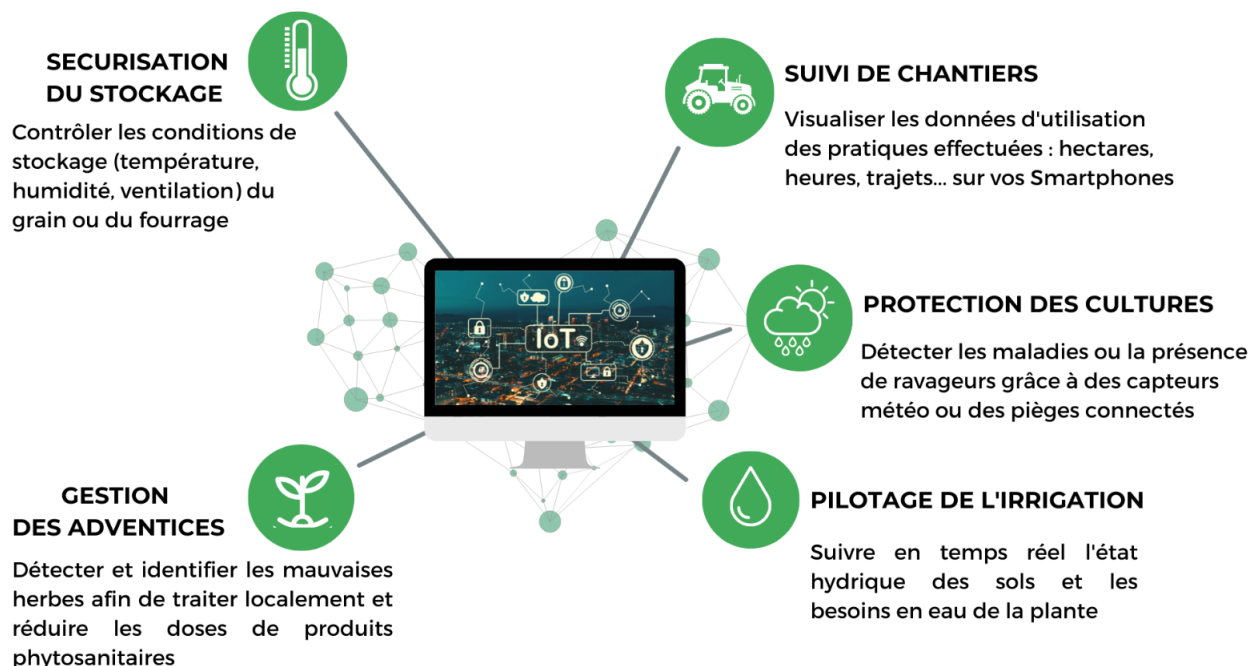


FIGURE 1.6 – L'agriculture numérique : une multitude de données générées par les capteurs

1.2.6 Capteurs, automatismes et IoT :

Les capteurs, les systèmes automatisés et l'Internet des Objets (IoT) sont des composants essentiels des systèmes d'irrigation intelligente. Ils permettent la collecte, le traitement et la transmission des données environnementales en temps réel, afin d'optimiser la gestion de l'eau et d'améliorer la productivité agricole.[8]

1.2.6.1 Capteurs :

Les capteurs mesurent des paramètres variés tels que l'humidité du sol, la température, le pH et la conductivité électrique. Ces mesures précises fournissent une connaissance fine des conditions du milieu, indispensables pour adapter les cycles d'irrigation aux besoins réels des plantes.[8]

1.2.6.2 Automatismes :

Les automatismes permettent d'exécuter des actions sans intervention humaine, basées sur des règles préprogrammées ou des algorithmes intelligents. Par exemple, ils contrôlent l'ouverture et la fermeture des vannes, l'activation des pompes, ou ajustent la durée et la fréquence d'arrosage en fonction des données recueillies par les capteurs.[8]

1.2.6.3 Internet des Objets (IoT) :

L'IoT, ou Internet des objets, désigne le processus de connexion d'objets physiques à Internet, des objets du quotidien tels que les ampoules, aux dispositifs médicaux, appareils portables, appareils intelligents ou encore feux de circulation routière dans les villes intelligentes.[8]

1.2.6.4 Arduino :

Arduino est un circuit imprimé sur lequel se trouve un microprocesseur (calculateur) qui peut être programmé pour analyser et produire des signaux électriques, de manière à effectuer des tâches très diverses comme la charge de batteries, la domotique (le contrôle des appareils domestique (éclairage, chauffage...), le pilotage d'un robot, etc. C'est une plateforme basée sur une interface entrée/sortie simple et sur un environnement de développement utilisant la technique du Processing/Wiring. Arduino peut être utilisé pour construire des objets interactifs indépendants (prototypage rapide), ou bien peut être connecté à un ordinateur pour communiquer avec ses logiciels

La programmation facile et la compatibilité avec des modules de communication sans fil (Wi-Fi, Bluetooth) rendent Arduino adapté à des applications IoT, facilitant la supervision à distance et le contrôle en temps réel. Arduino contribue ainsi à démocratiser les technologies d'irrigation intelligente, en rendant accessible la création de prototypes fonctionnels pour les agriculteurs et les chercheurs .[8]

L'intégration de l'AP contribue à augmenter la productivité, la qualité des récoltes, et la durabilité des exploitations agricoles. Elle joue un rôle clé face aux défis de la sécurité alimentaire et de la préservation des ressources naturelles dans un contexte de changement climatique.[8]

1.2.7 Limites des solutions existantes :

Malgré les avancées significatives dans le domaine des systèmes d'irrigation intelligente, plusieurs limites persistent et freinent leur adoption et leur efficacité à grande échelle.[9]

1.2.7.1 Coûts élevés :

Les systèmes modernes d'irrigation intelligente impliquent souvent des investissements importants en matériel (capteurs, actionneurs, microcontrôleurs) et en infrastructure de communication.

Ces coûts peuvent être prohibitifs pour les petits exploitants agricoles, limitant ainsi leur accessibilité.[9]

1.2.7.2 Complexité d'installation et de maintenance :

L'intégration et la maintenance des systèmes intelligents demandent des compétences techniques spécifiques. Les utilisateurs doivent être formés pour gérer les capteurs, les réseaux IoT, et les logiciels associés, ce qui représente un obstacle dans les zones rurales où les ressources humaines qualifiées sont rares.[9]

1.2.7.3 Dépendance à la connectivité :

Beaucoup de solutions reposent sur une connectivité Internet stable et continue, dans plusieurs régions rurales et en développement, l'accès à Internet est limité ou intermittent, ce qui réduit la fiabilité des systèmes basés sur le cloud et la supervision à distance.[9]

1.2.7.4 Robustesse et fiabilité des capteurs :

Les capteurs exposés aux conditions agricoles (humidité, poussière, températures extrêmes) peuvent subir des défaillances ou des dérives de mesure. Cela impacte la précision des données recueillies et, par conséquent, l'efficacité du système d'irrigation.[9]

1.2.7.5 Intégration limitée avec d'autres systèmes agricoles :

Les solutions actuelles sont souvent cloisonnées et peu compatibles avec d'autres technologies agricoles (par exemple, systèmes de gestion des cultures, drones, analyse de sol), limitant leur potentiel dans une approche intégrée d'agriculture de précision.[9]

1.3 Application de techniques de machine learning au traitement de données visuelles :

1.3.1 Introduction au machine learning dans l'agriculture :

Le machine learning, branche de l'intelligence artificielle, permet aux systèmes d'analyser des données complexes et de s'améliorer automatiquement. En agriculture, il est utilisé pour optimiser les ressources, détecter les maladies, évaluer la qualité des produits, et prévoir les

rendements. L'analyse des données visuelles par machine learning facilite la classification et la détection à grande échelle, contribuant ainsi à une agriculture de précision plus efficace et durable.[10]

1.3.2 Apprentissage profond et réseaux de neurones convolutifs (CNN) :

L'apprentissage profond (Deep Learning) est une sous-catégorie du machine learning qui utilise des architectures de réseaux de neurones artificiels profonds, capables d'extraire automatiquement des caractéristiques complexes à partir de données brutes, notamment des images. Cette capacité en fait un outil particulièrement adapté au traitement d'images agricoles pour des tâches telles que la classification, la détection et la segmentation.[10]

Les réseaux de neurones convolutifs (CNN) sont un type spécifique d'architecture de réseaux de neurones profonds, conçus pour analyser efficacement les données visuelles. Ils reposent sur des couches convolutionnelles qui permettent de détecter des motifs locaux dans les images (bords, textures, formes), combinées à des couches de regroupement (pooling) pour réduire la dimensionnalité tout en conservant les informations essentielles. Cette structure hiérarchique permet aux CNN de reconnaître des objets complexes et variés, comme les différents types et qualités de fruits.[10]

Dans le domaine agricole, les CNN ont montré une grande efficacité pour automatiser la classification des fruits selon leur maturité, leur taille, ou leur présence de défauts, contribuant ainsi à améliorer la qualité et la traçabilité des produits. Leur capacité à traiter rapidement de grandes quantités d'images permet une mise en œuvre pratique dans les chaînes de production et les systèmes de surveillance agricoles.[10]

1.3.3 Applications agricoles des CNN :

Les réseaux de neurones convolutifs (CNN) ont trouvé de nombreuses applications dans le secteur agricole, notamment grâce à leur capacité à analyser efficacement des images complexes et variées. Ces applications contribuent à l'automatisation de tâches cruciales qui étaient auparavant réalisées manuellement, avec une précision et une rapidité accrues.[11]

Parmi les principales applications des CNN en agriculture, on trouve :

1.3.3.1 Classification des fruits et légumes :

Les CNN permettent d'identifier différentes variétés, niveaux de maturité, et qualités des produits, facilitant ainsi le tri et le contrôle qualité automatique dans les chaînes de production.[\[11\]](#)

1.3.3.2 Détection de maladies et de parasites :

En analysant les images des feuilles, des tiges ou des fruits, les CNN peuvent détecter précocement des signes de maladies ou d'attaques parasitaires, permettant une intervention rapide pour limiter les pertes.[\[11\]](#)

1.3.3.3 Estimation des rendements agricoles :

Les images satellitaires ou aériennes traitées par CNN aident à évaluer la biomasse, la santé des cultures et les prévisions de récoltes.[\[11\]](#)

1.3.3.4 Surveillance et cartographie des cultures :

Les CNN sont utilisés pour segmenter les parcelles cultivées, détecter les mauvaises herbes, ou surveiller l'état général des champs à partir d'images prises par drones ou satellites.[\[11\]](#)

Ces applications démontrent l'intérêt croissant pour l'intégration des CNN dans les systèmes agricoles intelligents, améliorant la précision, la productivité, et la durabilité des pratiques agricoles.

1.3.4 Présentation d'études similaires :

De nombreuses recherches ont démontré l'efficacité des techniques d'apprentissage profond, en particulier les réseaux de neurones convolutifs (CNN), pour le traitement des images agricoles et la classification automatique des fruits selon leur qualité.

- Étude 1 : Classification des pommes par qualité Fuentes et autre. ont développé un système basé sur des CNN pour classifier la qualité des pommes en fonction de leur apparence extérieure, détectant avec précision les défauts tels que les taches, les ecchymoses et les maladies. Ce système a permis d'automatiser le tri des fruits, améliorant la rapidité et la fiabilité par rapport aux méthodes manuelles.[\[11\]](#)

- Étude 2 : Détection précoce des maladies foliaires Mohanty et autre. ont utilisé des CNN pour identifier diverses maladies sur les feuilles de plusieurs cultures à partir d'images, atteignant une précision élevée. Cette approche offre une solution rapide pour la surveillance et la gestion des maladies dans les champs.[12]
- Étude 3 : Classification des fruits dans une chaîne de production automatisée Kamilaris et Prenafeta-Boldú ont présenté une revue des applications des CNN en agriculture, soulignant notamment leur utilisation dans les chaînes de production pour trier et classifier automatiquement les fruits selon leur taille, maturité et qualité. Ces systèmes permettent de réduire les coûts et d'augmenter la productivité.[10]

Ces études illustrent le potentiel considérable des techniques de deep learning dans l'automatisation et l'amélioration des processus agricoles, justifiant leur intégration dans les systèmes intelligents comme celui proposé dans ce projet.

1.3.5 Enjeux et défis :

L'intégration des techniques de machine learning, en particulier des réseaux de neurones convolutifs (CNN), dans le domaine agricole présente de nombreuses opportunités, mais elle est aussi confrontée à plusieurs défis majeurs qui doivent être pris en compte pour assurer leur efficacité et leur adoption à grande échelle.[10]

1.3.5.1 Enjeux :

- Amélioration de la productivité et de la qualité : Les technologies de machine learning permettent d'optimiser la gestion des cultures, de détecter précocement les maladies, et de classifier la qualité des fruits, contribuant ainsi à une agriculture plus performante et durable.[10]
- Réduction des coûts et automatisation : L'automatisation des tâches grâce au machine learning peut réduire la dépendance à la main-d'œuvre et les coûts liés aux contrôles manuels, tout en augmentant la rapidité et la précision des analyses.[10]
- Gestion durable des ressources : En optimisant l'utilisation des intrants comme l'eau et les fertilisants, ces technologies favorisent une agriculture respectueuse de l'environnement.[10]

1.3.5.2 Défis :

- Qualité et quantité des données : Les modèles de machine learning nécessitent de grandes quantités de données annotées et de qualité, ce qui peut être difficile à obtenir dans le contexte agricole.[10]
- Variabilité des conditions agricoles : La diversité des cultures, des sols, des climats et des pratiques agricoles rend la généralisation des modèles complexe. Les systèmes doivent être adaptés localement pour garantir leur performance.[10]
- Complexité des modèles et ressources computationnelles : L'entraînement et l'exécution des modèles profonds requièrent des capacités informatiques importantes, ce qui peut limiter leur utilisation dans les zones rurales ou les exploitations de petite taille.[10]
- Adoption par les agriculteurs : La formation, la confiance et l'acceptation des technologies par les utilisateurs finaux sont essentielles pour leur succès, mais peuvent représenter un obstacle significatif.[10]

1.4 Développement d'une solution intégrée pour la détection des cultures et l'automatisation de l'arrosage avec ESP32 :

Dans ce mémoire, nous présentons Zar3i, une application mobile innovante d'agriculture intelligente conçue pour optimiser la gestion des cultures fruitières. Notre solution combine les avancées de l'intelligence artificielle, via des modèles de classification et de détection des maladies des plantes, avec un système d'arrosage automatisé piloté par la carte ESP32.

Cette approche intégrée permet non seulement de surveiller la qualité et la santé des plantations grâce à des analyses d'images précises, mais aussi de gérer efficacement l'irrigation en fonction des besoins réels des cultures, en utilisant des données en temps réel issues de capteurs environnementaux.

Ainsi, Zar3i offre une solution complète, accessible et adaptée aux besoins des agriculteurs modernes, contribuant à une production agricole plus durable et performante.

1.5 Conclusion :

Ce chapitre a souligné l'importance de l'irrigation intelligente et des techniques de machine learning dans l'amélioration durable de l'agriculture. L'intégration des capteurs IoT, de l'automatisation de l'arrosage et de l'analyse visuelle par intelligence artificielle permet d'optimiser la gestion de l'eau et la qualité des cultures. L'application Zar3i illustre parfaitement cette synergie technologique en combinant ces éléments dans une solution locale, spécialisée et accessible. Elle se démarque des autres applications par sa capacité à gérer efficacement l'arrosage, à détecter la qualité et les maladies des fruits, et à offrir un suivi en temps réel via une interface conviviale. Cette approche innovante répond aux enjeux actuels de durabilité et d'efficacité agricole tout en restant adaptée aux besoins des petits et moyens exploitants.

Chapitre 2

Conception du système :

2.1 Introduction :

Ce chapitre présente la conception détaillée du système d'irrigation intelligent et de classification des fruits, en définissant le cahier des charges, les spécifications techniques, et les interactions entre les différents composants du système. L'objectif est de poser les bases nécessaires à la réalisation du prototype fonctionnel.

2.2 Description détaillée de Notre Solution "Zar3i – Agriculture intelligente intégrée" :

2.2.0.1 Définition de Application :

Zar3i est une application mobile d'agriculture intelligente conçue dans le cadre d'un projet de fin d'études, qui vise à moderniser la gestion des cultures agricoles à l'aide de technologies avancées telles que l'Internet des objets (IoT), le Machine Learning et le Cloud. Elle permet aux agriculteurs de surveiller l'environnement de leurs plantations, de classer l'état de leurs fruits (qualité et maladies), et de gérer automatiquement ou manuellement l'arrosage, selon des conditions agronomiques précises.

2.2.0.2 Les Composants technologiques de l'application :

- Une application mobile développée en Flutter (frontend intelligent),
- Une carte ESP32 connectée via Wi-Fi (backend physique),
- Une base de données NoSQL (Firebase Firestore),
- Des capteurs physiques de température et d'humidité,
- Une pompe à eau pilotée par relais et driver,
- Deux modèles d'intelligence artificielle spécialisés dans la reconnaissance d'images de fruits.

2.2.0.3 Architecture de fonctionnement générale :

L'application permet à l'utilisateur de diviser son terrain en zones distinctes, chacune pouvant être associée à une plante spécifique, comme les fraises ou les pommes. Pour chaque plante, Firebase enregistre des données agronomiques essentielles, notamment le nom du fruit,

une description, ainsi que les seuils optimaux de température (minimale et maximale) et d'humidité (minimale et maximale). Un microcontrôleur ESP32, connecté à des capteurs, mesure en continu les valeurs réelles de température et d'humidité, puis les transmet à l'application via Wi-Fi. Le système Zar3i compare ensuite ces valeurs aux seuils de référence enregistrés dans Firebase. En cas de détection d'une anomalie par exemple, une humidité inférieure au minimum requis pour une culture donnée l'application envoie automatiquement une notification à l'utilisateur.

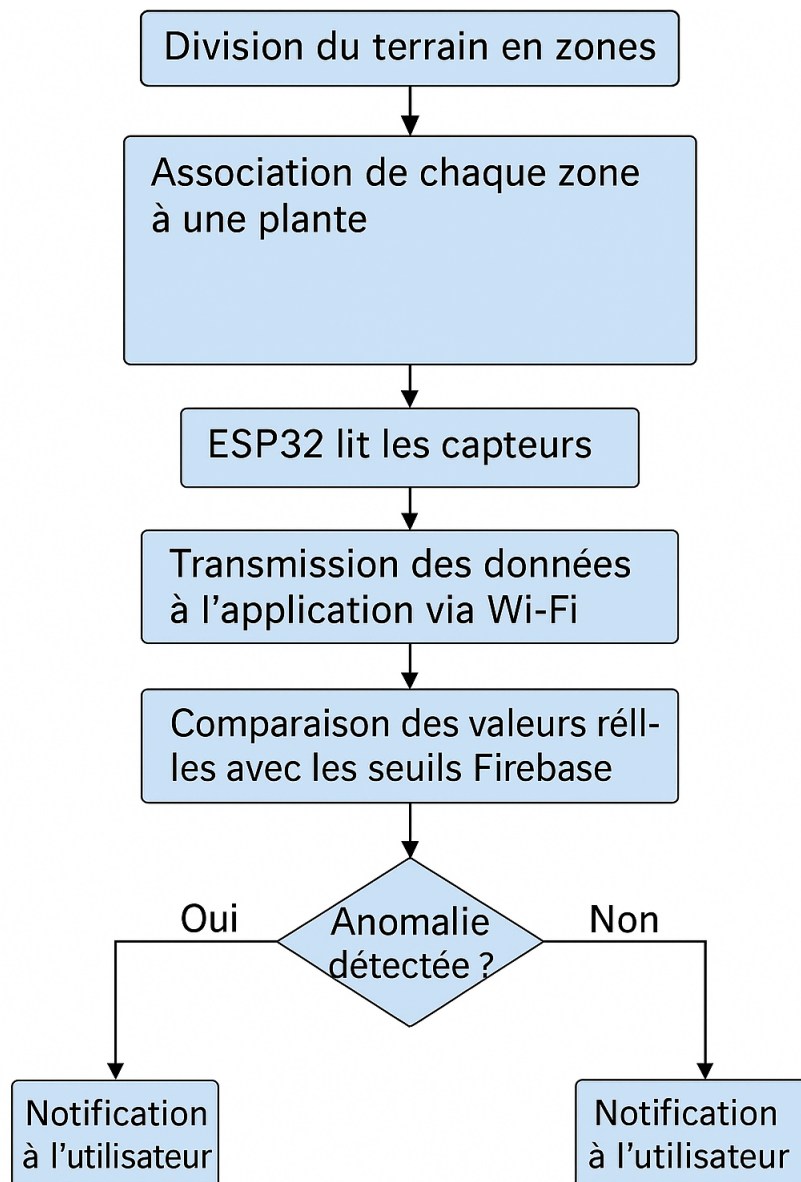


FIGURE 2.1 – Fonctionnement du système intelligent de Zar3i

2.2.0.4 Gestion de l'arrosage intelligent :

L'arrosage peut être déclenché selon deux méthodes :

A. Arrosage automatique (basé sur Firebase) :

L'application contient une logique intelligente pour gérer un arrosage automatisé, configuré selon deux types :

1-Arrosage en profondeur : (activation_profondeur = true)

Dans le cadre du mode arrosage en profondeur (où activation-profondeur est défini sur true), l'application utilise une structure bien organisée dans Firebase pour gérer automatiquement les cycles d'arrosage selon les besoins spécifiques de chaque fruit. Chaque fruit est représenté par un document dans la collection arrosage_automatique, contenant plusieurs champs configurables.

Le champ activation_profondeur (booléen) permet d'activer ou désactiver ce mode pour un fruit donné. Le paramètre duree_minutes précise la durée de chaque session d'arrosage (par exemple, 30 minutes), tandis que heure_debut définit l'heure exacte de démarrage de l'arrosage (ex. : "06 :00"). L'espacement entre deux arrosages successifs est contrôlé par interval_jours (par exemple, tous les 3 jours). Le champ dernier_changement conserve la date de la dernière exécution, au format ISO, afin que le système puisse calculer précisément la prochaine session. La variable periode-arrosage est un tableau de mois durant lesquels l'arrosage est autorisé (par exemple : juin, juillet, août), ce qui permet d'éviter toute irrigation hors saison. Enfin, cycle_arrosage est un mappage détaillant les paramètres spécifiques à chaque cycle, comme les ajustements par type de fruit ou par condition environnementale.

Fonctionnement :

Lorsqu'un utilisateur sélectionne une zone spécifique, comme celle des fraises, l'application Zar3i identifie automatiquement le fruit associé à cette zone. Elle interroge ensuite la base de données Firebase pour récupérer les paramètres d'arrosage correspondant, notamment la durée, l'heure de démarrage, l'intervalle entre les arrosages et la période de l'année autorisée. Si la date actuelle se situe dans la période définie (par exemple, le mois de juillet) et que le nombre de jours écoulés depuis le dernier arrosage dépasse l'intervalle spécifié, l'arrosage est déclenché de manière automatique à l'heure indiquée (exemple : 06 :00). Cette commande est

transmise via Wi-Fi à la carte ESP32, qui active alors la pompe pendant la durée programmée, comme 30 minutes. Une fois l'opération terminée, un journal d'exécution est mis à jour dans le système, et une notification est envoyée à l'utilisateur pour l'informer : « Arrosage automatique par profondeur lancé à 06 :00 pour les fraises ».

Organigramme du fonctionnement de l'arrosage automatique

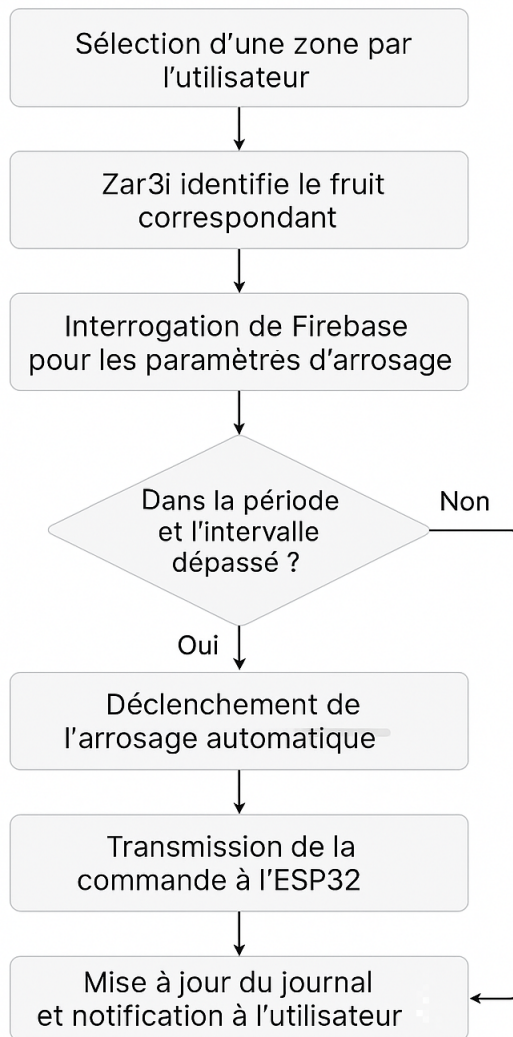


FIGURE 2.2 – Organigramme du fonctionnement du mode d'arrosage automatique par profondeur

2- Arrosage superficiel :(activation_superficiel = true)

Dans ce mode, l'arrosage est exécuté quotidiennement à une heure fixe, avec une quantité d'eau réduite. Contrairement à l'arrosage en profondeur, la pompe ne fonctionne pas à pleine puissance : sa vitesse est ralentie grâce à un driver qui permet de contrôler précisément le débit du moteur. L'utilisateur a la possibilité de configurer la date de début et l'heure de déclenchement directement depuis l'interface de l'application. Ce mode d'arrosage est particulièrement adapté aux jeunes plantes fragiles ou aux semis, qui nécessitent une humidification régulière mais modérée du sol.

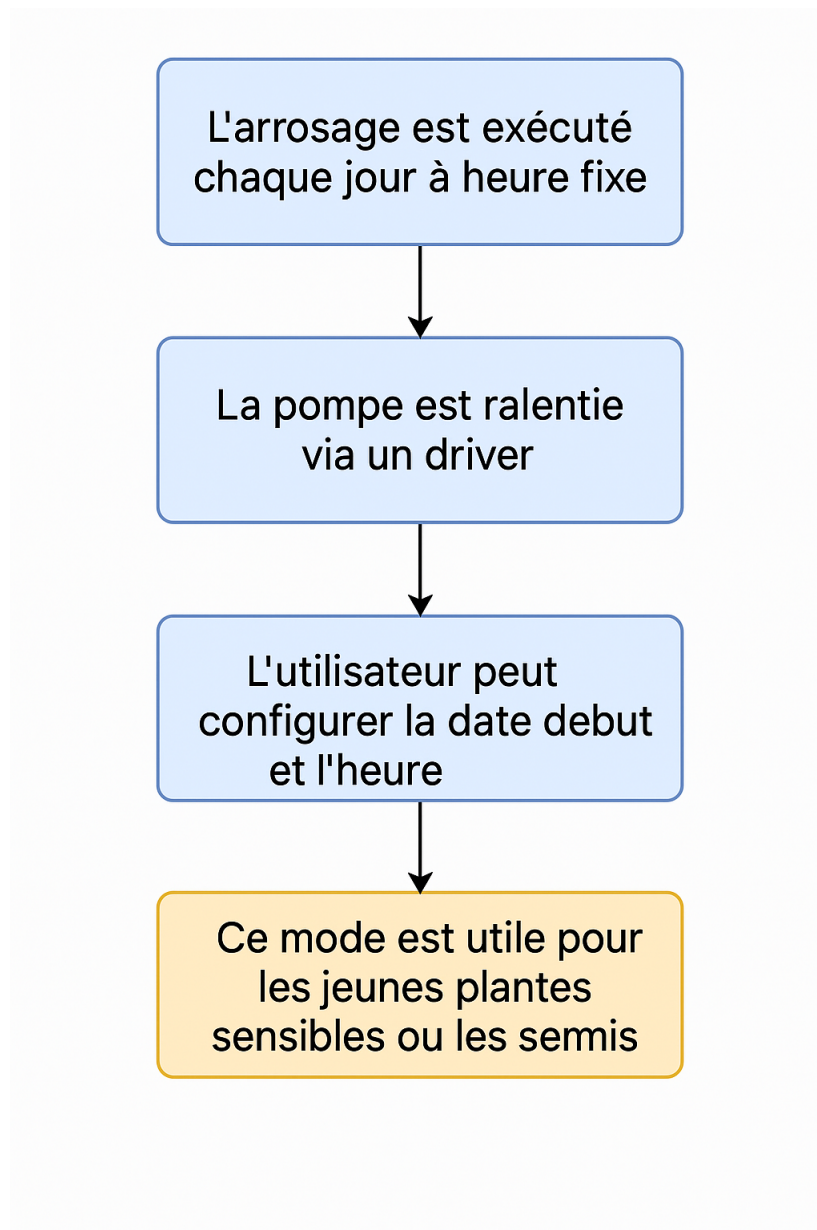


FIGURE 2.3 – Organigramme du fonctionnement du mode d'arrosage automatique par superficiel

B. Arrosage manuel :

L'utilisateur peut déclencher à tout moment l'arrosage d'une zone à l'aide d'un simple bouton « Démarrer l'arrosage » dans l'application. Ce mode ne prend en compte ni les relevés des capteurs ni les paramètres de la base de données. Il ne repose pas sur une logique d'horaire ou de type (superficiel ou en profondeur), mais permet à l'utilisateur d'avoir un contrôle direct sur le déclenchement de la pompe.

Dès que l'utilisateur appuie sur le bouton, une commande est envoyée via Wi-Fi à l'ESP32 qui active immédiatement la pompe à eau. Ce mode est souvent utilisé pour des tests, des ajustements, ou dans des cas exceptionnels où une intervention immédiate est souhaitée, indépendamment des règles définies dans Firebase.

L'utilisateur peut déclencher à tout moment l'arrosage d'une zone à l'aide d'un simple bouton « Démarrer l'arrosage » dans l'application. Ce mode ne prend en compte ni les relevés des capteurs ni les paramètres de la base de données. Il ne repose pas sur une logique d'horaire ou de type (superficiel ou en profondeur), mais permet à l'utilisateur d'avoir un contrôle direct sur le déclenchement de la pompe.

Dès que l'utilisateur appuie sur le bouton, une commande est envoyée via Wi-Fi à l'ESP32 qui active immédiatement la pompe à eau. Ce mode est souvent utilisé pour des tests, des ajustements, ou dans des cas exceptionnels où une intervention immédiate est souhaitée, indépendamment des règles définies dans Firebase.

2.2.0.5 Système de notifications intelligentes :

Zar3i intègre un système de notifications en temps réel pour informer l'utilisateur des événements importants liés à l'environnement ou à l'arrosage :

Notifications environnementales :

L'ESP32 mesure périodiquement la température et l'humidité du milieu, puis transmet ces données à l'application Zar3i. Celle-ci les compare automatiquement aux seuils optimaux prédéfinis dans Firebase pour chaque fruit cultivé. Si une valeur mesurée sort de l'intervalle acceptable par exemple, une température relevée de 38°C alors que la plage optimale se situe entre 5°C et 30°C une alerte est immédiatement déclenchée. L'utilisateur reçoit alors une notifica-

tion explicite, telle que : « Alerte : la température actuelle (38°C) dépasse la plage maximale (30°C) pour les fraises. » En revanche, si les valeurs mesurées restent dans les limites optimales par exemple, une humidité de 15% pour une plage autorisée de 15 à 35% l'application considère la situation comme normale et aucune notification n'est envoyée.

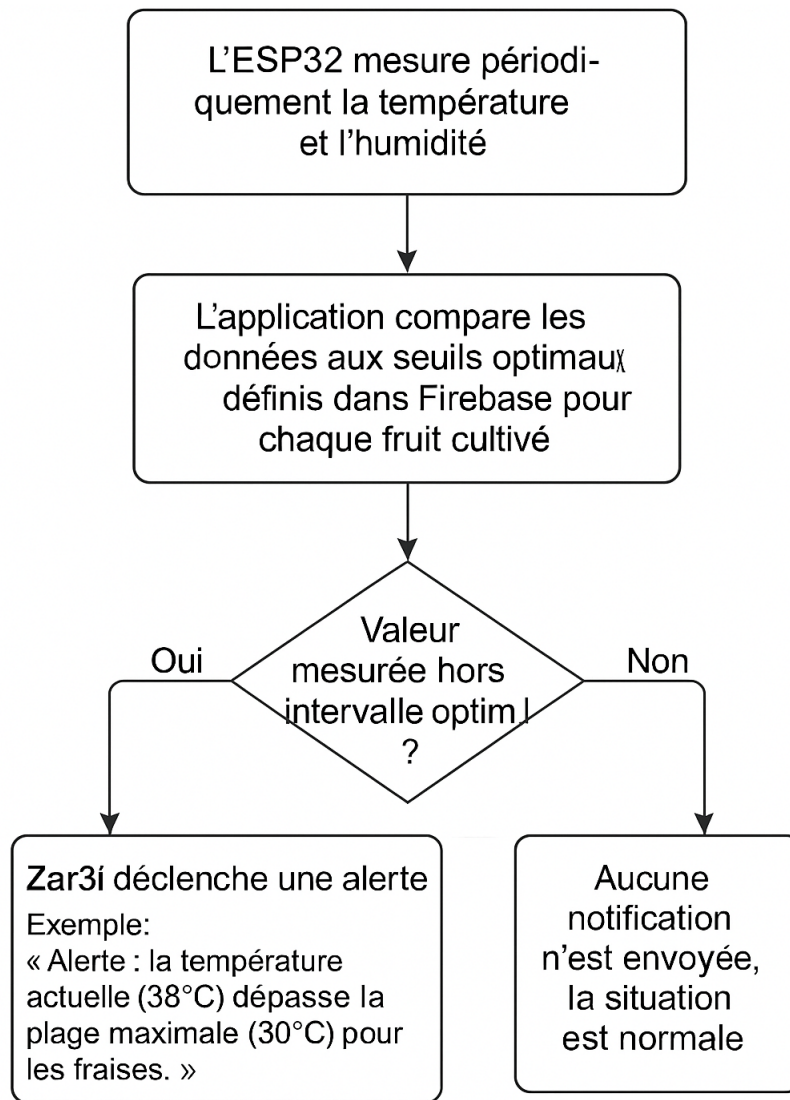


FIGURE 2.4 – Organigramme de gestion des alertes climatiques via Zar3i

Notifications liées à l'arrosage :

- Lorsque l'arrosage automatique démarre (que ce soit en profondeur ou en superficiel), une notification est envoyée pour informer l'utilisateur :

Exemple : « Arrosage automatique par profondeur démarré à 06 :00 pour la zone

des pommes. »

- À la fin de l'arrosage (ex. après 30 minutes), une nouvelle notification est affichée :

Exemple : « Arrosage terminé. Durée : 30 minutes. »

Ce système de notifications assure un suivi permanent du bon fonctionnement de l'application et des conditions environnementales des cultures.

2.2.0.6 Détection par Intelligence Artificielle :

L'intégration de l'intelligence artificielle (IA) constitue un élément central et innovant du projet Zar3i. Elle permet d'automatiser la reconnaissance de la qualité des fruits ainsi que la détection précoce de maladies, offrant ainsi un outil d'aide à la décision fiable et accessible pour les agriculteurs.

Le modèle de classification intégré à Zar3i a un objectif complémentaire :

PlantDiseaseNet :

L'objectif de mon modèle intégré dans l'application Zar3i est de détecter les maladies des plantes à partir d'images, en utilisant des techniques de classification basées sur l'intelligence artificielle. Ce modèle analyse les caractéristiques visuelles des plantes, identifie les symptômes des maladies et fournit des diagnostics précis pour permettre aux agriculteurs d'agir rapidement et efficacement.

3-Intégration dans l'application :

1-L'utilisateur peut prendre une photo directement via l'interface Flutter ou charger une image existante.

2-L'image est soit traitée localement (si les ressources du mobile le permettent), soit envoyée à un serveur distant ou un service cloud qui héberge les modèles pour la prédiction.

3-Le modèle retourne une prédiction indiquant la classe détectée (ex. : "Pomme saine", "Pomme avec black rot") accompagnée d'un score de confiance (probabilité).

4-Cette information est présentée clairement à l'utilisateur avec des conseils adaptés (par exemple, récolter ou traiter le fruit).

2.2.0.7 Besoin en eau :

Dans Zar3i, la gestion des besoins en eau est personnalisée selon chaque type de culture, en tenant compte des spécificités agronomiques des fruits comme la fraise et la pomme. Le système utilise la notion de cycle d'arrosage, qui détermine la fréquence et la durée optimales des irrigations pour assurer une croissance saine tout en évitant le gaspillage d'eau.

Pour la culture de la fraise, l'application recommande généralement un arrosage fréquent mais de courte durée, adapté à ses racines superficielles sensibles à l'excès d'eau. Par exemple, un cycle peut consister à arroser la fraise tous les 1 à 2 jours pendant 15 à 20 minutes, en fonction des conditions climatiques et des mesures d'humidité du sol.[13]

Pour la culture de la pomme, plus exigeante en eau en raison de sa structure racinaire plus profonde, Zar3i configure un cycle d'arrosage moins fréquent mais plus long, tel qu'un arrosage un jour sur trois pendant 30 minutes, permettant à l'eau de pénétrer profondément dans le sol. Ce cycle est programmé en fonction de la capacité de la pompe (par exemple 60 litres pour 30 minutes) et ajusté en temps réel selon les relevés des capteurs de température et d'humidité.[14]

Ces cycles d'arrosage, stockés et gérés via Firebase, sont communiqués à la carte ESP32 qui pilote la pompe automatiquement, assurant ainsi un apport en eau précis et optimisé pour chaque type de fruit. Cette gestion intelligente contribue à maximiser le rendement tout en préservant les ressources hydriques.

2.3 Comparaison de Zar3i avec d'autres applications :

Dans cette section, nous comparons l'application Zar3i avec d'autres solutions existantes dans le domaine de l'agriculture intelligente. L'objectif de cette comparaison est de mettre en évidence les points forts de Zar3i, notamment son approche intégrée combinant détection des maladies des plantes, gestion de la qualité des fruits, et contrôle automatisé de l'arrosage. En confrontant Zar3i avec des applications populaires telles que Plantix, AgriApp, Croper, et SmartFarm, nous analyserons leurs fonctionnalités respectives, leurs limites et pourquoi Zar3i se distingue en offrant une solution plus spécialisée et complète, particulièrement adaptée aux besoins des petits et moyens agriculteurs.

Plantix : Plantix est une application populaire pour la détection des maladies des plantes à partir d'images, utilisant des réseaux de neurones profonds. Elle permet aux utilisateurs de diagnostiquer divers problèmes liés à plusieurs types de cultures[15]. Cependant, cette application présente plusieurs limitations : elle nécessite une connexion Internet et ne gère pas l'arrosage automatique ni les capteurs en temps réel. En revanche, Zar3i fonctionne en local pour la prédiction des maladies des fruits et légumes et intègre un système d'arrosage automatique contrôlé par ESP32, ce qui améliore la précision et l'adaptation aux conditions locales sans dépendre d'une connexion constante à Internet.

AgriApp :

AgriApp est une application indienne qui fournit des informations générales sur les cultures, la météo et des conseils agricoles. Bien qu'elle offre une base de données d'engrais et un chat avec des experts, elle manque de capacités de détection par image et d'intégration de capteurs en temps réel[16]. Contrairement à cela, Zar3i intègre la vision par ordinateur pour la classification de la qualité des fruits et la détection des maladies, tout en étant connectée à des capteurs (température, humidité), et offrant un contrôle d'arrosage via ESP32. Cela permet à Zar3i de fournir une solution plus complète et interactive.

Croper : Croper se distingue par l'utilisation de drones et de satellites pour le suivi des cultures sur de grandes surfaces. Toutefois, son coût élevé et son ciblage principalement pour les grandes exploitations agricoles rendent l'application peu accessible aux petits agriculteurs[17]. En revanche, Zar3i est conçu pour être accessible aux petits agriculteurs et fonctionne sans avoir besoin de satellites ou d'un abonnement coûteux. L'application permet de gérer l'arrosage et la détection des maladies via une interface mobile, ce qui la rend plus adaptée aux terrains de petite taille et moins onéreuse.

SmartFarm : SmartFarm est une application orientée gestion de ferme qui propose des outils pour le suivi des activités agricoles, la gestion de l'inventaire et des alertes météo. Cependant, elle manque d'intelligence artificielle pour la détection des maladies des plantes et n'intègre pas de dispositifs IoT pour le contrôle en temps réel des cultures[18]. Contrairement à cela, Zar3i utilise des modèles d'intelligence artificielle pour la détection des maladies et la classification de la qualité des fruits et légumes, et est connectée à des capteurs de température et d'humidité en temps réel via ESP32, permettant une gestion optimale de l'irrigation et des

alertes instantanées

2.3.1 Solution proposée :

Après analyse comparative des différentes applications agricoles existantes, il apparaît clairement que Zar3i se distingue par son approche intégrée et spécialisée. Contrairement aux autres solutions qui se concentrent principalement sur la détection de maladies ou la gestion d'informations générales, Zar3i combine efficacement :

- L'intelligence artificielle pour la classification de la qualité des fruits et légumes et la détection précise des maladies,
- L'automatisation intelligente de l'arrosage avec deux modes (manuel et automatique),
- La collecte en temps réel des données environnementales via des capteurs connectés,
- Une base de données agronomique riche et spécifique permettant d'adapter les actions aux besoins exacts des cultures,
- Une communication directe avec du matériel embarqué (ESP32) via Wi-Fi pour piloter la pompe d'arrosage.

Cette synergie technologique fait de Zar3i un outil complet, performant et accessible, particulièrement adapté aux besoins des petits et moyens agriculteurs qui cherchent à optimiser la qualité de leurs récoltes tout en économisant les ressources naturelles.

Ainsi, Zar3i apporte une réelle valeur ajoutée par rapport aux solutions concurrentes, en offrant une solution plus précise, locale, autonome et évolutive.

Fonctionnalité	Plantix	AgriApp	SmartFarm	Croper	Zar3i
Détection maladies (IA)	Oui	Non	Non	Non	Oui
Détection qualité fruits (IA)	Non	Non	Non	Oui	Oui
Arrosage automatique	Non	Non	Non	Non	Oui
Arrosage manuel	Non	Non	Non	Non	Oui
Base de données agronomique	Non	Oui	Oui	Non	Oui
Capteurs connectés (température, humidité)	Non	Non	Non	Non	Oui
Notifications automatiques	Non	Non	Non	Non	Oui
Connectivité Wi-Fi avec ESP32	Non	Non	Non	Non	Oui
Utilisation hors ligne (locale)	Non	Oui	Oui	Oui	Oui
Spécialisée sur Des Fruits et Legumes	Non	Non	Non	Non	Oui

TABLE 2.1 – Conclusion comparative des applications

2.4 Cahier des charges :

Le cahier des charges définit les besoins et les exigences auxquels doit répondre le système d'irrigation intelligent et de classification des fruits.

2.4.1 Objectifs du système :

Élaborer et mettre en œuvre un dispositif d'irrigation intelligent et autonome s'appuyant sur un prototype comprenant un microcontrôleur ESP32, en mesure de détecter l'humidité du sol et la température ambiante en temps réel pour maximiser l'efficacité de l'usage de l'eau. Le dispositif actionne de manière autonome une pompe à eau pour l'irrigation uniquement en cas de sécheresse excessive du sol, minimisant par conséquent le gaspillage d'eau, optimisant la

productivité agricole et simplifiant la supervision de l'irrigation dans des contextes domestiques ou agricoles de petite envergure.

2.4.2 Spécifications matérielles et logicielles du projet Zar3i :

2.4.3 1. Partie matérielle (Hardware) :

- **Microcontrôleur : ESP32**

Rôle : collecte les données des capteurs, contrôle la pompe d'arrosage, communique en Wi-Fi avec l'application mobile.

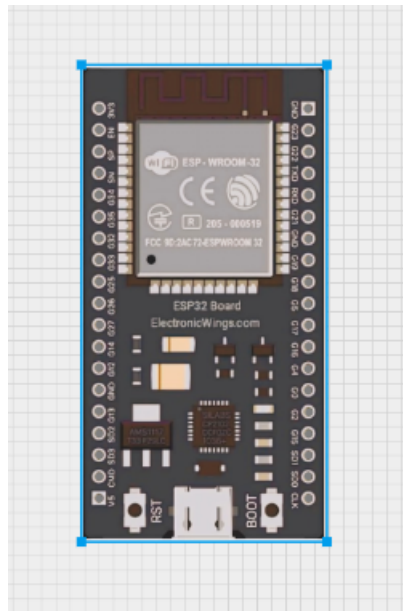


FIGURE 2.5 – module ESP32 30 pins

- **Capteurs environnementaux :**

Capteur de température DS18B20

Capteur d'humidité du sol (optionnel selon évolution)



FIGURE 2.6 – capteur de température DS18B20

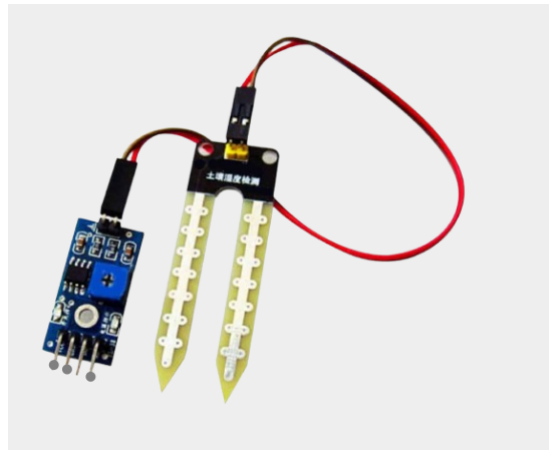


FIGURE 2.7 – capteur d'humidité du sol

- **Pompe à eau :**

pompe électrique 5V contrôlée par l'ESP32 via un relais .

Rôle : fournir un débit d'eau contrôlé pour l'arrosage automatique ou manuel.

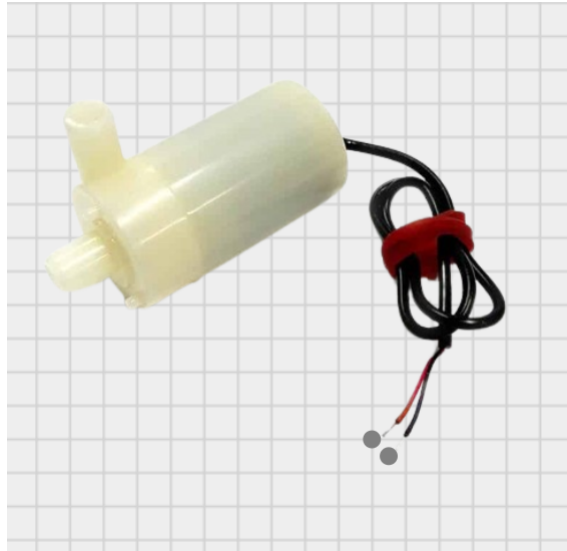


FIGURE 2.8 – module Pompe a eau 5V

- **Module Relais 5V :**

Module relais 1 canal (ou plus), commande via GPIO ESP32.

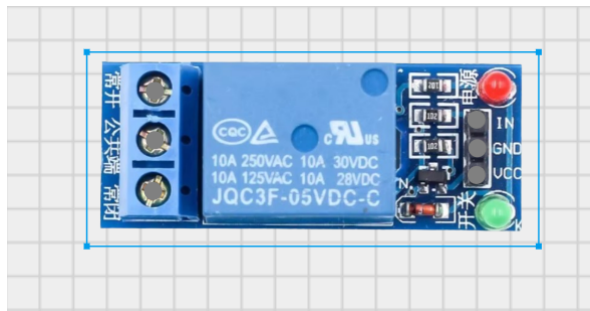


FIGURE 2.9 – module Module Relais 5V

- **Breadboard (plaque d'essai) Et Câbles de connexion :**

Plaque d'essai sans soudure pour prototypage rapide, et Pour Les Câbles de connexion Fils avec connecteurs mâle/femelle pour liaisons entre ESP32, breadboard et composants.

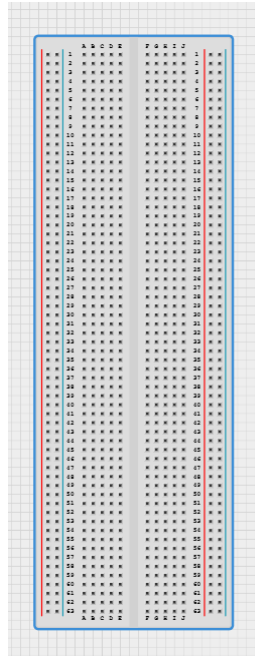


FIGURE 2.10 – Breadboard (plaque d'essai)

- **Smartphone Android :**

Rôle : exécution de l'application mobile Flutter, prise de photos pour IA, interface utilisateur.

- **Réseau Wi-Fi local :**

connectivité entre ESP32 et smartphone/app pour échange des données et commandes.

- **Équipements de développement :**

-2 ordinateurs portables HP Core i5 7th Gen

-Système d'exploitation : Windows 10 / 11

-Navigateurs : Chrome / Edge pour tests Firebase Console

2.4.4 2. Partie logicielle (Software)

- **Application mobile :**

L'application a été développée en Dart à l'aide du framework Flutter, connu pour sa rapidité de développement multiplateforme et son interface utilisateur réactive. Elle cible la plateforme Android, avec des tests réalisés sur un Samsung Galaxy F13, assurant une compatibilité fonctionnelle sur les appareils mobiles courants. Parmi ses principales fonctionnalités, on retrouve la gestion des zones d'arrosage, permettant de configurer différentes parties du terrain en fonction des plantes cultivées, l'affichage en temps réel des données des capteurs (température, humidité), la réception de notifications intelligentes en cas d'anomalie, la prise de photos pour le suivi visuel des cultures, ainsi que la communication en Wi-Fi avec le microcontrôleur ESP32, assurant un échange fluide des données entre le système embarqué et l'application mobile. Cette architecture permet une automatisation efficace de la surveillance agricole à distance.

- **Backend cloud et base de données :**

L'application utilise Firebase Firestore comme base de données cloud pour le stockage structuré des données utilisateurs, des paramètres d'arrosage, des seuils agroclimatiques (température et humidité optimales), ainsi que des notifications générées automatiquement par le système. Cette architecture permet une mise à jour en temps réel et une synchronisation fluide entre l'application mobile et le backend. Par ailleurs, l'authentification des utilisateurs est gérée de manière sécurisée via Firebase Auth, garantissant un accès protégé et personnalisé à chaque session utilisateur, tout en simplifiant l'inscription, la connexion et la gestion des droits d'accès.

- **Modèles d'intelligence artificielle :**

Le modèle a été développé dans un environnement Python, en utilisant Anaconda et Jupyter Notebook pour la manipulation des données. Les principales bibliothèques utilisées sont PyTorch, NumPy et Matplotlib. L'entraînement s'est basé sur le Plant Diseases Dataset for Image Classification, afin de permettre la détection automatique des maladies à partir d'images de plantes.

- **Logiciel de développement embarqué :**

Le microcontrôleur ESP32 a été programmé via l'Arduino IDE, qui permet de coder

et téléverser facilement le firmware. Le développement a été réalisé en langage C++, utilisé pour gérer la lecture des capteurs, le contrôle de la pompe d'arrosage, ainsi que la communication réseau en Wi-Fi avec l'application mobile.

- **Environnements de développement :**

Le développement de l'application a été complété à l'aide de Android Studio, utilisé principalement pour la compilation, le déploiement et les tests de l'application Flutter sur des appareils Android. En parallèle, Visual Studio Code (VS Code) a été utilisé comme éditeur léger, enrichi par les extensions Flutter et Arduino, facilitant à la fois le développement de l'interface mobile et la programmation embarquée de l'ESP32.

- **Communication réseau :**

La communication entre le microcontrôleur ESP32 et l'application mobile s'effectue via un protocole Wi-Fi, permettant des échanges bidirectionnels en temps réel. Cela signifie que l'ESP32 peut transmettre les données des capteurs (température, humidité, etc.) vers l'application, tandis que cette dernière peut envoyer des commandes (comme le déclenchement ou l'arrêt de la pompe) vers l'ESP32. Ce mode de communication assure une synchronisation fluide et un contrôle à distance fiable du système d'arrosage.

2.4.5 Coût estimé des composants du projet :

Composant	Prix Unitaire (DA)	Quantité	Total (DA)
ESP32 (30 pins)	2300	1	2300
Capteur humidité sol	500	1	500
Capteur température DS18B20	450	1	450
Pompe à eau 5V	600	1	600
Module relais 5V	450	1	450
Breadboard	350	1	350
Câbles de connexion	10	10	100
Total estimé			4750

TABLE 2.2 – Coût estimé des composants du projet

2.4.6 Exigences de performance :

- Efficacité de l'irrigation : Le système doit être capable de réduire la consommation d'eau d'au moins 30% par rapport aux méthodes d'irrigation traditionnelles, en ajustant précisément l'irrigation en fonction des besoins des cultures.

- Précision de la classification des fruits : La précision de la classification des fruits doit être supérieure à 90%, permettant une séparation fiable des fruits de qualité supérieure et inférieure.
- Réponse en temps réel : Le système doit réagir en temps réel aux changements dans les conditions environnementales, avec un délai maximum de 10 minutes entre la détection d'un besoin en irrigation et l'ajustement du système.
- Accessibilité et simplicité d'utilisation : La plateforme IoT doit être facile à utiliser pour les agriculteurs, avec une interface simple et intuitive pour configurer et surveiller le système d'irrigation et de classification des fruits.

2.5 Les Diagrammes Du UML :

2.5.1 Diagramme De Classe :

Définition :

Un diagramme de classe est un type de diagramme structurel en UML qui modélise les classes, leurs attributs, opérations (méthodes), et les relations entre elles (héritage, association, agrégation, etc.). Il représente la structure statique d'un système.

Interprétation Générale :

Le diagramme de classes représente un système de gestion agricole. Un Agriculteur interagit avec le système en s'authentifiant. Il gère ses Terrains, qui sont divisés en Zones. Pour chaque Zone, il peut définir une Plantation et configurer un Arrosage. L'Agriculteur peut également consulter des Statistiques relatives à ses activités et effectuer des Diagnostics sur ses plantes.

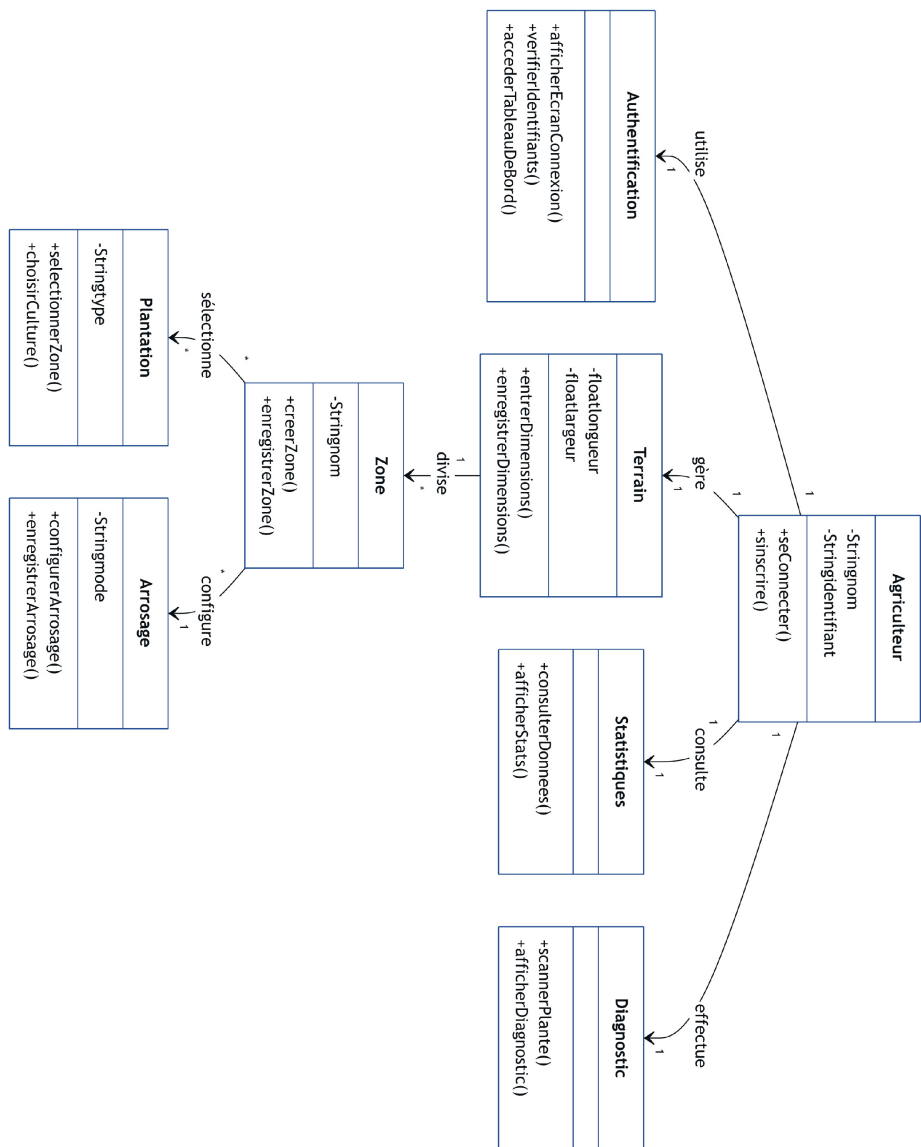


FIGURE 2.11 – Diagramme De Classe

2.5.2 Diagramme de Cas d'Utilisation :

Définition :

Un diagramme de cas d'utilisation capture les fonctionnalités (cas d'utilisation) d'un système du point de vue des acteurs (utilisateurs ou systèmes externes). Il met en évidence les interactions sans détailler le comportement interne.

Interprétation Générale :

Le diagramme de cas d'utilisation illustre les principales fonctionnalités offertes par le système de gestion agricole du point de vue de l'agriculteur. Il montre comment l'agriculteur interagit avec le système pour gérer les aspects clés de son exploitation, depuis la configuration de ses terrains et de ses cultures jusqu'au suivi des performances et au diagnostic des problèmes potentiels. La présence de la communication avec l'ESP32 dans le cas d'utilisation de l'arrosage suggère une intégration matérielle pour l'automatisation de l'irrigation.

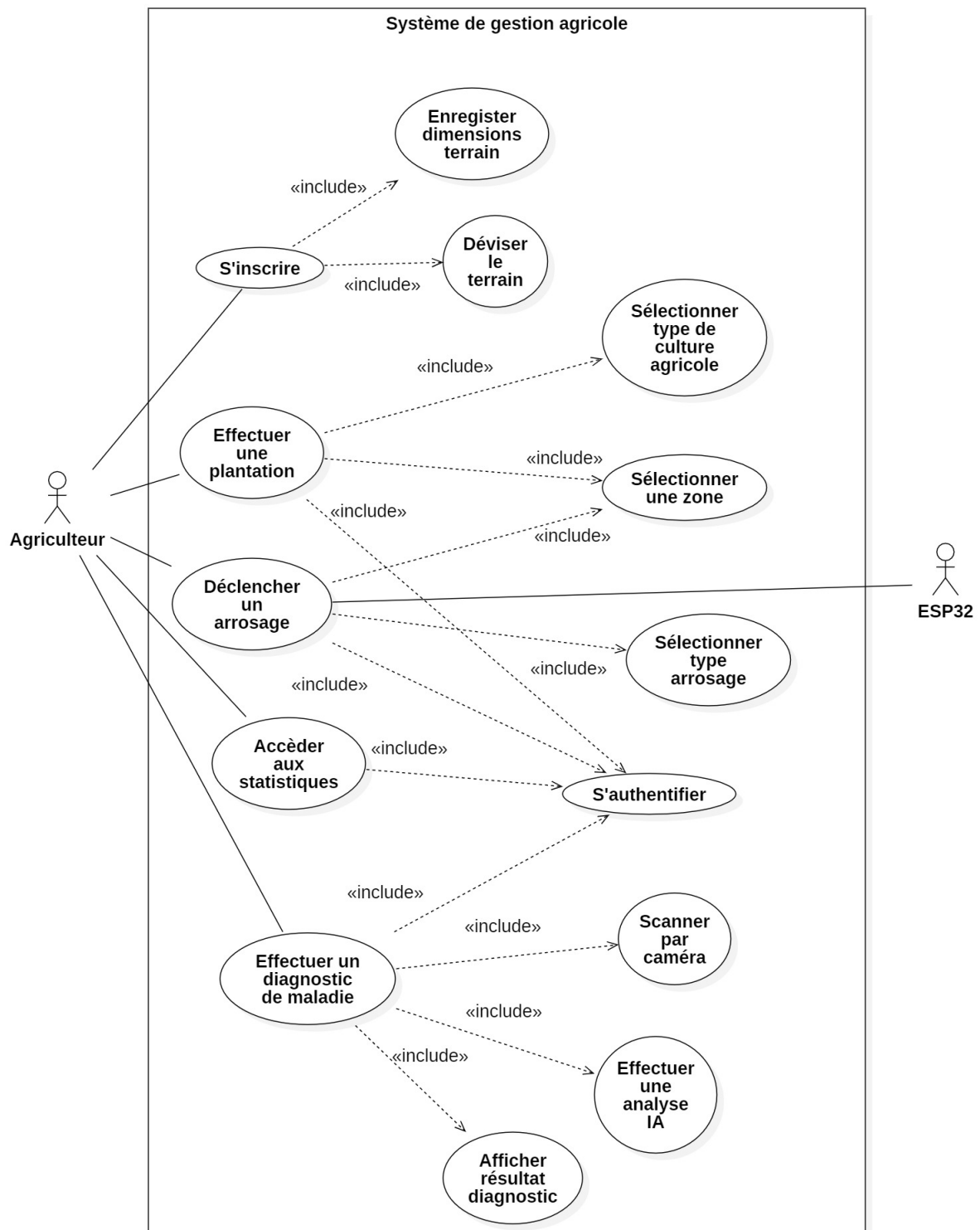


FIGURE 2.12 – Diagramme de Cas d'Utilisation

2.5.3 Diagramme de Séquence :

Définition :

Un diagramme de séquence illustre les interactions entre objets dans un scénario spécifique, sous forme d'échanges de messages ordonnés dans le temps. Il fait partie des diagrammes comportementaux d'UML.

Interprétation Générale :

le diagramme de séquence dépeint l'interaction structurée et chronologique entre l'agriculteur et le système de gestion agricole. Il illustre les étapes nécessaires pour l'authentification, la gestion de l'exploitation (terrains, zones, plantations, arrosage)

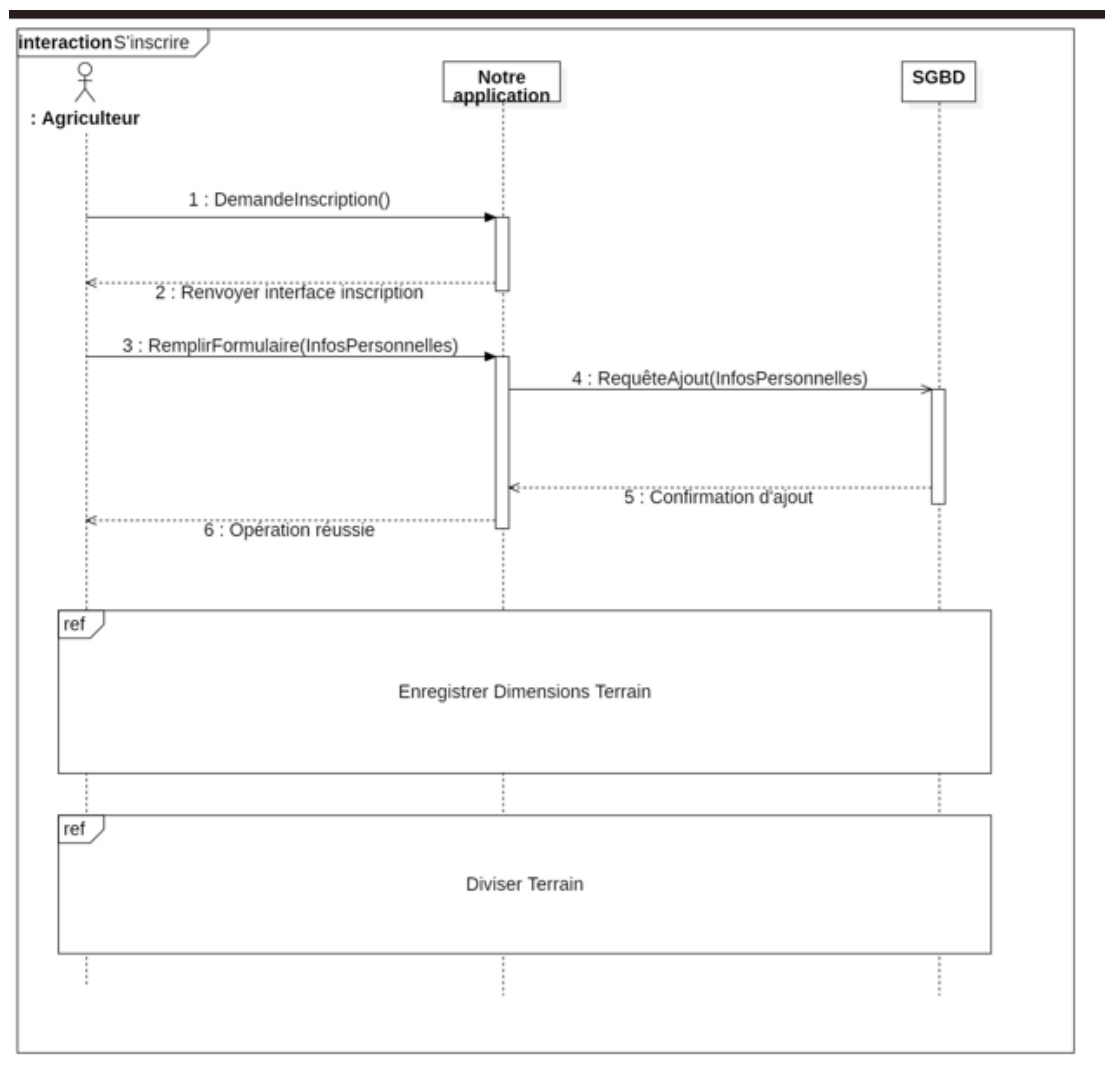


FIGURE 2.13 – Diagramme de Séquence Connexion

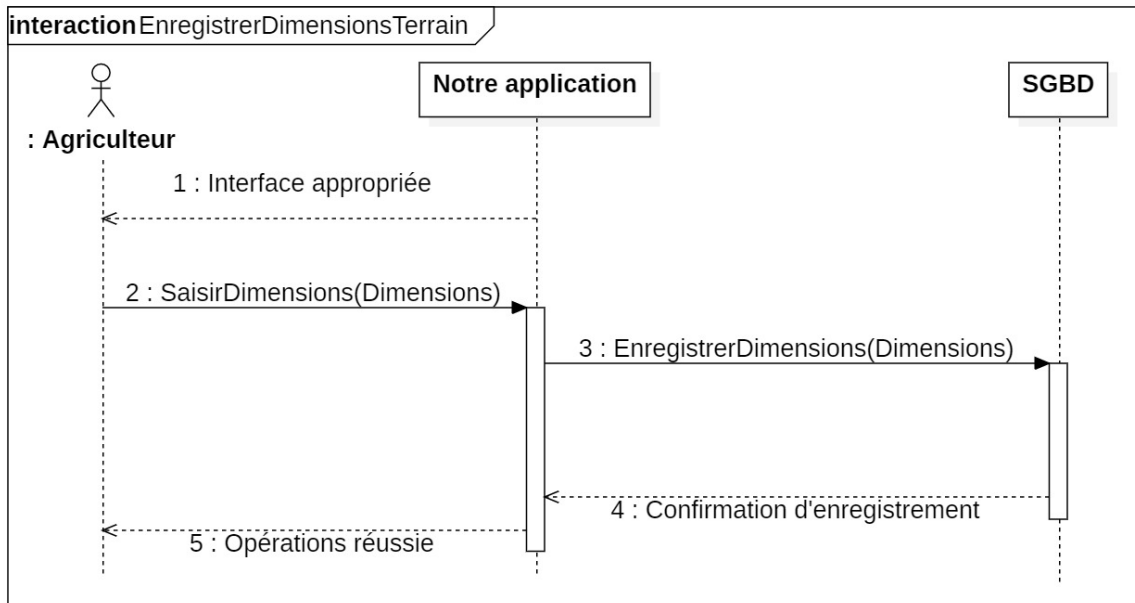


FIGURE 2.14 – Diagramme de Séquence Demenssion De Terrain

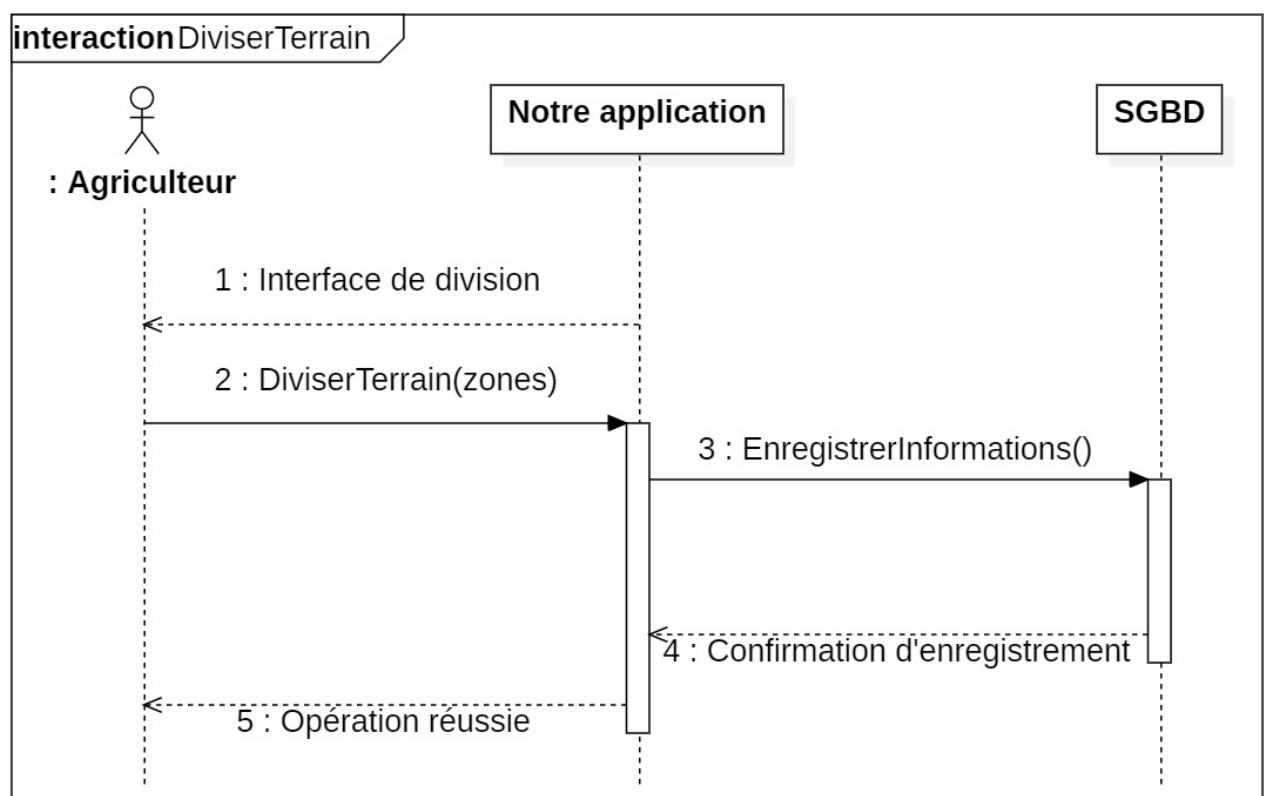


FIGURE 2.15 – Diagramme de Séquence Déviser Terrain

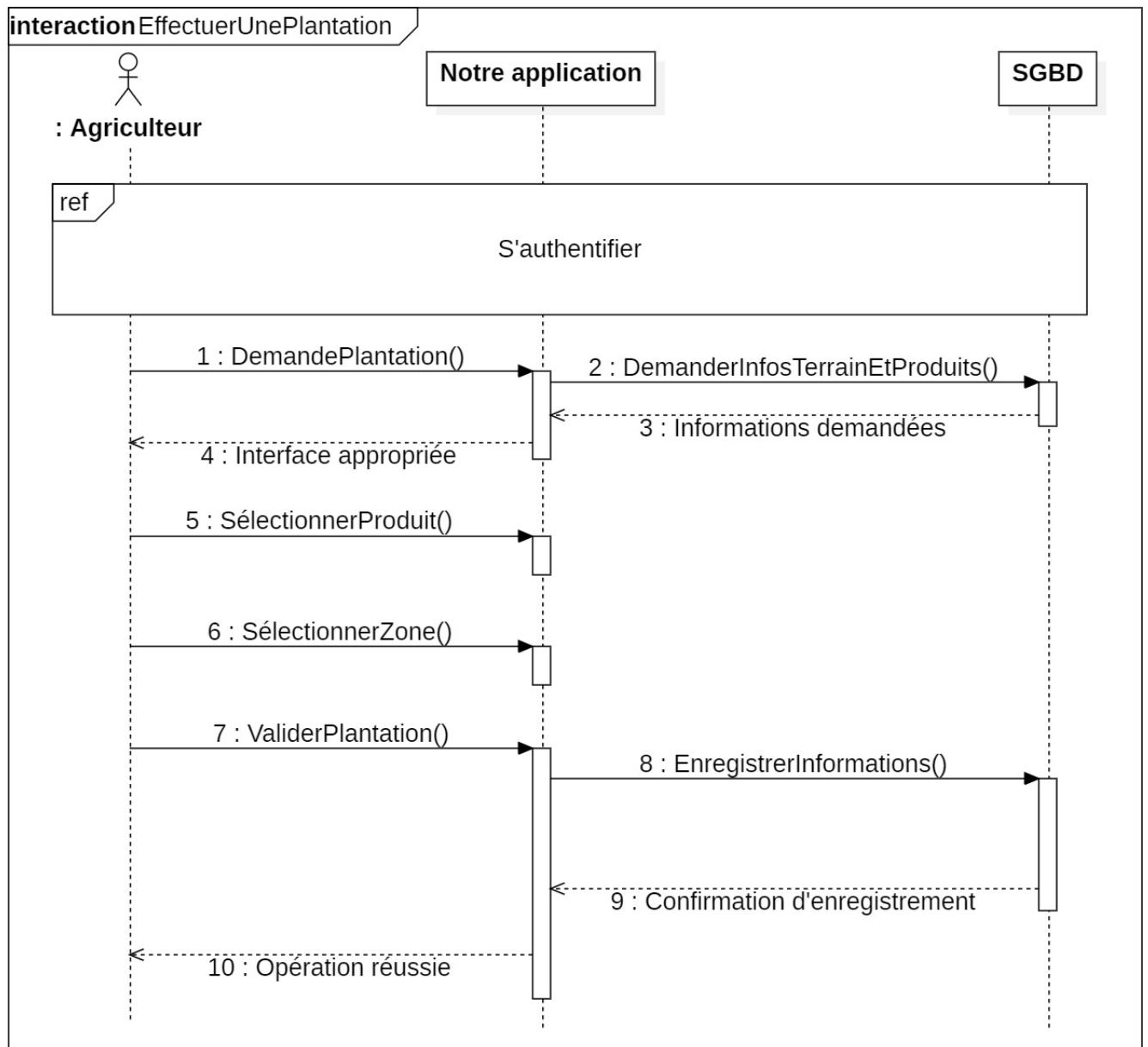


FIGURE 2.16 – Diagramme de Séquence De Planter terrain

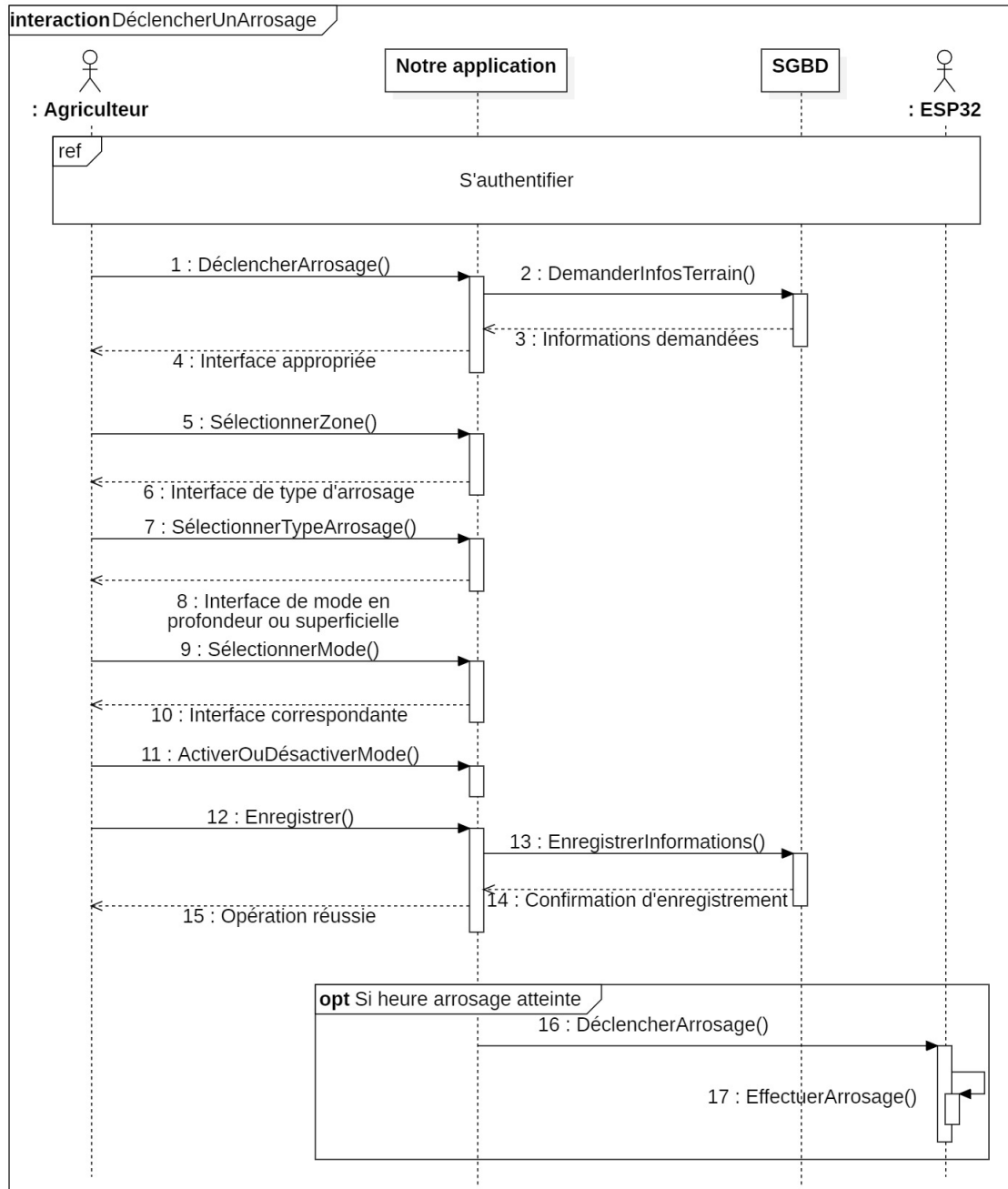


FIGURE 2.17 – Diagramme de Séquence De Arroser terrain

2.6 Conclusion :

Ce chapitre a présenté Zar3i, une application mobile d'agriculture intelligente intégrée, combinant détection des maladies via intelligence artificielle (PlantDiseaseNet) et gestion de l'arrosage intelligent contrôlé par ESP32. Zar3i ajuste automatiquement l'irrigation en fonction des besoins en eau des cultures mesurés en temps réel. Une comparaison avec d'autres applications agricoles a mis en avant ses avantages, notamment son fonctionnement en local, sa spécialisation et son approche complète. Le chapitre a également détaillé les spécifications matérielles et logicielles du projet, assurant sa cohérence technique. Enfin, les diagrammes UML fourniront une vue d'ensemble de l'architecture du système pour guider la phase de développement et d'intégration.

Chapitre 3

Réalisation Et Resultats :

3.1 Introduction :

3.1.1 Présentation générale des objectifs du chapitre :

Ce chapitre a pour but de décrire la phase concrète de réalisation du projet Zar3i, depuis le développement logiciel jusqu'aux tests et validations. Il vise à démontrer comment les différentes composantes techniques ont été implémentées et intégrées pour répondre aux besoins fonctionnels définis. L'objectif est également d'évaluer la robustesse et la performance du système dans un contexte réel.

3.1.2 Rappel rapide de la portée technique du projet :

Zar3i repose sur une architecture hybride combinant plusieurs technologies modernes : une application mobile développée en Flutter pour l'interface utilisateur, une carte ESP32 assurant la collecte des données via capteurs et le pilotage de la pompe d'arrosage, un système cloud Firebase pour la gestion des données et paramètres agronomiques, ainsi que des modèles d'intelligence artificielle pour la classification et la détection des maladies des fruits. Ces composants communiquent essentiellement via le protocole Wi-Fi, assurant une intégration fluide entre le logiciel et le matériel.

3.1.3 Méthodologie adoptée pour la réalisation et les tests :

La réalisation s'est appuyée sur une approche itérative, avec développement modulaire des différents composants. Les tests ont été menés à plusieurs niveaux : validation des fonctionnalités des interfaces mobiles, contrôle de la transmission et réception des données entre ESP32 et l'application, tests des modèles IA sur des données réelles, ainsi que vérification du bon fonctionnement du système d'arrosage automatique et manuel. Cette démarche a permis d'identifier et de corriger les anomalies afin d'optimiser la fiabilité globale de la solution.

3.2 Implémentation technique :

3.2.1 Présentation de l'interface Application :

3.2.1.1 Choix de la langue :



FIGURE 3.1 – Interface utilisateur pour le choix de la langue.

La première étape de l'application Zar3i est une page de sélection de langue, qui permet à l'utilisateur de choisir la langue dans laquelle il souhaite utiliser l'application.

3.2.1.2 la page de connexion :

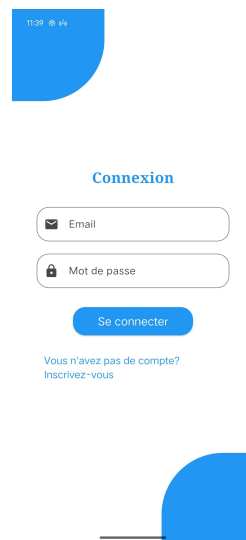


FIGURE 3.2 – Interface d’authentification de l’application Zar3i.

La page de connexion constitue une étape essentielle dans l’application Zar3i, assurant un accès sécurisé aux fonctionnalités personnalisées de l’utilisateur. Cette interface permet à chaque utilisateur enregistré d’entrer ses identifiants (un email et un mot de passe, pour s’authentifier et accéder à son espace personnel.)

3.2.1.3 Configuration du terrain :



FIGURE 3.3 – Interface de saisie des dimensions et division du terrain.

Cette page constitue un élément central de l’application Zar3i, permettant à l’utilisateur de définir précisément son espace agricole et d’organiser sa culture.

3.2.1.4 choisi les dimensions du terrain :

L'interface de saisie des dimensions du terrain constitue une étape fondamentale dans le processus de gestion agricole proposé par l'application Zar3i. Cette page permet à l'utilisateur de définir avec précision la taille et les contours de sa parcelle agricole en renseignant ses dimensions réelles.



The screenshot shows the Zar3i application interface. At the top, there is a blue header with the time '11:43' and a signal icon. Below the header, the Zar3i logo is displayed. The main heading is 'Entrez les dimensions de votre terrain'. There are two input fields: 'Longueur' with the value '200' and 'Largeur' with the value '200'. Below these fields is a blue button labeled 'Suivant'. At the bottom of the screen, there is a blue square representing a plot of land, with a grey line extending from its left side.

FIGURE 3.4 – Interface de dimensionnement du terrain.

3.2.1.5 Division du terrain :

Après avoir défini les dimensions de son terrain, l'utilisateur peut le diviser en plusieurs zones pour une gestion plus précise des cultures. Trois options sont proposées : division en 2 parties verticales, en 2 parties horizontales, ou en 4 parties.

Division en 2 parties horizontales : Le terrain est divisé en deux bandes superposées horizontalement. Cette organisation facilite la gestion des cultures sur des lignes parallèles.

Division en 2 parties verticales : Le terrain est scindé en deux sections égales ou personnalisables, disposées côte à côte verticalement.

Division en 4 parties : En combinant les divisions verticales et horizontales, le terrain est subdivisé en quatre zones distinctes.

Division en 2 parties horizontales :

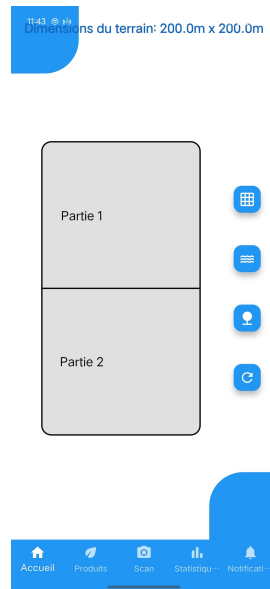


FIGURE 3.5 – Interface de division en 2 parties horizontales.

Division en 2 parties verticales :

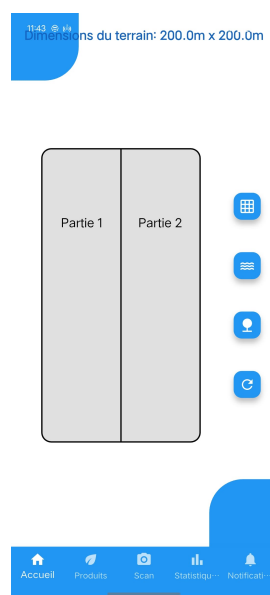


FIGURE 3.6 – Division en 2 parties verticales.

Division en 4 parties :

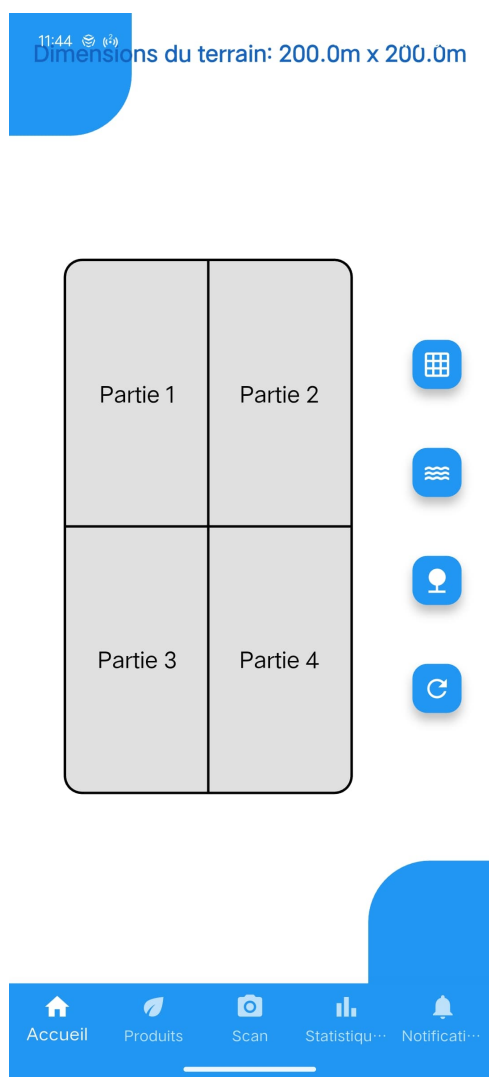


FIGURE 3.7 – Division en 4 parties.

3.2.1.6 Sélection des produits à planter :

Après avoir divisé le terrain en plusieurs zones distinctes, l'utilisateur passe à l'étape essentielle de la plantation, où il sélectionne pour chaque parcelle le produit agricole à cultiver.

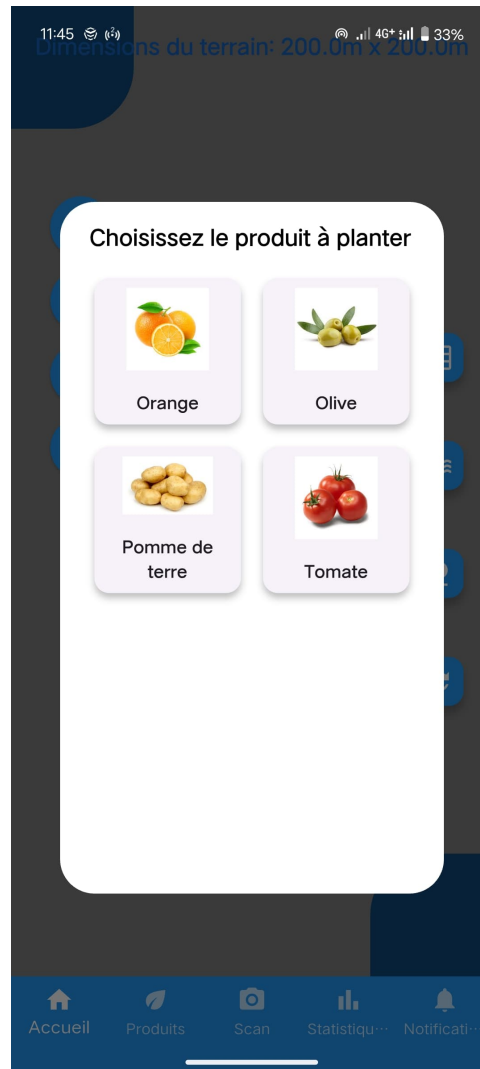


FIGURE 3.8 – Interface de sélection des plantes.

3.2.1.7 Plantation par parcelle :

Lors de l'étape de plantation, l'utilisateur associe à chaque parcelle de terrain un produit agricole spécifique, adapté aux conditions et besoins de la zone.

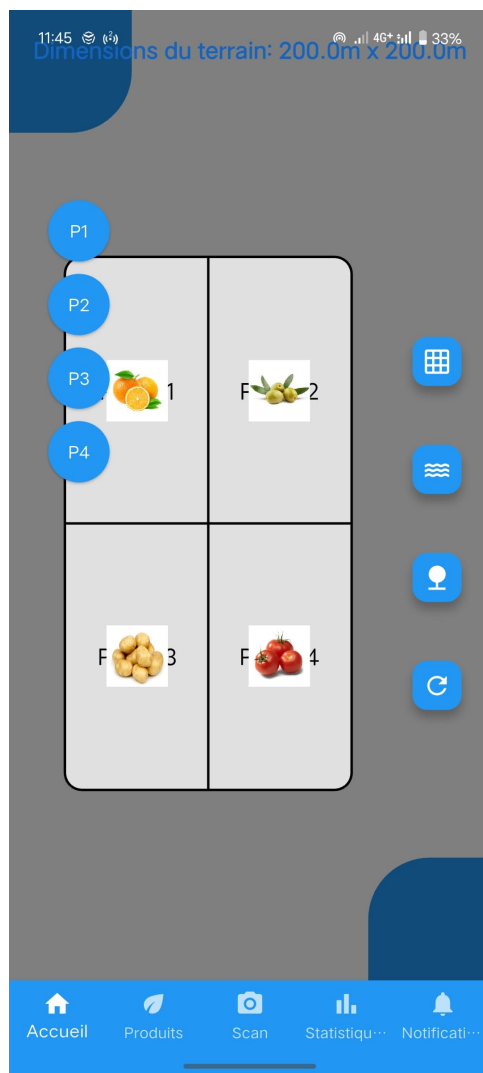


FIGURE 3.9 – Interface de Plantation

3.2.1.8 Système d'arrosage :

Le bouton d'arrosage constitue un élément clé de l'interface utilisateur dans l'application Zar3i. Il permet à l'utilisateur de déclencher manuellement le démarrage ou l'arrêt de l'arrosage dans une zone sélectionnée du terrain.

L'application Zar3i propose deux modes d'arrosage : un mode automatique, piloté par l'ESP32 qui contrôle la pompe selon un planning basé sur les données des capteurs, et un mode manuel, où l'utilisateur peut démarrer ou arrêter l'arrosage via un bouton dans l'application, offrant ainsi un contrôle direct et flexible.

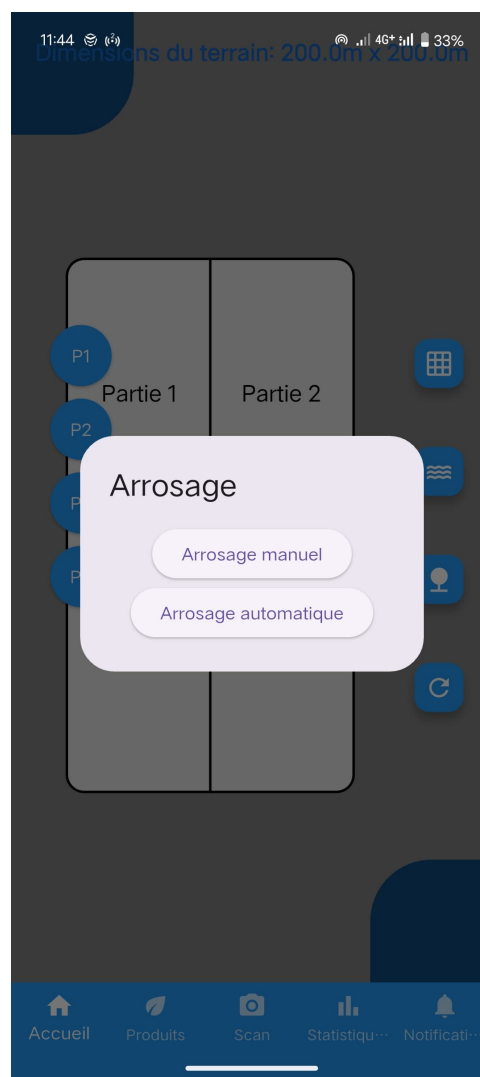


FIGURE 3.10 – Interface de sélection du mode d'arrosage.

1-Arrosage manuel :

Le mode d'arrosage manuel permet à l'utilisateur de démarrer ou d'arrêter l'arrosage via un simple bouton dans l'application. Cette fonction ne communique pas avec la carte ESP32 ; elle sert uniquement à enregistrer l'état du bouton et indiquer que l'arrosage est souhaité ou non. Ce mode est utile pour que l'utilisateur puisse gérer l'arrosage selon son propre rythme ou ses observations terrain, sans automatisation.

Bouton « Démarrer l'arrosage »

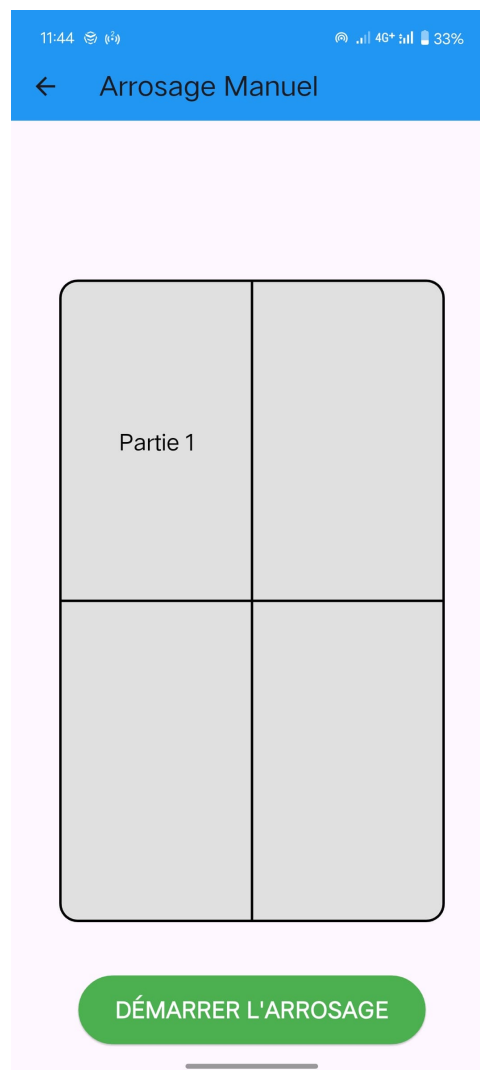


FIGURE 3.11 – Interface de démarrage d'arrosage.

Bouton « Arrêter l'arrosage »

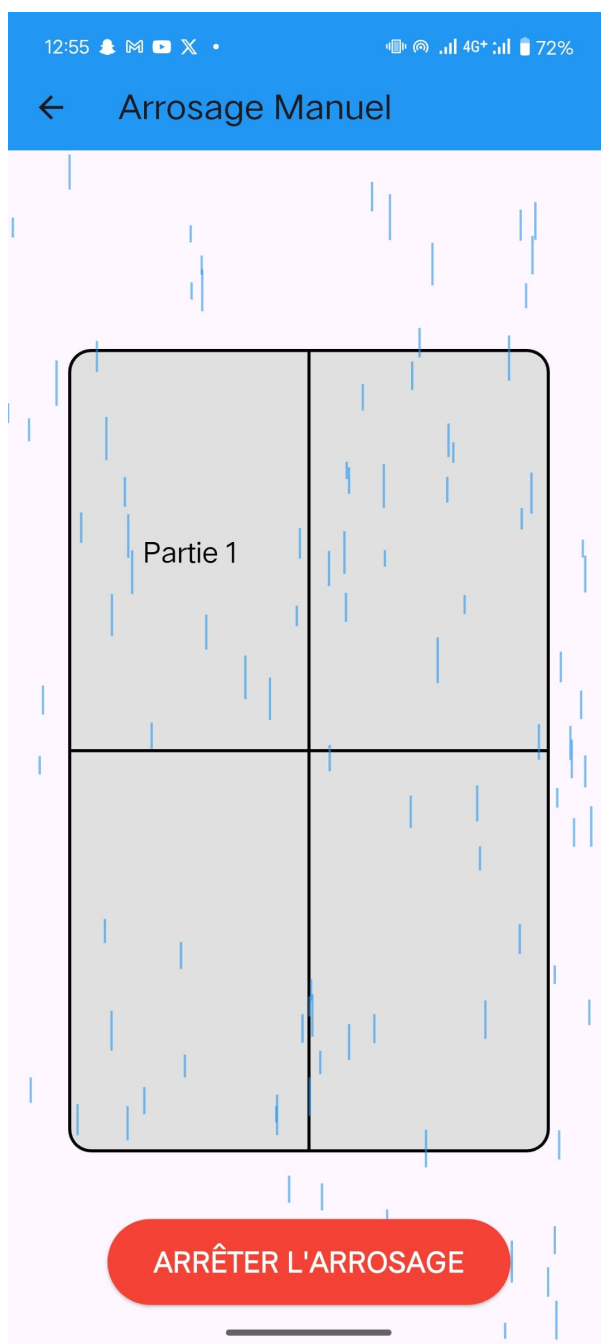


FIGURE 3.12 – Interface d'arrêt de l'arrosage.

2-Arrosage automatique :

L'arrosage automatique est contrôlé directement par la carte ESP32. Celle-ci active la pompe à eau selon une programmation définie dans l'application et des données en temps réel reçues des capteurs (température, humidité). Par exemple, l'ESP32 déclenche l'arrosage un jour sur trois pendant 30 minutes pour une culture de pommes, en respectant la quantité d'eau adaptée. Cette gestion automatique garantit une irrigation efficace, précise, et économe en ressources.

L'application Zar3i propose deux types d'arrosage automatique adaptés aux besoins spécifiques des cultures :

Arrosage superficiel et Arrosage en profondeur .



FIGURE 3.13 – Choix du type d'arrosage automatique.

l'arrosage en profondeur :

Ce mode vise à fournir une irrigation plus intense et ciblée, en envoyant une plus grande quantité d'eau directement aux racines. Il est programmé selon un cycle spécifique (par exemple, un jour sur trois pendant 30 minutes) et contrôlé via la base de données Firebase et la carte ESP32, garantissant un apport optimal en eau pour les cultures nécessitant une hydratation plus importante.

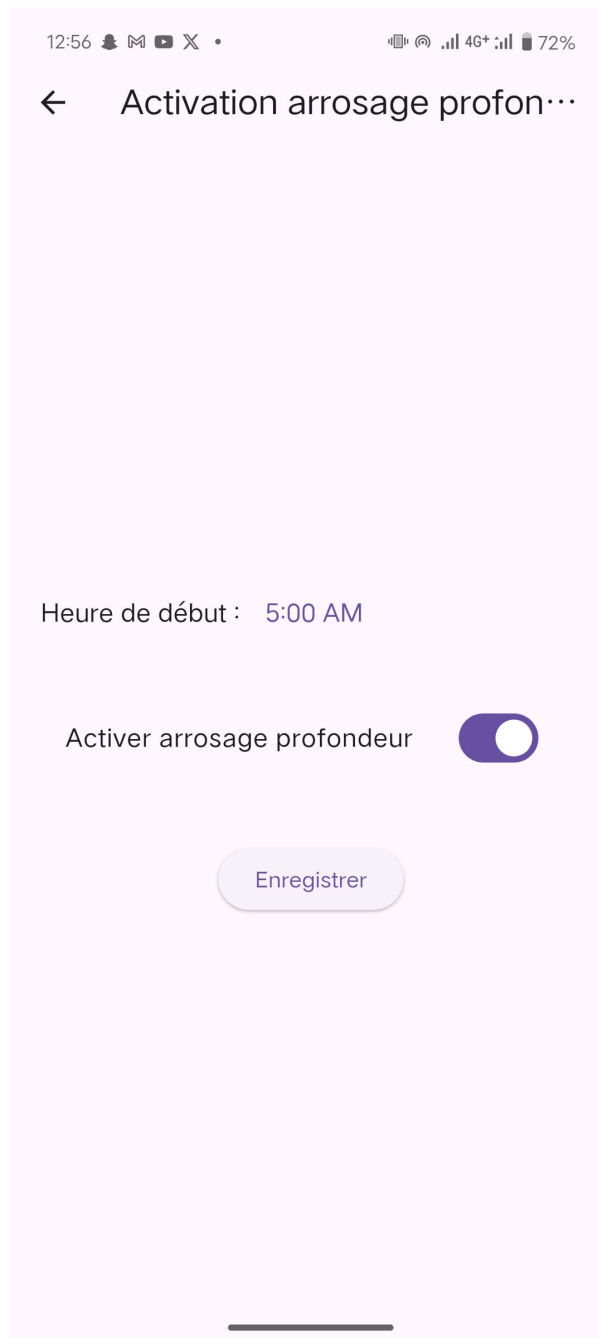


FIGURE 3.14 – Historique de l'arrosage en profondeur.

l'arrosage en superficiel :

désigne un mode d'irrigation qui consiste à apporter une quantité d'eau modérée directement à la surface du sol. Ce type d'arrosage est conçu pour humidifier la couche supérieure du sol, favorisant ainsi la croissance des jeunes plants et la maintenance de l'humidité sans saturer le sol en profondeur.

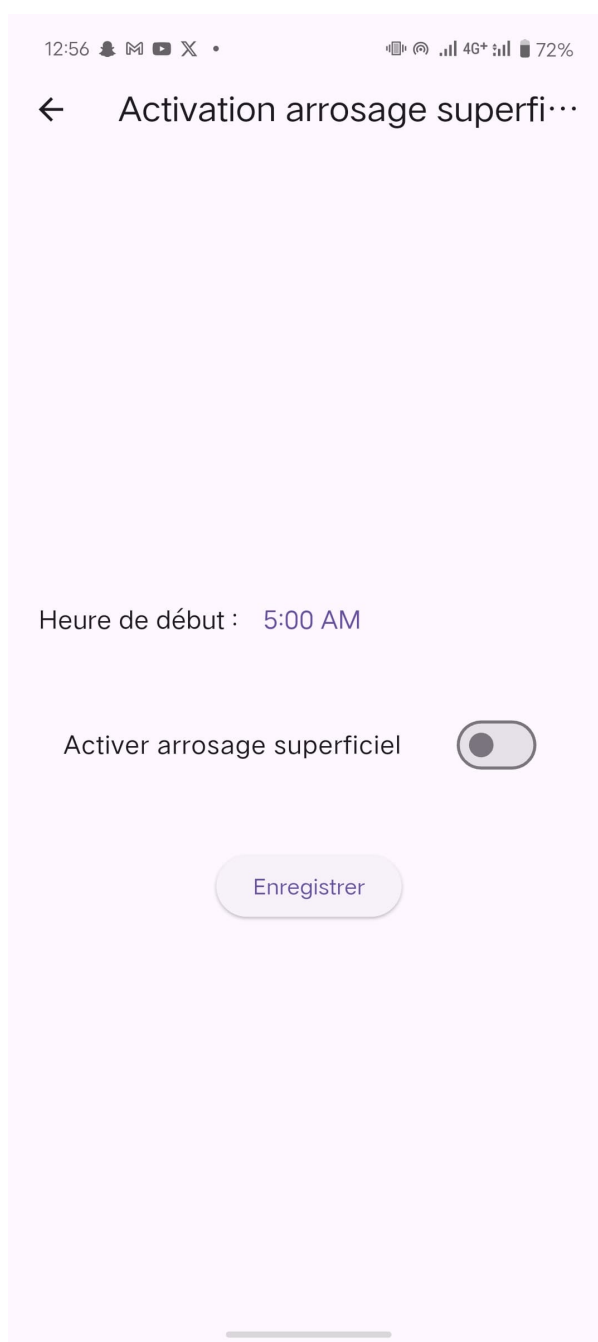


FIGURE 3.15 – Historique de l'arrosage superficiel .

3.2.1.9 Gestion des notifications d'arrosage :

Le bouton de notifications dans l'application Zar3i sert à informer l'utilisateur en temps réel des conditions critiques liées à l'arrosage. Lorsqu'une variation significative d'humidité ou de température est détectée par les capteurs connectés, le système génère une notification visible via ce bouton.

Cette fonctionnalité permet à l'utilisateur d'être rapidement alerté en cas de besoin d'intervenir, par exemple si l'humidité descend en dessous d'un seuil optimal ou si la température dépasse une limite préétablie. Le bouton agit comme un centre de gestion des alertes, offrant un accès rapide aux détails des notifications pour une prise de décision efficace concernant l'arrosage.

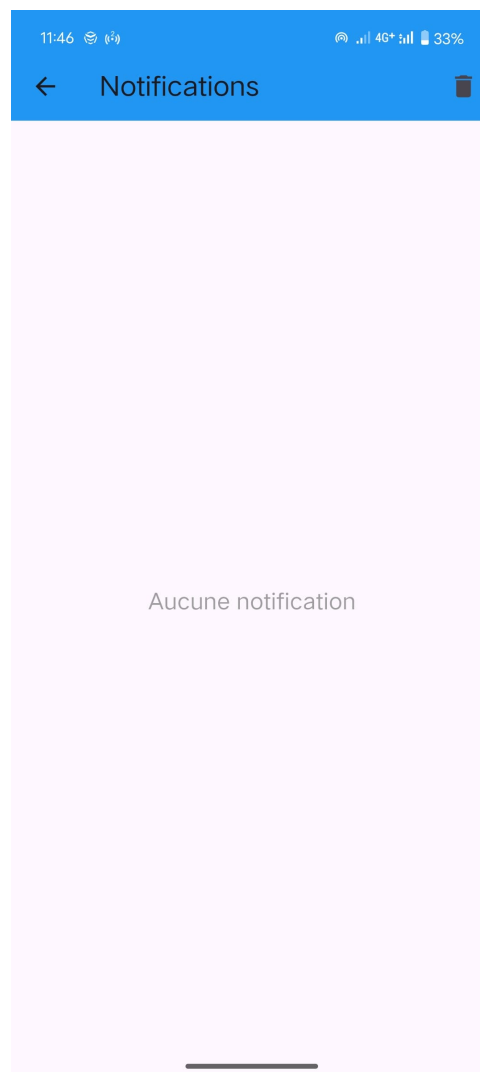


FIGURE 3.16 – Page des notifications.

3.2.1.10 Voir les statistiques :

La fonctionnalité « Statistiques de température et d'humidité » dans l'application Zar3i permet de collecter, visualiser et analyser les données environnementales captées en temps réel par les capteurs installés sur le terrain. Ces statistiques offrent à l'utilisateur une vue détaillée de l'évolution des conditions climatiques locales, indispensables pour une gestion optimale de l'irrigation et de la santé des cultures.

Les données sont présentées sous forme de graphiques dynamiques et synthétiques, facilitant la compréhension des variations journalières.

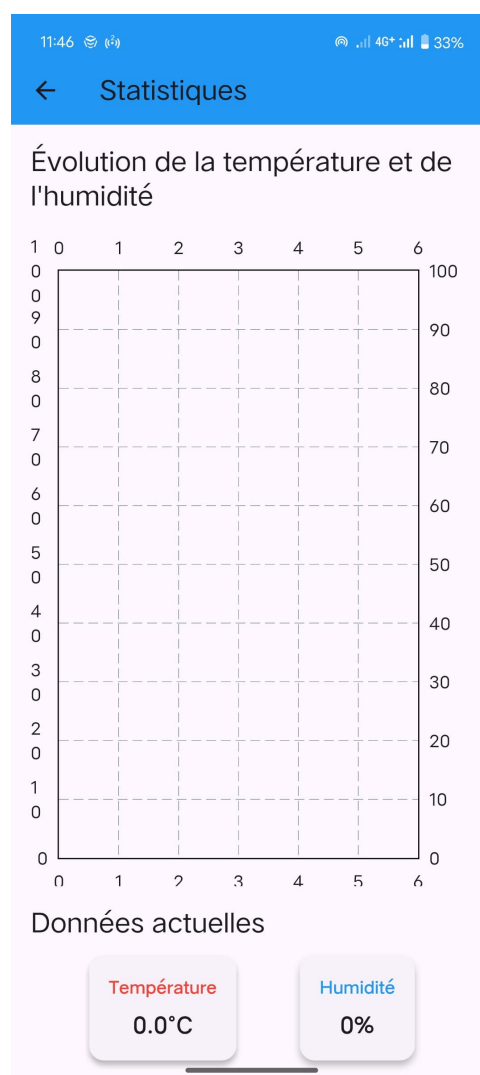


FIGURE 3.17 – Interface des statistiques.

3.3 Architecture et fonctionnement du prototype ESP32 :

3.3.1 Fonctionnement et pilotage de l'arrosage :

Le prototype ESP32 reçoit en temps réel la configuration d'arrosage définie dans l'application mobile, notamment la fréquence, la durée et le type d'arrosage (superficiel ou en profondeur), qui sont stockés dans la base Firebase.

Grâce à sa connexion Wi-Fi, l'ESP32 synchronise ces paramètres et analyse simultanément les mesures des capteurs de température et d'humidité. Lorsque les conditions définies pour déclencher l'arrosage sont remplies (par exemple, un certain seuil d'humidité basse), l'ESP32 active le relais qui met en marche la pompe pour la durée programmée.

Le système permet également un contrôle manuel via l'application : l'utilisateur peut envoyer une commande de démarrage ou d'arrêt de l'arrosage, que l'ESP32 exécute immédiatement.

Ainsi, le prototype assure une gestion intelligente et autonome de l'irrigation, optimisant la consommation d'eau tout en garantissant la santé optimale des cultures.

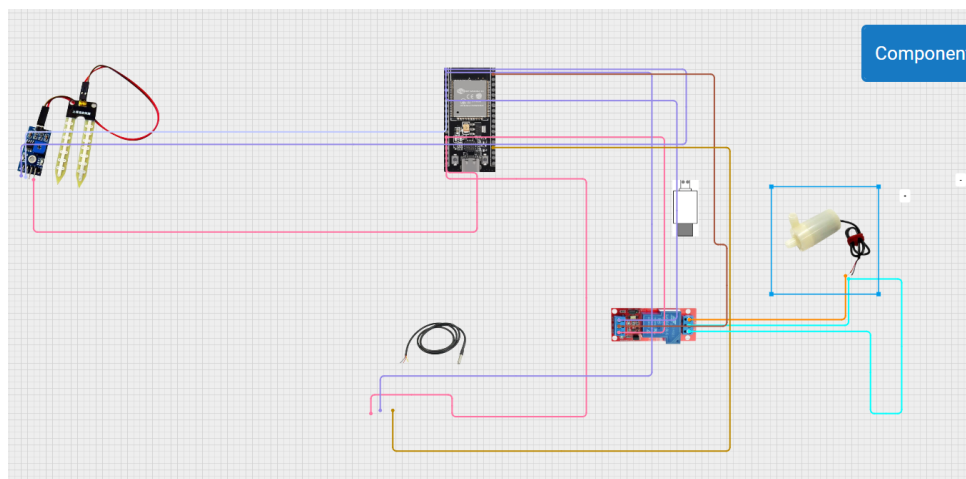


FIGURE 3.18 – Schéma du Prototype ESP32.

3.4 Évaluation du prototype Zar3i en environnement réel :

Cette section présente l'évaluation du prototype Zar3i dans des conditions réelles, sur le terrain. L'objectif de cette évaluation est de tester la performance du système d'irrigation automatisé en fonction des données environnementales réelles (température, humidité,). Les tests effectués permettent de valider l'efficacité du prototype dans un cadre pratique,

3.4.1 Test De Prototype Sur terrain :

Le test en environnement réel a pour but de valider le fonctionnement global du prototype Zar3i dans des conditions réelles d'utilisation. Ce test évalue l'interaction entre les capteurs (température, humidité), la pompe à eau et l'application mobile, en s'assurant que le système d'arrosage automatique répond efficacement aux besoins des cultures dans un environnement agricole authentique.

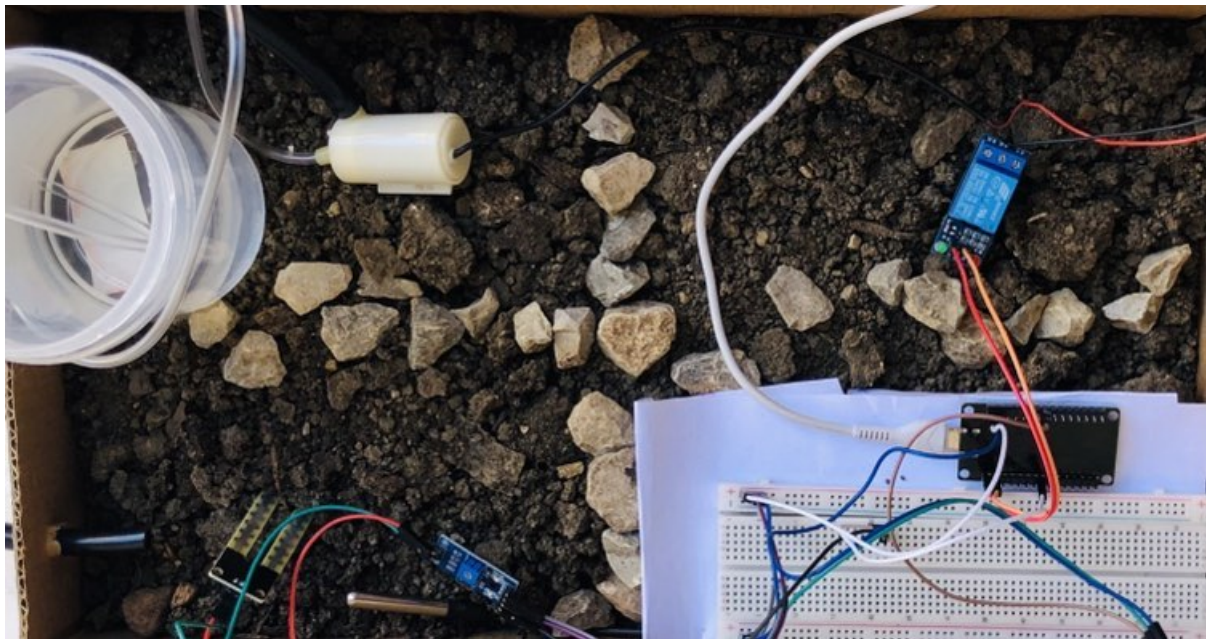


FIGURE 3.19 – Test De Prototype Sur terrain

3.4.1.1 Test de température :

Le test de température vise à vérifier la précision du capteur de température DS18B20 intégré dans le prototype Zar3i. L'objectif est d'assurer que le capteur mesure correctement les variations de température ambiante en temps réel.

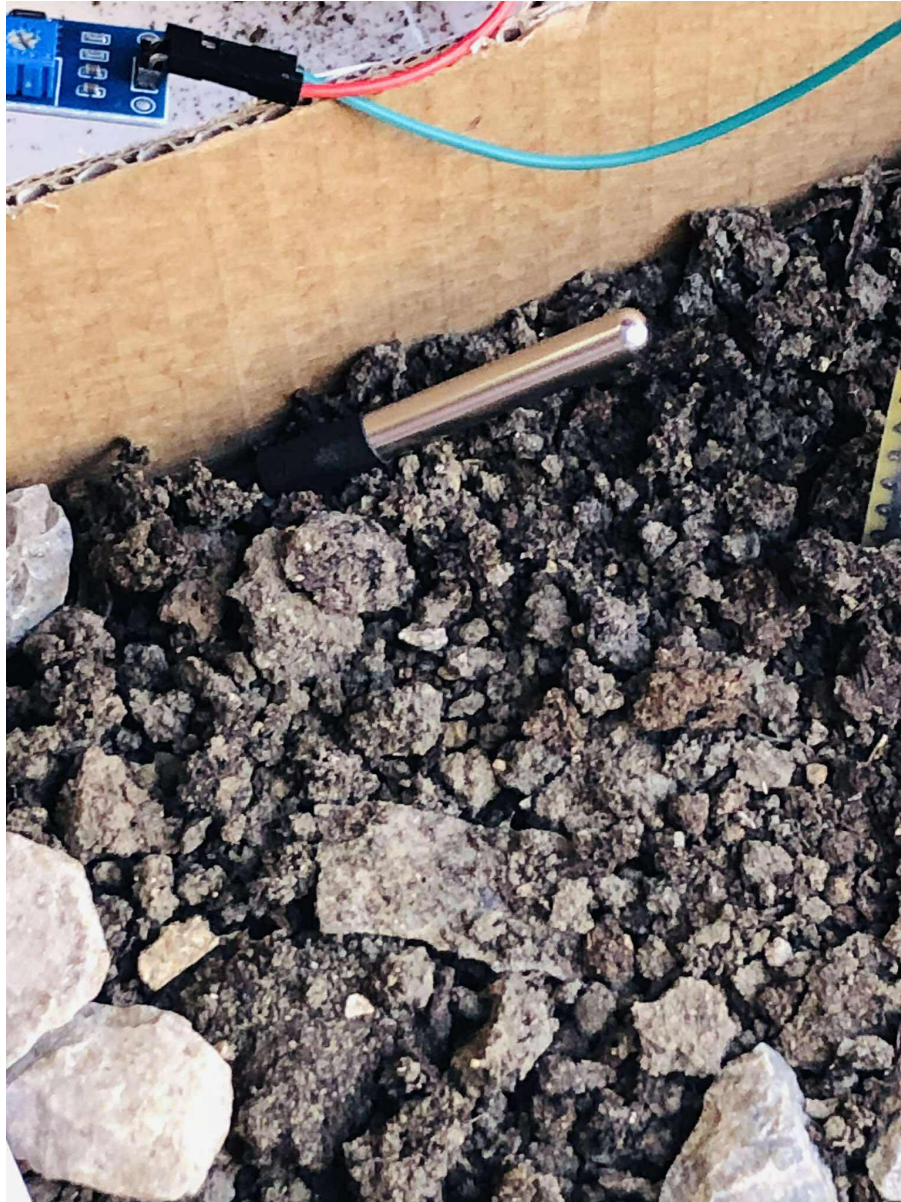


FIGURE 3.20 – test de température

3.4.1.2 Test d'humidité :

Le test d'humidité consiste à valider le bon fonctionnement du capteur d'humidité du sol. Ce test permet de mesurer l'efficacité du capteur dans différentes conditions d'humidité du sol, et de vérifier si les données recueillies influencent correctement le système d'arrosage automatique du prototype Zar3i.

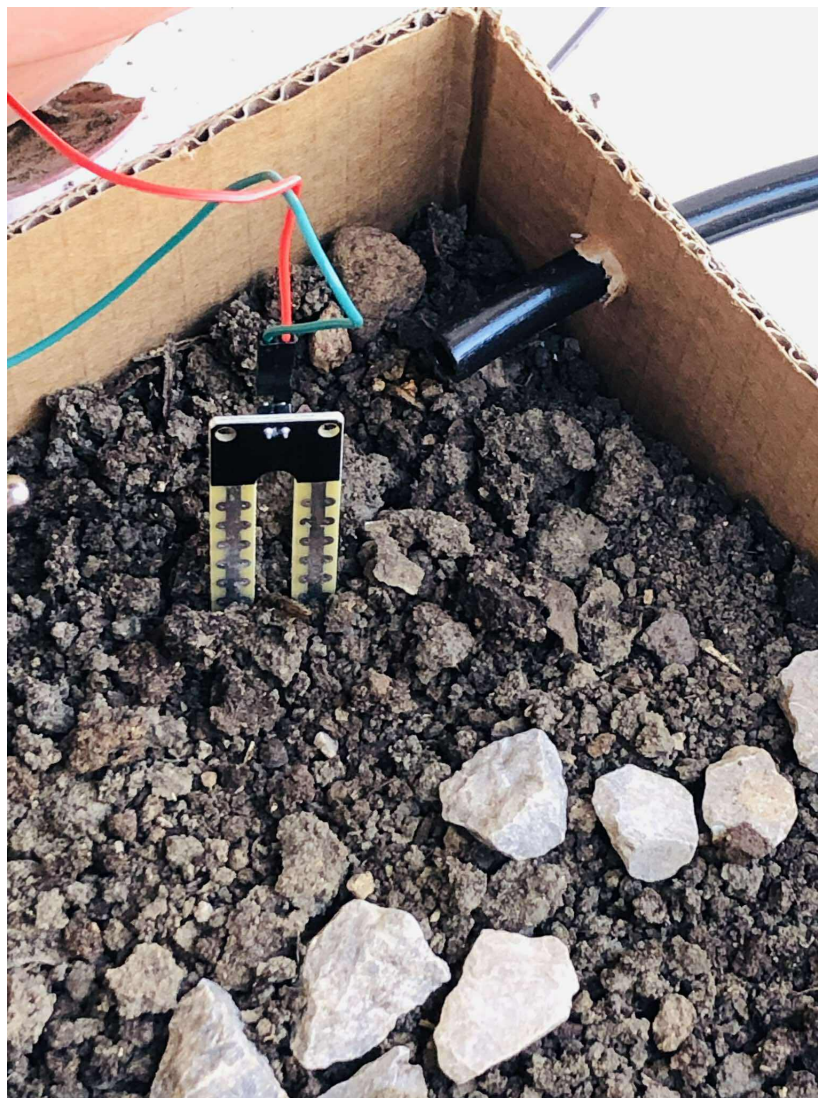


FIGURE 3.21 – test d'humidité

3.4.1.3 Test de la pompe à eau :

Le test de la pompe à eau permet de s'assurer que le système d'irrigation automatisé fonctionne comme prévu. Il évalue la capacité de la pompe à fournir l'eau à la bonne pression et pendant la durée définie dans le cycle d'arrosage, tout en contrôlant la gestion de la pompe par l'ESP32.



FIGURE 3.22 – Test De La pompe à eau

3.4.1.4 Test de relais :

Le test de relais consiste à vérifier le bon fonctionnement du module relais 5V intégré dans le prototype Zar3i, qui permet de contrôler la pompe à eau. Ce test évalue la capacité du relais à s'activer et à désactiver correctement en réponse aux commandes de l'ESP32, garantissant ainsi une gestion efficace de l'irrigation.



FIGURE 3.23 – Test de relais

3.5 Approche expérimentale et analyse de résultats

3.5.1 Développement du modèle de classification des maladies végétales :

3.5.1.1 Description du New Plant Diseases Dataset :

Nous avons utilisé le New Plant Diseases Dataset, un dataset très complet qu'on a récupéré depuis Kaggle. Il contient au total 38 classes, qui représentent soit des maladies spécifiques touchant différentes plantes, soit des plantes saines. Ce qui est intéressant avec ce dataset, c'est qu'il est bien structuré : chaque classe est organisée dans un dossier séparé, ce qui nous a facilité l'importation avec ImageFolder.

Au niveau du volume, on a 70 295 images pour l'entraînement et 17 572 pour la validation, avec des images en couleur au format 256x256, ce qui est parfait pour entraîner un modèle CNN. Les données sont aussi augmentées artificiellement, c'est-à-dire qu'il y a eu des transformations appliquées (comme la rotation, le zoom, etc.) pour simuler des cas réels et améliorer la capacité du modèle à bien généraliser.

En gros, ce dataset nous a permis de tester notre modèle sur une large variété de cas concrets, que ce soit des tomates infectées, des pommes avec des champignons, ou même des feuilles de maïs rouillées. C'était un choix solide pour notre projet.

3.5.1.2 Objectifs scientifiques et motivations :

L'identification automatisée des maladies végétales est une composante essentielle de l'agriculture de précision. Ce projet a pour but de concevoir un système d'intelligence artificielle basé sur la vision par ordinateur, capable de reconnaître des maladies à partir d'images de feuilles. Le modèle repose sur un réseau de neurones convolutif (CNN), choisi pour sa capacité à extraire automatiquement des caractéristiques visuelles discriminantes.

3.5.1.3 Biais dans les données :

Le jeu de données présente des biais notables :

Biais de distribution : certaines classes sont sur-représentées, ce qui peut conduire le modèle à privilégier ces classes lors des prédictions.

Biais de captation : les images ont été prises dans des conditions idéales (fond neutre, bonne lumière), ce qui limite la généralisation en contexte réel.

3.5.1.4 Risque de sur-apprentissage :

Bien que la courbe de validation ne montre pas de divergence majeure, il existe un léger sur apprentissage détectable à partir de la 13e époque, où la loss de validation stagne tandis que celle d'entraînement continue de baisser. Des techniques de régularisation supplémentaires (batch normalization, data augmentation personnalisée, early stopping) pourraient être envisagées pour renforcer la robustesse.

3.5.1.5 Compréhension et préparation du jeu de données :

Le jeu de données utilisé est le *New Plant Diseases Dataset (Augmented)* provenant de Kaggle, dérivé du PlantVillage Dataset.

- **Nombre total d'images :** environ 88 000
- **Nombre de classes :** 38
- **Type de maladies :** Early blight, Late blight, Rust, etc.
- **Espèces :** Tomato, Apple, Grape, etc.

Classe : catégorie à prédire dans un problème de classification.

Augmentation de données : transformation d'images existantes pour créer plus de diversité et éviter le surapprentissage.

Ensemble	Taille	Utilisation
Entraînement	70 295 images	Ajustement des poids
Validation	17 572 images	Suivi de la performance
Test	~3000 images	Évaluation finale

TABLE 3.1 – Répartition des ensembles de données

3.5.1.6 Prétraitement des données :

Les étapes appliquées sont :

- Redimensionnement à 256×256 pixels
- Normalisation des pixels à $[0, 1]$ avec `Rescaling(1./255)`

- Conversion en tenseurs via TensorFlow
- Mélange et préchargement des lots pour GPU

Tenseur : structure de données multidimensionnelle utilisée en deep learning.

3.5.1.7 Architecture du modèle CNN :

N°	Couche	Type	Paramètres
1	Entrée	Image $256 \times 256 \times 3$	–
2	Convolution	Conv2D (32 filtres)	ReLU, kernel 3×3
3	Pooling	MaxPooling2D	2×2
4	Convolution	Conv2D (64 filtres)	ReLU
5	Pooling	MaxPooling2D	2×2
6	Convolution	Conv2D (128 filtres)	ReLU
7	Pooling	MaxPooling2D	2×2
8	Flatten	–	–
9	Dense	256 neurones	ReLU + Dropout(0.5)
10	Sortie	Dense (38)	Softmax

TABLE 3.2 – Architecture du réseau convolutif

3.5.1.8 Entraînement et suivi de la performance :

Les courbes d'évolution de la précision et de la perte sont présentées ci-dessous :

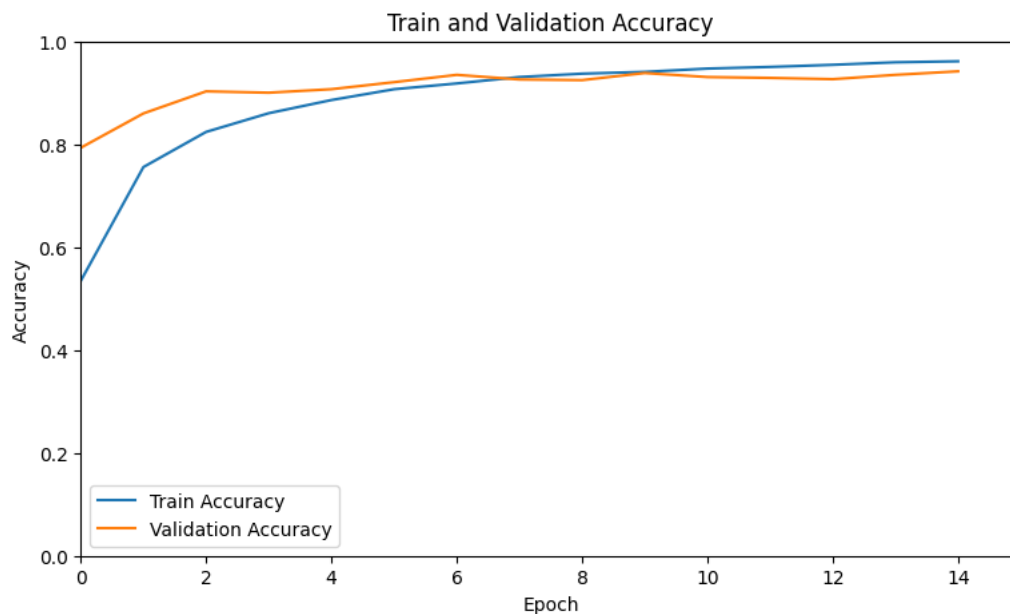


FIGURE 3.24 – Évolution de la précision (accuracy) sur l'ensemble d'entraînement et de validation

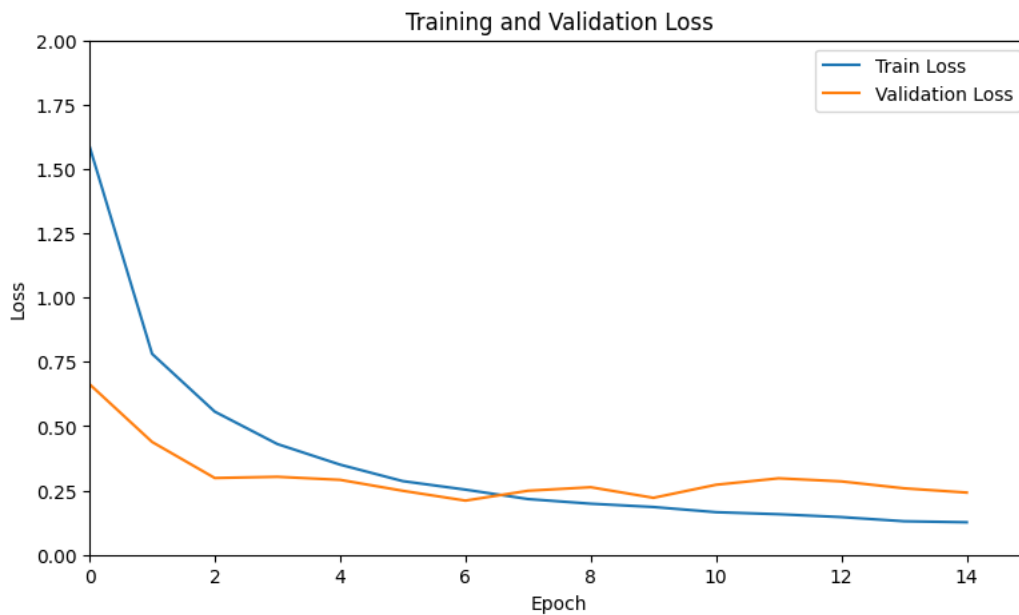


FIGURE 3.25 – Évolution de la perte (loss) sur l’ensemble d’entraînement et de validation

3.6 Résultats expérimentaux et analyse :

3.6.1 Métriques obtenues :

Indicateur	Valeur
Accuracy (validation)	94.18 %
Loss (validation)	0.2419
Précision moyenne	~94 %
Rappel moyen	~94 %

TABLE 3.3 – Résultats sur l’ensemble de validation

Accuracy : part des prédictions correctes.

Précision : fiabilité des cas positifs.

Rappel : capacité à détecter les cas pertinents.

Loss : écart moyen entre prédiction et vérité.

3.6.2 Visualisation des prédictions :

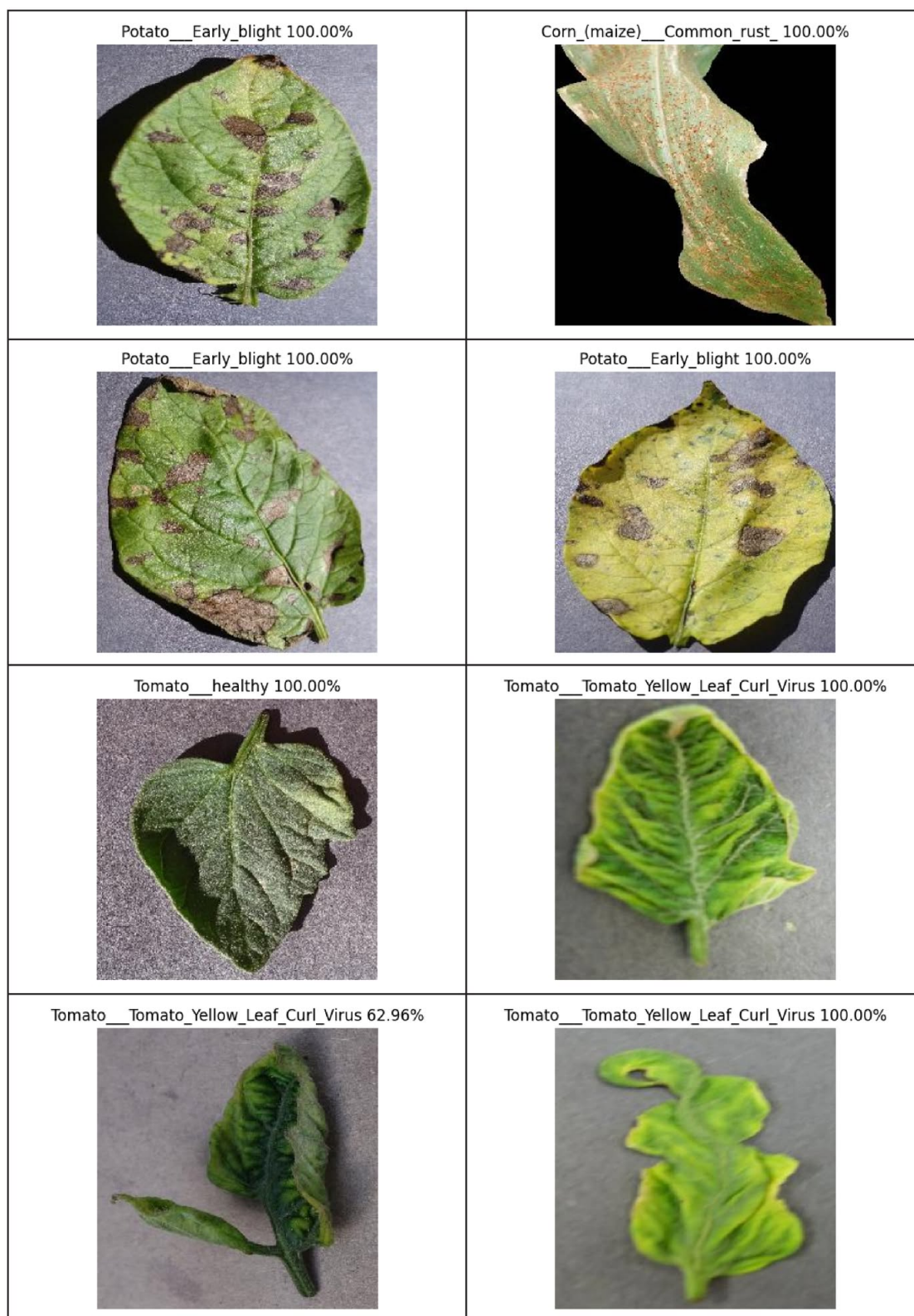


FIGURE 3.26 – 1-resultat de 32 prediction

Tomato__Early_blight 98.84% 	Tomato__healthy 97.77% 
Corn_(maize)__Cercospora_leaf_spot Gray_leaf_spot 97.10% 	Tomato__Tomato_Yellow_Leaf_Curl_Virus 100.00% 
Tomato__Early_blight 80.39% 	Potato__healthy 99.67% 
Potato__Early_blight 100.00% 	Potato__healthy 96.60% 

FIGURE 3.27 – 2-resultat de 32 prediction

Tomato__Early_blight 54.93% 	Tomato__Early_blight 89.69% 
Pepper,_bell__healthy 82.88% 	Corn_(maize)__Common_rust_ 100.00% 
Tomato__Target_Spot 99.97% 	Tomato__Early_blight 59.69% 
Tomato__Tomato_Yellow_Leaf_Curl_Virus 100.00% 	Tomato__Tomato_Yellow_Leaf_Curl_Virus 100.00% 

FIGURE 3.28 – 3-resultat de 32 prediction

Tomato__Early_blight 54.93% 	Tomato__Early_blight 89.69% 
Pepper,_bell__healthy 82.88% 	Corn_(maize)__Common_rust_ 100.00% 
Tomato__Target_Spot 99.97% 	Tomato__Early_blight 59.69% 
Tomato__Tomato_Yellow_Leaf_Curl_Virus 100.00% 	Tomato__Tomato_Yellow_Leaf_Curl_Virus 100.00% 

FIGURE 3.29 – 4-resultat de 32 prediction

3.6.3 Limites observées :

- Le modèle n’a pas encore été intégré à l’application mobile existante.
- Il n’a pas été testé sur des images de terrain, prises dans des conditions réelles (lumino-sité, ombres, arrière-plans complexes).
- L’explicabilité des décisions (via Grad-CAM) n’a pas encore été ajoutée.

3.7 Technologies et perspectives :

3.7.1 Définitions techniques :

- **CNN** : réseau neuronal spécialisé pour les données visuelles.
- **TensorFlow / Keras** : bibliothèques d’apprentissage automatique.
- **Softmax** : fonction de normalisation en probabilité.
- **Dropout** : technique de régularisation pour éviter le surapprentissage.

3.7.2 Comparaison avec d’autres méthodes :

Approche	Avantages	Inconvénients
ResNet-50	Très haute précision	Trop lourd pour mobile
MobileNetV2	Léger, optimisé embarqué	Moins performant
Transfer Learning	Convergence rapide	Dépendance externe
TensorFlow Lite	Déploiement embarqué	Quantification nécessaire

TABLE 3.4 – Comparaison hypothétique avec d’autres architectures

3.8 Axes de recherche futurs :

En ce qui concerne les axes de recherche futurs, plusieurs pistes s’offrent à nous pour améliorer et étendre notre projet Zar3i, et ainsi offrir une solution encore plus robuste et scalable pour l’agriculture durable. Nous avons réfléchi ensemble à plusieurs directions à explorer pour pousser plus loin notre recherche et développement.

- **Amélioration des modèles de machine learning pour la classification des fruits :**

Nous avons constaté que, bien que le modèle de classification actuel donne de bons résultats, il reste des marges de progression. Un des axes principaux de notre recherche

future serait d'explorer des modèles de machine learning plus complexes, comme les réseaux neuronaux convolutifs (CNN), qui sont particulièrement adaptés à la reconnaissance d'images. Cela permettrait de mieux gérer la classification des fruits dans des conditions variables (par exemple, différents types de lumière, d'angles de prise de vue, etc.) et d'améliorer la précision du système.

- **Expansion à d'autres types de cultures :**

Actuellement, notre système est orienté vers des fruits spécifiques. Cependant, à long terme, nous envisageons d'étendre le projet pour inclure d'autres types de plantes et cultures agricoles. Ce travail impliquera la collecte de nouveaux datasets pour diverses cultures, et l'adaptation de l'algorithme de classification pour gérer des caractéristiques visuelles différentes selon les types de végétaux. En outre, il pourrait être pertinent de développer un système capable de s'adapter à des cultures spécifiques en fonction des besoins en eau et des exigences climatiques.

- **Optimisation énergétique et utilisation des énergies renouvelables :**

L'un des défis majeurs des systèmes d'irrigation automatisés est leur consommation énergétique. À ce titre, nous pensons qu'une optimisation énergétique du système serait cruciale. Nous pourrions explorer l'utilisation d'énergies renouvelables, telles que l'énergie solaire, pour alimenter notre système d'irrigation. Cette solution pourrait rendre le système encore plus autonome et écologique, en réduisant les coûts opérationnels et l'empreinte carbone.

- **Système d'irrigation prédictif et intelligence environnementale :**

Une autre piste prometteuse réside dans l'intégration d'un système prédictif d'irrigation. Ce système pourrait utiliser des données météorologiques en temps réel, ainsi que des prévisions climatiques, pour ajuster automatiquement les paramètres d'arrosage en fonction des besoins futurs des plantes. En ajoutant un composant de machine learning capable de prédire les besoins en eau d'une culture en fonction des conditions

climatiques à venir, nous serions en mesure de rendre l'irrigation encore plus efficace et de maximiser l'économie d'eau.

- **Commercialisation et déploiement à grande échelle :**

À mesure que notre projet atteint un niveau de maturité, une question importante réside dans l'industrialisation et la commercialisation de notre solution. En collaboration avec des acteurs du secteur agricole, nous pourrions déployer le système sur de grandes surfaces agricoles, voire même dans des jardins urbains ou des serres commerciales. Le développement d'un modèle économique viable (par exemple, basé sur l'abonnement ou la vente d'unités de terrain connectées) permettrait d'élargir l'impact du projet.

3.9 Conclusion :

Cette expérimentation a démontré la capacité d'un modèle CNN léger à classer 38 types de maladies végétales avec une précision de 94.18%. Bien que non encore intégré dans l'application, son efficacité ouvre la voie à des usages réels en agriculture intelligente, notamment dans les contextes à faibles ressources.

Conclusion Générale :

L'agriculture, secteur essentiel pour la production alimentaire mondiale, fait face à de nombreux défis, notamment les changements climatiques, les pénuries d'eau, et la gestion efficace des ressources naturelles. Dans ce contexte, l'introduction de technologies innovantes, telles que l'agriculture intelligente, offre des solutions prometteuses pour améliorer la productivité et la durabilité des exploitations agricoles.

Le projet Zar3i s'inscrit dans cette tendance en développant une application mobile d'agriculture intelligente intégrée. L'objectif principal de Zar3i est d'offrir une solution complète pour la gestion des cultures fruitières, en combinant l'intelligence artificielle, l'Internet des objets (IoT), et l'automatisation de l'irrigation. Cette application permet non seulement de détecter les maladies des plantes à l'aide de modèles de classification avancés, mais aussi de gérer l'irrigation des cultures grâce à un système automatisé contrôlé par la carte ESP32.

En intégrant des capteurs environnementaux (température et humidité), Zar3i ajuste les cycles d'irrigation en temps réel, permettant ainsi d'optimiser l'utilisation de l'eau tout en répondant aux besoins spécifiques des cultures. Cette approche novatrice se distingue par sa capacité à fonctionner hors ligne, à adapter les interventions en fonction des conditions locales, et à fournir des recommandations précises aux agriculteurs, tout en réduisant les coûts et les risques associés aux maladies des plantes.

Le présent mémoire décrit en détail le développement de l'application Zar3i, en exposant sa conception, ses fonctionnalités, et la comparaison avec d'autres solutions existantes sur le marché. Ce travail analyse également les spécifications techniques du projet et présente les résultats des tests effectués sur le terrain pour valider son efficacité et sa robustesse.

Références

- [1] Y. Zhao, X. Li, and Z. Wang, “Advances in smart irrigation technology and applications,” *Sensors*, vol. 20, no. 15, p. 4231, 2020.
- [2] Statistique Canada, Division de la statistique de l’environnement, de l’énergie et des transports, “Enquête sur l’eau dans l’agriculture,” Rapport, année à préciser, consulté via Statistique Canada.
- [3] L. Pereira, *Irrigation : Theory and Practice*. L.S. Pereira, 2023.
- [4] W. A. Dorigo, X. Li, , and C. Rüdiger, “Smart water management for agriculture : The potential of remote sensing,” *Sensors*, vol. 17, no. 11, p. 2442, 2017.
- [5] C. J. Vörösmarty, P. B. McIntyre, M. O. Gessner, D. Dudgeon, A. Prusevich, P. Green, ..., and P. M. Davies, “Global threats to human water security and river biodiversity,” *Nature*, vol. 467, no. 7315, pp. 555–561, 2010.
- [6] L. S. Pereira, I. Cordery, and I. Iacovides, “Improved indicators of water use performance and productivity for sustainable water conservation and saving,” *Agricultural Water Management*, vol. 193, pp. 107–120, 2017.
- [7] P. Zwaenepoel and J. Le Bars, “L’agriculture de précision,” *Ingénieries eau-agriculture-territoires*, vol. 12, pp. 67–79, 1997, ffhal-00461080.
- [8] K. K. Patel, S. M. Patel, and D. Patel, “Iot based smart irrigation system using sensor networks,” *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering*, vol. 9, no. 2, pp. 3012–3016, 2020.
- [9] A. Kumar, S. Singh, and S. Chatterjee, “Challenges and opportunities in smart irrigation

- system : A review,” *Sustainable Computing : Informatics and Systems*, vol. 28, p. 100416, 2020.
- [10] A. Kamilaris and F. X. Prenafeta-Boldú, “Deep learning in agriculture : A survey,” *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 147, pp. 70–90, 2018.
- [11] A. Fuentes, S. Yoon, S.-C. Kim, and D.-S. Park, “A robust deep-learning-based detector for real-time tomato plant diseases and pests recognition,” *Sensors*, vol. 17, no. 9, p. 2022, 2017.
- [12] S. P. Mohanty, D. P. Hughes, and M. Salathé, “Using deep learning for image-based plant disease detection,” *Frontiers in Plant Science*, vol. 7, p. 1419, 2016.
- [13] FAO, “Guide de l’irrigation des cultures légumières et fruitières, avec focus sur la fraise,” Organisation des Nations Unies pour l’alimentation et l’agriculture (FAO), Tech. Rep., besoins en eau entre 20 et 30 mm par semaine selon le climat.
- [14] INRA, “Gestion de l’irrigation en arboriculture fruitière,” Institut National de la Recherche Agronomique (INRA), Rapport technique, 2010.
- [15] Plantix, “Plantix : Diagnose plant diseases with ai,” 2023. [Online]. Available : <https://plantix.net>
- [16] AgriApp, “Agriapp – agriculture information app,” 2023. [Online]. Available : <https://agriapp.com>
- [17] Croper, “Solutions de surveillance des cultures avec technologie satellite et drone,” 2023. [Online]. Available : <https://croper.com>
- [18] SmartFarm, “Smartfarm – logiciel de gestion agricole,” 2023. [Online]. Available : <https://smartfarm.com>