

République algérienne démocratique et populaire.
Ministère de L'enseignement Supérieure de la recherche scientifique.
Université 8 Mai 45 –Guelma-
Faculté des Mathématiques, d'informatique et des Sciences de la Matière
Département d'Informatique



Mémoire de Fin d'études Master

Filière : Informatique

Option : Science et technologie de l'information et de la communication.

Thème :

TerraSense : Surveillance intelligente de la santé du sol pour une agriculture durable.

Présenté par : *BOUZIDI Lina Maya*

Membres de jury :

- Président : *Dr. CHOIRA Chemseddine*
- Encadreur : *Pr. FAROU Brahim*
- Examineur : *Dr. BENAMIRA Adel*
- Représentante pôle pro : *Dr. ABBAS Zahra*

Remerciment

Avant toute chose, je rends grâce à **Dieu** Tout-Puissant, source de sagesse et de persévérance, pour m'avoir accordé la santé, la force et la patience nécessaires à la réalisation de ce travail.

Je tiens ensuite à exprimer ma plus profonde gratitude à **Pr.FAROU Brahim**, mon encadrant, pour son encadrement exemplaire tout au long de ce projet. Sa rigueur scientifique, son accompagnement méthodique et sa disponibilité constante ont été pour moi d'un soutien inestimable. Grâce à sa vision claire et à ses conseils avisés, j'ai pu structurer ma réflexion, affiner ma démarche et mener à bien cette recherche dans les meilleures conditions. Sa confiance et ses encouragements ont constitué un véritable moteur tout au long de ce parcours.

Je tiens également à remercier chaleureusement le groupe **AI HOUSE**, pour son environnement stimulant et enrichissant. Une mention spéciale à **Dr. HALLACI Samir**, dont l'expertise technique, les échanges enrichissants et l'ouverture d'esprit ont joué un rôle déterminant dans l'évolution de ce travail.

Mes remerciements vont également à l'équipe du Laboratoire **LabSTIC** (Laboratoire des Systèmes et Technologies de l'Information et de la Communication), pour les moyens techniques et l'environnement scientifique mis à disposition. Je tiens à saluer particulièrement **Mr. SERIDI Hamid**, pour sa disponibilité et son appui logistique, ainsi que **Mlle KHAROUBI Madiha**, ingénieure de laboratoire, pour son assistance précieuse et sa collaboration technique tout au long de cette recherche.

Mes remerciements vont également à l'incubateur de l'Université 8 mai 1945 de Guelma, qui m'a offert un cadre propice à l'innovation et au développement de ce projet. Je remercie tout particulièrement Monsieur **BENKIRAT Abdelaziz**, directeur de l'incubateur, pour sa confiance, son soutien et sa précieuse implication dans la valorisation de l'entrepreneuriat scientifique au sein de l'université.

Je tiens à exprimer ma sincère gratitude aux **membres du jury** pour l'honneur qu'ils me font en acceptant d'examiner ce travail. Leur présence témoigne de l'intérêt qu'ils portent à mes recherches et de leur engagement à encourager la rigueur scientifique. Je les remercie chaleureusement pour le temps qu'ils consacreront à l'évaluation de ce mémoire, ainsi que pour la richesse de leurs remarques, critiques constructives et suggestions éclairées, qui ne manqueront pas d'enrichir et d'approfondir la portée de cette étude.

Je tiens également à remercier l'ensemble **des enseignants** de l'université 8 Mai 1945 - Guelma- pour toutes les informations qu'ils m'ont prodigué durant les cinq ans de ma formation.

Enfin, je remercie toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à la réussite de ce travail. À chacun et chacune d'entre vous, recevez l'expression de ma sincère reconnaissance.

Dédicaces

À mes chers parents, qui m'ont transmis les valeurs du travail, de la persévérance et de l'intégrité. Leur amour inconditionnel, leurs sacrifices silencieux et leur foi en moi ont été la lumière constante qui a guidé mes pas.

À ma chère mère, femme au cœur immense, au courage silencieux et à l'amour inconditionnel. Tu as été, depuis mes premiers pas, mon refuge, ma force et mon inspiration. C'est dans tes prières discrètes, tes sacrifices quotidiens et ton regard plein de tendresse que j'ai puisé l'énergie d'avancer, même dans les moments les plus difficiles. Ce travail t'appartient autant qu'à moi, car il est le fruit de ton dévouement, de ton soutien sans faille et de ta foi inébranlable en mes capacités.

À mon petit frère, ton innocence a été ma motivation constante.. Cette réussite est également la tienne.

À miness, la meilleure personne que j'ai rencontrée dans ma vie merci d'être toujours avec moi. Merci pour ton soutien continu, tes paroles qui m'ont poussé et me poussent encore vers le succès. Merci d'avoir écouté toute mes plaintes.

À mes chères tantes, femmes admirables : *Doudi, Amel, Pis et Atika*, Vous avez été pour moi des modèles de force, de sagesse et d'inspiration. Votre présence bienveillante, vos paroles d'encouragement et votre soutien constant ont marqué mon parcours d'une empreinte précieuse. Votre influence, a nourri en moi la détermination d'avancer et de croire en mes capacités. C'est avec une profonde reconnaissance et une sincère admiration que je vous dédie cette réussite, symbole modeste de tout ce que vous représentez dans ma vie.

À la mémoire de mes chers grands-parents : *KHELASSI Mohamed Lakhdar* et *BENSOULLAH Fatma Zohra*, Même si vous n'êtes plus physiquement parmi nous, votre souvenir demeure profondément ancré dans mon cœur et dans chacun de mes pas. Vous avez été des piliers de sagesse, de dignité et d'amour dans notre famille, et votre héritage continue de m'inspirer au quotidien. Votre bienveillance, vos valeurs, et vos prières m'accompagnent silencieusement à chaque étape de ma vie. Ce mémoire est aussi le vôtre, un hommage modeste à tout ce que vous avez semé en moi. Puisse cette réussite être le reflet de l'éducation et des principes que vous avez transmis, et un témoignage de mon éternelle reconnaissance. Reposez en paix

À mes coéquipiers SM/ART, Mohammed, Achraf, et Wassim, Merci pour cette belle aventure humaine et intellectuelle. Votre esprit d'équipe, votre rigueur et votre enthousiasme ont rendu chaque étape plus enrichissante, chaque défi plus stimulant, et chaque difficulté plus surmontable. Entre passion partagée, nuits de travail, solutions brillantes et éclats de rire, vous avez su transformer cette expérience en un véritable moment de complicité et d'excellence. Votre intelligence collective a donné une dimension unique, et je vous suis profondément reconnaissante pour cela.

Spécialement à Achraf, Merci au fond du cœur pour ton soutien indéfectible, ta générosité et ta présence dans les moments difficiles comme dans les instants de joie. ton aide m'a profondément marqué, et je ne l'oublierai jamais.

À toutes mes meilleures amies Célia MERDJA, Imene OUMEDDOUR et Marwa KOLLI merci pour les beaux moments que nous avons partagés tout au long de ce parcours.

A mes collègues Et à toutes les personnes qui m'ont aidé, de près ou de loin, pendant mes études. Je vous suis profondément reconnaissante.

Résumé

Ce mémoire explore le développement d'un système intelligent de surveillance de la santé des sols pour une agriculture durable. Face aux limites des techniques traditionnelles de suivi, il propose une solution intégrée reposant sur l'Internet des Objets (IoT), l'intelligence artificielle (IA) et des capteurs multiparamètres. Le système, baptisé *TerraSense*, permet la collecte en temps réel de données pédoclimatiques (température, humidité, pH, nutriments, etc.), leur transmission via LoRaWAN et leur traitement par un modèle d'apprentissage automatique (XGBoost) capable de prédire l'état de santé des plantes (sain, stress modéré ou élevé). L'approche a été validée par des tests sur le terrain (pot, jardin, champ de blé) et a démontré une précision élevée, une autonomie énergétique assurée par un panneau solaire, ainsi qu'une interface web conviviale pour l'agriculteur. Cette solution représente une avancée vers une agriculture de précision accessible, proactive et éthique.

Mots-clés : Agriculture de précision, IoT, santé des sols, XGBoost, capteurs intelligents, LoRaWAN, stress hydrique, IA embarquée.

المخلص

يهدف هذا البحث إلى تطوير نظام ذكي لمراقبة صحة التربة من أجل الزراعة المستدامة. نظراً للقيود التي تفرضها الأساليب التقليدية، تم اقتراح نظام متكامل يعتمد على إنترنت الأشياء والذكاء الاصطناعي وأجهزة استشعار متعددة. يقوم هذا النظام، المسمى TerraSense، بجمع بيانات التربة والبيئة في الوقت الحقيقي (درجة الحرارة، الرطوبة، الحموضة، العناصر الغذائية...)، ويرسلها عبر شبكة LoRaWAN، ثم يحللها باستخدام نموذج تعلم آلي (XGBoost) للتنبؤ بحالة صحة النبات (سليم، إجهاد متوسط، أو إجهاد مرتفع). تم اختبار النظام في أوعية زراعية وحدائق وحقول قمح، وأثبت دقته العالية، واستقلاليته في الطاقة بفضل الألواح الشمسية، وسهولة استخدامه من خلال واجهة ويب مناسبة للمزارعين. يمثل هذا الحل خطوة مهمة نحو الزراعة الدقيقة الذكية والأخلاقية.

الكلمات المفتاحية: الزراعة الدقيقة، إنترنت الأشياء، صحة التربة، XGBoost، الاستشعار الذكي، LoRaWAN، الإجهاد المائي، الذكاء الاصطناعي.

Abstract

This thesis presents the design and implementation of an intelligent soil health monitoring system to support sustainable agriculture. In response to the limitations of traditional soil monitoring methods, the proposed solution integrates Internet of Things (IoT) technology, artificial intelligence (AI), and multi-sensor hardware. The system, named *TerraSense*, enables real-time collection of agro-environmental data (temperature, humidity, pH, nutrients, etc.), wireless transmission via LoRaWAN, and intelligent analysis using an XGBoost classifier to predict plant health status (healthy, moderately stressed, or highly stressed). Field tests in pots, gardens, and wheat fields confirmed the system's high accuracy, energy autonomy via solar power, and user-friendly web interface. This work contributes to the advancement of affordable, proactive, and ethical precision agriculture.

Keywords: Precision agriculture, IoT, soil health, XGBoost, smart sensors, LoRaWAN, water stress, embedded AI.

Table des matières

Résumé	i
Liste des figures	vii
Liste des tableaux	viii
Introduction Générale	1
Chapitre 1 : Revue de littérature	3
1.1 Introduction	3
1.2 Aperçu de la santé des sols et de son rôle dans l’agriculture durable	3
1.2.1 Définition holistique de la santé des sols	3
1.2.2 Indicateurs scientifiques de santé des sols	4
1.2.3 Le rôle de la santé des sols dans l’agriculture durables	6
1.3 Techniques de surveillance du sol traditionnelles vs intelligentes	7
1.3.1 Techniques traditionnelles de surveillance des sols	7
1.3.2 Les techniques intelligentes de surveillance des sols	10
1.4 Internet des objets dans l’agriculture de précision	13
1.4.1 Architecture technologique de l’IoT pour la santé des sols	14
1.4.2 Avantages socio-économiques et limites critiques	14
1.4.3 Études de cas émergentes	15
1.5 Systèmes existants et solutions technologiques	15
1.5.1 Systèmes de surveillance du sol en temps réel	16
1.5.2 Systèmes de télédétection et d’analyse avancée	18
1.5.3 Systèmes autonomes et robotiques	19
1.5.4 Systèmes d’aide à la décision (DSS - Decision Support Systems)	21
1.6 Limite de la recherche actuelle et les problèmes ouverts	22
1.6.1 Absence d’une Approche Multi-Capteurs Intégrée	22
1.6.2 Détection inefficace des bioagresseurs souterrains	22
1.6.3 Dépendance énergétique limitant le déploiement	23
1.6.4 Manque de solutions LoRaWAN optimisées pour l’agriculture	23
1.7 Conclusion	23
Chapitre 2 : Exigences et architecture du système	24
2.1 Introduction	24
2.2 Exigences fonctionnelles et non-fonctionnelles	24
2.2.1 Exigences fonctionnelles	24
2.2.2 Exigences non fonctionnelles	25
2.3 Aperçu du système	25
2.3.1 Principaux objectifs	26
2.3.2 Composants matériels	26

2.3.3	Composants logiciels	32
2.4	Architecture du système	34
2.4.1	Sélection et Stratégies de Déploiement des Capteurs	36
2.4.2	La collecte de données	39
2.4.3	Stockage et transmission des données	40
2.4.4	Etiquetage du dataset	40
2.4.5	Extraction et sélection des fonctionnalités	40
2.4.6	Sélection du modèle d'IA	41
2.4.7	Métriques d'évaluation	43
2.5	Conclusion	44
Chapitre 3 : Implémentation, Évaluation et Résultats		45
3.1	Introduction	45
3.2	Description générale	45
3.3	Présentation du Jeu de Données	45
3.4	Configurations et Paramétrage des modèles	46
3.5	Evaluation des performance des modèles d'IA	47
3.5.1	XGBoost	47
3.5.2	LightGBM	48
3.5.3	SVM	48
3.5.4	Choix du Modèle Final	49
3.6	Études de cas et tests réels	50
3.6.1	Cas 1 – Plante en pot :	50
3.6.2	Cas 2 – Jardin (conditions variées) :	51
3.6.3	Cas 3 – Champ de blé (grande culture en plein champ) :	52
3.7	Performance du système	54
3.8	Interprétation et discussion des résultats	56
3.9	Bulletin d'analyses physico-chimique	57
3.10	Limites et défis	58
3.10.1	Les limites	58
3.10.2	Perspectives d'amélioration	59
3.11	Impacts éthiques et sociétaux	60
3.11.1	Confidentialité des données et propriété	60
3.11.2	Équité et inclusion numérique	60
3.11.3	Maintien de l'autonomie décisionnelle	60
3.11.4	Recommandations pour un déploiement responsable	60
3.11.5	Considérations environnementales	61
3.12	Conclusion	61
Conclusion générale		62
Webographie		66
Bibliography		66
Startup annexe		72

Table des figures

1.2	Évolution des concepts liés aux fonctions et services rendus par les sols.	4
1.3	Triangle des textures du sol[W2].	5
1.4	Échantillonnage du sol par échantillons composites	7
1.5	Analyse des sols en l'aboratoire[W7]	8
1.6	Evaluation de la structure du sol [W8]	9
1.7	Biomasse microbienne	9
1.8	Architecture d'un réseau de capteurs sans fil [W10]	11
1.9	Télédétection par Satellite et Drone	11
1.10	Apprentissage automatique [W14]	12
1.11	Robots autonomes [W15]	13
1.12	L'utilisation de la blockchain [W16]	13
1.13	projet IoT soil [W17].	15
1.14	systèmes énergétiques autonomes [W18].	15
1.15	station météo vantage pro2	16
1.16	Réseaux de capteurs sans fil	17
1.17	Drones [W20]	17
1.18	LPWAN et IoT [W21]	18
1.19	satellite Sentinel-2 [W22]	18
1.20	les capteurs portables de types Agrocars [W23]	19
1.21	Drones Agricoles	20
1.22	Robots autonomes	20
1.23	Plateformes intelligentes basées sur l'IA	21
1.24	FarmX [W29]	22
2.3	Diagramme de flux de données [W31]	26
2.4	Capteur DHT22 [W32]	27
2.5	Capteur BH1750 [W33]	27
2.6	Capteur d'humidité [W34]	27
2.7	Capteur de température [W35]	27
2.8	Capteur PH [W36]	28
2.9	Capteur de CE [W37]	28
2.10	Capteur de nutriments [W38]	28
2.11	Capteur PIR [W39]	28
2.12	Capteur SW-420 [W40]	29
2.13	Module lora	29
2.14	Panneau Solaire [W42]	30
2.15	Batterie Lipo [W43]	30
2.16	Circuit de gestion de l'alimentation [W44]	30
2.17	Esp32 [W45]	31
2.18	Le boîtier	32
2.19	Vue détaillée de l'architecture du système	35
2.20	Circuit du système	36

2.21	dispersion d'étiquetage des données	40
2.22	Architecture d XGBoost	41
2.23	Architecture de LightGBM	42
2.24	SVM [W61]	43
3.4	Dispersion d'étiquetage des données	46
3.5	Matrice de confusion du modèle XGBoost	47
3.6	Matrice de confusion du modèle LightGBM	48
3.7	Matrice de confusion du modèle SVM	49
3.8	Boitier intégré dans un pot.	51
3.9	Boitier intégré dans un jardin.	52
3.10	Boîtier intégré dans un champ.	53
3.11	Interface web du système	54
3.12	Bulletin d'analyses	58

Liste des tableaux

2.1	Capteurs multisources intégrés dans le boîtier.	37
3.2	Résultats de performance du modèle XGBoost	47
3.3	Résultats de performance du modèle LightGBM	48
3.4	Résultats de performance du modèle SVM	49
4.1	Calendrier d'achèvement du projet	73
4.2	Planning de décaissements pour le projet de surveillance intelligente de la santé des sols	81

Introduction Générale

Avec l'avènement de l'ère de l'agriculture de précision et des défis sans cesse croissants de la sécurité alimentaire et de la durabilité environnementale, la surveillance intelligente de la santé des sols est proposée comme une approche prometteuse pour lutter contre ces problèmes en combinant l'augmentation des rendements à la protection des ressources naturelles. Les sols constituent le fondement de l'écosystème agricole et, pourtant, ils sont de plus en plus affectés par les pratiques de gestion et de production inadéquates, comme la surfertilisation, l'irrigation inefficace et les rotations culturales mal planifiées. Il en résulte non seulement une chute des rendements, mais également une détérioration de la qualité des terres, entraînant leur inadéquation à l'utilisation continue.

Face à ces défis, les nouvelles technologies telles que l'Internet des Objets, les drones et l'intelligence artificielle, ouvrent de nouvelles perspectives pour transformer la façon dont nous surveillons et gérons la santé des sols. L'objectif de ce projet est de mettre en place un système de surveillance intelligent en temps réel capable de recueillir, d'analyser et d'interpréter des informations cruciales telles que l'humidité, la température, les nutriments et la structure chimique du sol.

En se basant sur des algorithmes avancés, cette plateforme aidera les agriculteurs en leur fournissant des conseils personnalisés pour une meilleure utilisation des intrants, tout en économisant de l'argent et en réduisant l'empreinte écologique.

L'objectif principal de cette recherche est de présenter une approche novatrice et accessible pour une agriculture plus durable, où les décisions sont basées sur des données précises et actualisées. En associant savoir-faire agronomique et innovations technologiques, cette recherche aidera à mieux comprendre les dynamiques du sol et favorisera l'usage de méthodes culturales plus performantes et écologiquement responsables.

Pour valider l'approche proposée, un système de surveillance intelligent en temps réel a été mis en œuvre. Cette thèse est organisée en trois chapitres principaux pour aborder notre problème

- **Chapitre 1 : Revue de littérature** Ce chapitre établit les bases théoriques en analysant l'importance des sols pour l'agriculture durable et compare les méthodes traditionnelles aux nouvelles approches technologiques (IoT, IA). Il examine les solutions existantes et identifie les lacunes que cette recherche vise à combler.
- **Chapitre 2 : Exigences et architecture du système** Présente la conception complète de la plateforme intelligente, détaillant les composants matériels (capteurs), logiciels et l'architecture globale. Couvre toute la chaîne de traitement des données, depuis leur collecte jusqu'à l'analyse par des modèles d'IA optimisés.
- **Chapitre 3 : Mise en œuvre, évaluation et résultats** Démonstre l'efficacité du système à travers des tests pratiques, analyse les performances des modèles d'IA et présente des études de cas réelles. Inclut une discussion critique des résultats, des limitations et des impacts sociétaux de la solution proposée.

- **Annexe :** Dans le cadre de notre projet de graduation en vertu de la Résolution ministérielle 1275, cette section aborde les dimensions stratégiques et entrepreneuriales de notre travail. Il comprend une documentation technique détaillée, des expériences supplémentaires et des visualisations. De plus, il présente une étude de marché et une proposition de modèle commercial, en mettant l'accent sur le potentiel d'innovation, la scalabilité et l'impact réel du projet.

Chapitre 1 : Revue de littérature

1.1 Introduction

Un sol sain opère comme un écosystème vivant dynamique, offrant de nombreux services écosystémiques. Parmi ceux-ci, on compte la préservation de la qualité de l'eau et la productivité végétale, le contrôle du cycle des nutriments dans le sol, ainsi que la décomposition et l'absorption des gaz à effet de serre atmosphériques. La santé des sols est fortement liée à l'agriculture durable, étant donné que la diversité et l'activité des microorganismes présents dans le sol constituent les éléments centraux de sa santé LEHMANN et al., 2020b.

Dans la littérature scientifique, les termes santé des sols et qualité des sols sont fréquemment utilisés de manière interchangeable et certains estiment qu'ils sont fonctionnellement équivalents. Néanmoins, les experts préfèrent employer le terme qualité du sol tandis que les agriculteurs optent pour l'expression santé des sols KARLEN et al., 2003.

1.2 Aperçu de la santé des sols et de son rôle dans l'agriculture durable

La santé des sols, définie comme "la capacité continue du sol à fonctionner comme un écosystème vivant essentiel pour soutenir les plantes, les animaux et les humains" [W0] , constitue un pilier fondamental de l'agriculture durable.

1.2.1 Définition holistique de la santé des sols

Un sol véritablement sain doit simultanément remplir trois rôles clés : favoriser la productivité agricole, réguler les écosystèmes et préserver la biodiversité LEHMANN et al., 2020b. Selon les systèmes de culture, même une augmentation minime de 1% de matière organique dans les sols cultivés peut conduire à une hausse de 12 à 20% de la productivité des plantes RUMPEL et al., 2020. Les sols constituent le domicile de près de 25% de la biodiversité terrestre connue, hébergeant une complexité biologique qui dépasse fréquemment celle des écosystèmes observables WALL et al., 2015. Les sols de la Terre contiennent approximativement 2500 gigatonnes de carbone organique, ce qui représente presque trois fois la quantité présente dans l'atmosphère MINASNY et al., 2017.

Un sol en bonne santé se caractérise par :

- **Une fertilité optimale**, permettant une productivité agricole durable.
- **Une structure stable**, favorisant la rétention d'eau et la résistance à l'érosion.
- **Une activité biologique active**, avec des microorganismes participant au cycle des nutriments.

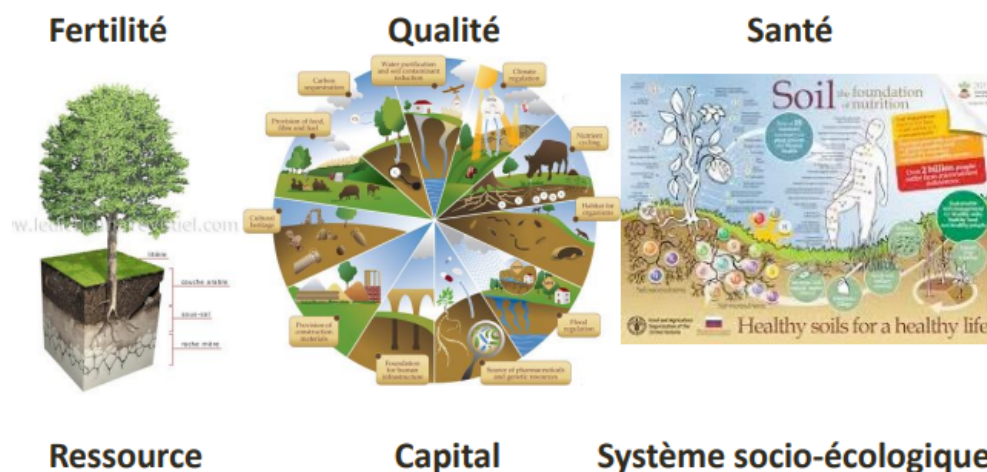


FIGURE 1.2 – Évolution des concepts liés aux fonctions et services rendus par les sols.
[W1]

1.2.2 Indicateurs scientifiques de santé des sols

On peut évaluer de la qualité des sols en se basant sur trois types d'indicateurs interdépendants : physiques, chimiques et biologiques. Ces indicateurs offrent une vision globale de la qualité et des caractéristiques fonctionnelles des sols DORAN et PARKIN, 1994.

a) Indicateurs Physiques

La structure et les propriétés hydriques du sol sont déterminées par ses caractéristiques physiques :

- **Texture** : La part spécifique de l'argile, du limon et du sable a un affect direct sur la capacité de rétention d'eau et la adaptabilité du sol BRADY et al., 2008. Typiquement, les sols argileux (avec une teneur en argile de 40% ou plus) ont une capacité supérieure à retenir l'eau, mais ils sont moins perméables (Figure 1.3).
- **Structure** : La stabilité des agrégats, évaluée à travers des tests de résistance à l'eau est essentielle pour la résistance à l'érosion LE BISSONNAIS, 1996. Une structure adéquate (note supérieure à 2 sur l'échelle de Le Bissonnais) facilite l'aération et l'infiltration des racines.
- **Densité apparente** : Pour la majorité des cultures, des valeurs idéales se trouvent entre 1,1 et 1,4 g/cm³ HILLEL, 2003. Une densité supérieure à 1,6 g/cm³ signale un problème de compactage.
- **Porosité** : Une porosité globale de 50%, comprenant au minimum 10% de macroporosité, est parfaite pour le passage de l'eau et de l'air REYNOLDS et al., 2008.

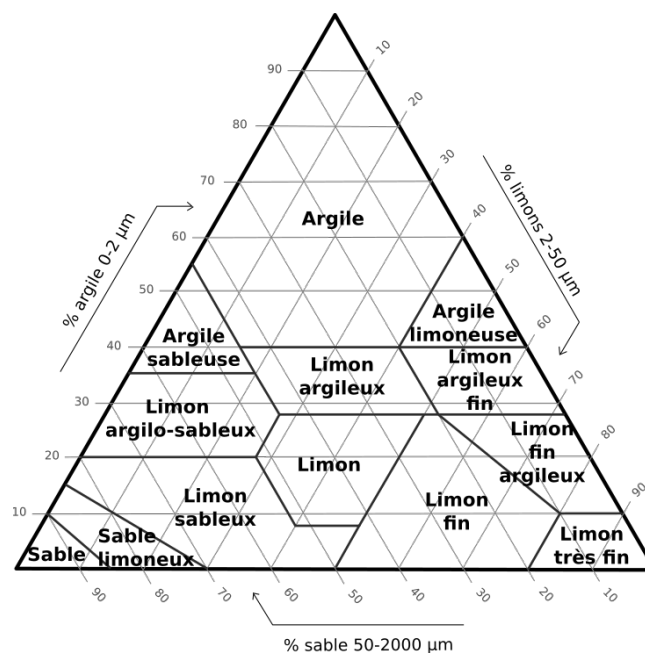


FIGURE 1.3 – Triangle des textures du sol[W2].

b) Indicateurs Chimiques

Ces paramètres illustrent la disponibilité des nutriments et les propriétés chimiques :

- **pH** : Un pH compris entre 6,0 et 7,5 est généralement préféré par la majorité des cultures. La toxicité de l'aluminium devient une source d'inquiétude lorsque le niveau est inférieur à 5,5 HAVLIN et al., 2016.
- **Matière organique** : Les sols destinés à l'agriculture devraient avoir une teneur minimale en matière organique de 2-3%. Chaque montée de 1% permet de retenir environ 30,000 litres d'eau par hectare HUDSON, 1994.
- **CEC** : Il est généralement souhaitable d'avoir une capacité d'échange cationique supérieure à 15 cmol+/kg. On constate fréquemment que la capacité d'échange cationique des sols sableux est inférieure à 5 cmol+/kg SUMNER et MILLER, 1996.
- **Nutriments** : Les seuils critiques diffèrent en fonction des cultures :
 - Azote : entre 20 et 50 mg/kg (NO₃-)
 - Phosphore : entre 15 et 30 mg/kg (Olsen P)
 - Potassium : 100 à 150 mg/kg (K échangeable)

c) Indicateurs Biologiques

La biologie active est le moteur des fonctions du sol :

- **Respiration des microbiennes** : Une respiration supérieure à 1 mg CO₂-C/g sol/jour témoigne d'une activité biologique intense ALEF et NANNIPIERI, 1995.
- **Biomasse microbienne** : En général, les sols en bonne santé renferment entre 100 et 300 µg de carbone microbien par gramme de sol BASTIDA et al., 2021.
- **Diversité biologique** : On considère qu'une densité supérieure à 15 vers de terre par mètre carré est idéale PÉRÈS et al., 2023.

1.2.3 Le rôle de la santé des sols dans l'agriculture durables

a) Cadre conceptuel et enjeux globaux

La santé des sols se profile comme un concept essentiel en agronomie moderne, regroupant à la fois les éléments physiques, chimiques et biologiques des écosystèmes du sol LEHMANN et al., 2020a. Des études récentes ont démontré une corrélation notable ($r = 0,78$, $p < 0,001$) entre les indices de santé du sol et la viabilité des systèmes de production BÜNEMANN et al., 2018. Cette évaluation est particulièrement pertinente dans le contexte actuel où :

- 33 % des sols mondiaux présentent des signes avancés de dégradation FAO, 2022.
- La perte annuelle de productivité atteint 1,4 % en zones dégradées LIANG et AL., 2022.
- Le potentiel de capture du carbone n'est pas pleinement exploité PAUSTIAN et al., 2019.

b) Mécanismes bio-physico-chimiques

Dynamique des nutriments : Les processus rhizosphériques ont une importance essentielle dans :

- La minéralisation du carbone organique ($k = 0,05-0,2 \text{ j}^{-1}$ en fonction de la qualité des substrats) PAUSCH et KUZUYAKOV, 2018
- La mobilisation du phosphore (amélioration de l'efficacité de 40 à 80 % grâce aux mycorhizes) S. E. SMITH et READ, 2010
- L'assimilation biologique de l'azote ($50-200 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ dans des systèmes diversifiés) VAN DER HEIJDEN et al., 2008

Propriétés physiques et résilience : Une augmentation de 1% de la matière organique engendre invariablement :

- Une progression de 3,7% de la capacité à retenir l'eau HUDSON, 1994
- Un abattement de l'érosion de 12,6 tonnes par hectare et par an MONTGOMERY, 2017
-

c) Avantages économiques et environnementaux

Pour les agriculteurs :

- Diminution des coûts de production (fertilisants, irrigation) PRETTY et al., 2018
- Accroître la résilience face aux aléas climatiques LIPPER et al., 2014
- Amélioration moyenne de 15-25% des rendements sur une période de 5 ans. PONISIO et EHRLICH, 2021

Pour l'environnement :

- Réduction de la pollution des eaux souterraines UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME, 2022
- Conservation de la biodiversité terrestre TSIAFOULI et al., 2023
- Participation à l'atténuation du réchauffement planétaire MASSON-DELMOTTE et al., 2019

1.3 Techniques de surveillance du sol traditionnelles vs intelligentes

Le suivi de la santé des sols a subi une transformation significative au fil des dernières décennies, évoluant d'approches traditionnelles fastidieuses vers des technologies intelligentes basées sur les données.

1.3.1 Techniques traditionnelles de surveillance des sols

Les méthodes traditionnelles s'appuient sur des études manuelles, sporadiques et fastidieuses, généralement effectuées en plusieurs phases (collecte, acheminement, examen en laboratoire). On les classe en quatre catégories majeures :

a) Échantillonnage manuel des sols

L'étape initiale des analyses classiques consiste à prélever manuellement des échantillons de sol en utilisant des outils tels que les tarières, les pelles ou les carottiers DORAN et PARKIN, 1994. Malgré sa facilité d'application, son faible coût et sa pertinence pour certaines analyses chimiques ou physiques (comme la mesure du pH ou la détermination de la teneur en nutriments), cette méthode a des limites significatives. Elle est effectivement sujette à un biais spatial dû au sous-échantillonnage, repose fortement sur le savoir-faire de l'opérateur pour la sélection des zones d'échantillonnage, et n'est pas en mesure de saisir les fluctuations dynamiques des paramètres du sol au fil du temps U.S. DEPARTMENT OF AGRICULTURE, 2017. Par exemple, les fluctuations rapides de l'humidité ou de l'activité biologique, critiques pour une gestion agricole réactive, ne sont pas quantifiables avec cette méthode ponctuelle et statique.

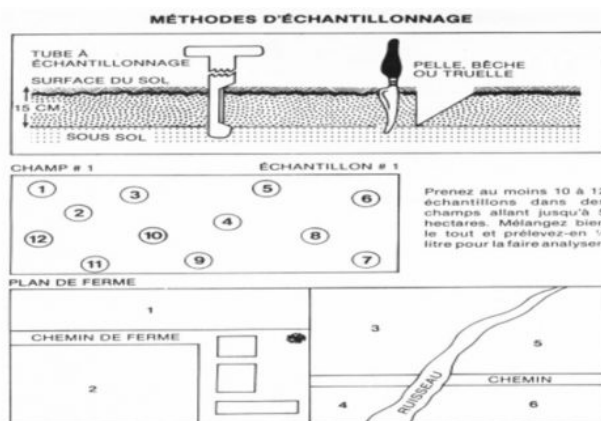


FIGURE 1.4 – Échantillonnage du sol par échantillons composites [W6]

b) Analyses chimiques en laboratoire

Les méthodes d'analyse chimique classiques des sols évaluent des éléments essentiels tels que le pH (à l'aide d'un pH-mètre électrochimique), les nutriments (azote N, phosphore P, potassium K) par spectrophotométrie – intégrant la technique Kjeldahl pour l'azote – ainsi que le carbone organique (COS) par oxydation chimique (procédé Walkley-Black) ou combustion à très haute température SPARKS et al., 2020. Ces méthodes, réputées pour leur grande précision et reproductibilité, se fondent sur des standards internationaux. FAO, 2023. Toutefois, ces

méthodes ont des contraintes significatives : des délais de traitement prolongés (allant de plusieurs jours à plusieurs semaines), l'anéantissement des échantillons, et des dépenses régulières associées aux fournitures et au travail manuel. Par exemple, on utilise la méthode Olsen pour l'analyse du phosphore OLSEN, 1954. ou l'examen des métaux lourds par ICP-OES HSEU, 2004, bien que strictes, ne conviennent guère pour un suivi dynamique ou à grande échelle. Malgré leur rigueur, elles ne sont pas très appropriées pour une surveillance dynamique ou à grande échelle.



FIGURE 1.5 – Analyse des sols en l'aboratoire[W7]

c) Évaluations physiques de la structure du sol

Les évaluations physiques classiques des sols se basent sur divers critères essentiels. La détermination de la texture, effectuée à l'aide du triangle de texture USDA, fait appel à la technique de l'hydromètre (Bouyoucos) pour mesurer les parts respectives de sable, limon et argile GEE et BAUDER, 1986. La densité apparente est mesurée en calculant le rapport masse/volume à l'aide d'un cylindre métallique BLAKE et HARTGE, 1986. Alors que la porosité est déterminée à partir de la densité apparente et de la densité intrinsèque des particules. L'évaluation de la capacité à retenir l'eau se fait par le biais de tensiomètres ou via la méthode de la plaque à pression, une technique précisée dans les protocoles relatifs à la conductivité hydraulique KLUTE et DIRKSEN, 1986. Ces critères offrent des informations essentielles pour saisir la perméabilité, le danger d'érosion ou la compaction des terres. Cependant, bien que ces approches soient rigoureuses, elles sont dévastatrices (exigeant des échantillonnages invasifs) et peu appropriées pour une surveillance régulière ou à grande envergure. Par ailleurs, leur application nécessite un matériel de laboratoire spécialisé, comme le rappellent les protocoles normalisés de Methods of Soil Analysis. GEE et BAUDER, 1986.

Evaluation visuelle de la structure du sol (VESS) (Oat et al., 2007; Indurkha et al., 2013; Agreste, 2013; Agreste, 2013; Agreste, 2013)

Qualité de la Structure	Taille et Apparence des Agrégats	Porosité Visible et Racines	Apparence après rupture : divers sols	Apparence après rupture : même sol, différents modes de travail du sol	Traite distinctifs	Apparence des fragments (naturels ou obtenus par rupture) de <1.5 cm de diamètre
Sq1 Facile Agrégats friables entre les doigts	La plupart des agrégats sont friables et se désintègrent facilement.	Très poreux. Les racines ont colonisé le sol.			Agrégats fins	L'action de briser le bloc est suffisante pour les obtenir. Les gros agrégats sont composés de plus petits, maintenus par les racines.
Sq2 Intact Agrégats se brisent facilement avec la main	Mélange d'agrégats poreux, amorphes de 2mm à 7mm. Aucune motte présente.	La plupart des agrégats sont poreux. Les racines colonisent entièrement le sol.			Fortes porosités des agrégats	Les agrégats obtenus sont amorphes, fragiles, se cassent très facilement et sont très poreux.
Sq3 Ferme La plupart des agrégats se brisent avec la main	Mélange d'agrégats poreux de 2mm à 10mm. Moins de 20% < 1mm. Présence possible de fragments angulaires non poreux (mottes).	Présence de macropores et de fissures. Présence de pores et de racines à l'intérieur des agrégats.			Faible porosité des agrégats	Les agrégats/fragments sont plutôt faciles à obtenir. Ils ont peu de pores visibles et sont amorphes. Les racines poussent habituellement à travers les agrégats.
Sq4 Compact Exige un gros effort pour briser les agrégats avec la main	Principalement mottes > 10 cm, sub-angulaires, non poreuses, moins de 20% < 1mm, structure lamellaire possible.	Peu de macropores et de fissures. Toutes les racines sont localisées dans les pores et autour des agrégats.			Macropores visibles	Les agrégats/fragments sont faciles à obtenir quand le sol est humide. Ils se présentent en cailloux avec des formes angulaires et des fissures internes.
Sq5 Très Compact Agrégats vraiment difficiles à briser	Principalement mottes angulaires et non poreuses > 10cm, très peu de fragments < 1cm.	Très faible porosité. Des macropores peuvent être discernables. Aucune racine possible. Peu de racines et localisées dans les fissures.			Craquelure grisâtre	Le sol peut être fragmenté lorsqu'il est humide, mais peut résister en effet important. Habituellement, pas de pores ou de fissures visibles à l'œil.

FIGURE 1.6 – Evaluation de la structure du sol [W8]

d) Méthodes biologiques traditionnelles

Les trois paramètres principaux des méthodes conventionnelles d'évaluation biologique des sols sont cruciaux. La méthode de fumigation-extraction est utilisée pour quantifier la biomasse microbienne, en mesurant le carbone microbien JENKINSON et POWLSON, 1976. L'activité métabolique, indiquée par la respiration du sol, est mesurée en laboratoire en utilisant des pièges à CO_2 , une méthode standardisée proposée par ANDERSON et DOMSCH, 1993. En fin de compte, l'analyse de la variété des lombrics, qui servent d'indicateurs de la qualité structurale, se fait par un comptage manuel suite à une extraction chimique ou physique EDWARDS et BOHLEN, 1996. Ces approches présentent des atouts significatifs : elles proposent des indicateurs directs de la fertilité et de l'activité biologique, cruciaux pour évaluer la santé du sol. Toutefois, elles ont des contraintes significatives, y compris leur technicité complexe (par exemple, les protocoles de fumigation), des temps d'analyse allongés (de quelques jours à plusieurs semaines) et une problématique pour l'extrapolation des résultats à une échelle plus large en raison de leur nature sporadique et dévastatrice EDWARDS et BOHLEN, 1996. En dépit de ces restrictions, elles demeurent des points de référence indispensables pour confirmer les technologies naissantes, mettant en évidence leur position centrale dans les recherches agronomiques passées et actuelles.

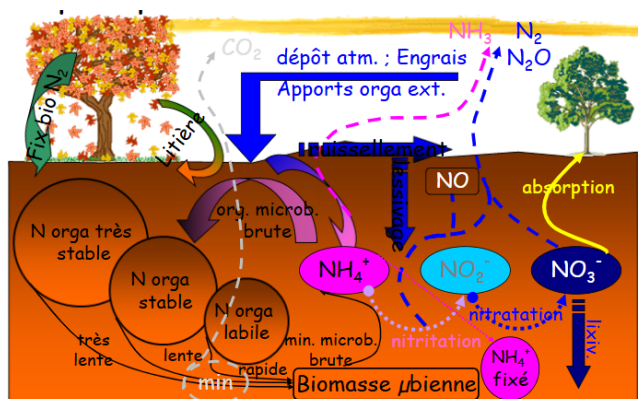


FIGURE 1.7 – Biomasse microbienne [W9]

e) Limites générales des méthodes traditionnelles

- **Limitation spatiale** : Les données ponctuelles ne reflètent pas la diversité spatiale des sols P. SMITH et al., 2018.
- **Délai de réponse** : Intervalle de temps entre la collecte d'échantillons et l'obtention des résultats (2 à 4 semaines pour les analyses chimiques).
- **Dépenses récurrentes** : Ressources humaines, matériel de laboratoire et fournitures FAO, 2023
- **Destructrices** : Altération des caractéristiques du sol lors des collectes (Bünemann et al., 2018).
- **Pas de données en temps réel** : Incapables de suivre les changements en temps réel (humidité, température) DORAN et ZEISS, 2000

Même si ces approches offrent des informations précises à un moment précis, elles sont consommatrices de temps, limitées en termes d'espace et peu propices à une surveillance en direct. P. SMITH et al., 2018 Par exemple, les méthodes traditionnelles ont du mal à capturer des paramètres dynamiques tels que la fluctuation de l'humidité ou l'activité microbienne à grande échelle BÜNEMANN et al., 2018.

1.3.2 Les techniques intelligentes de surveillance des sols

Les méthodes intelligentes de suivi du sol s'appuient sur l'intégration de technologies avancées (IoT, IA, capteurs, satellites) afin de recueillir, d'analyser et d'interpréter des données en temps réel. Plutôt que de recourir aux méthodes classiques, ces approches offrent une surveillance dynamique, exacte et évolutive, indispensable pour une gestion durable des sols face aux défis climatiques et agricoles FAO, 2023.

a) Capteurs IoT et Réseaux Sans Fil (WSNs)

Les capteurs IoT intégrés au sol permettent de suivre en temps réel des paramètres cruciaux tels que l'humidité, la température, la salinité, le pH ou les niveaux de nutriments (azote, phosphore, potassium). Ces appareils envoient les informations recueillies par le biais de protocoles de communication sans fil (LoRaWAN, NB-IoT) vers des plateformes en ligne, où elles sont conservées et examinées RAJALAKSHMI et al., 2020 SALAM et SHAH, 2022. Parmi les applications majeures, on trouve l'optimisation de l'irrigation – en adaptant les quantités d'eau en fonction des nécessités concrètes du sol – ainsi que la détection anticipée de menaces telles que la salinisation ou la pollution par des métaux lourds. Ces systèmes présentent une double résolution améliorée (spatiale et temporelle), dépassant les techniques traditionnelles contraintes par des échantillons ponctuels et des retards d'analyse en laboratoire. En outre, ils diminuent considérablement les dépenses opérationnelles associées aux analyses chimiques récurrentes, tout en promouvant une approche proactive de la gestion des sols BACCO et al., 2023.

b) Télédétection par Satellite et Drone

L'analyse de la réflectance du sol par la télédétection hyperspectrale et multispectrale, effectuée à l'aide de satellites (comme Sentinel-2) ou de drones munis de caméras infrarouges (NIR), permet d'établir des cartographies des indicateurs essentiels en matière de santé tels que le carbone organique (COS), l'érosion ou la compaction GOMEZ et al., 2019. Ces technologies permettent des applications importantes, telles que la cartographie du COS à l'échelle régionale et la détection des zones sensibles à la détérioration des sols, comme la diminution de fertilité ou la salinisation. Leurs atouts résident dans leur aptitude à couvrir de grandes surfaces (plusieurs milliers d'hectares) tout en identifiant des variations fines, indétectables avec des

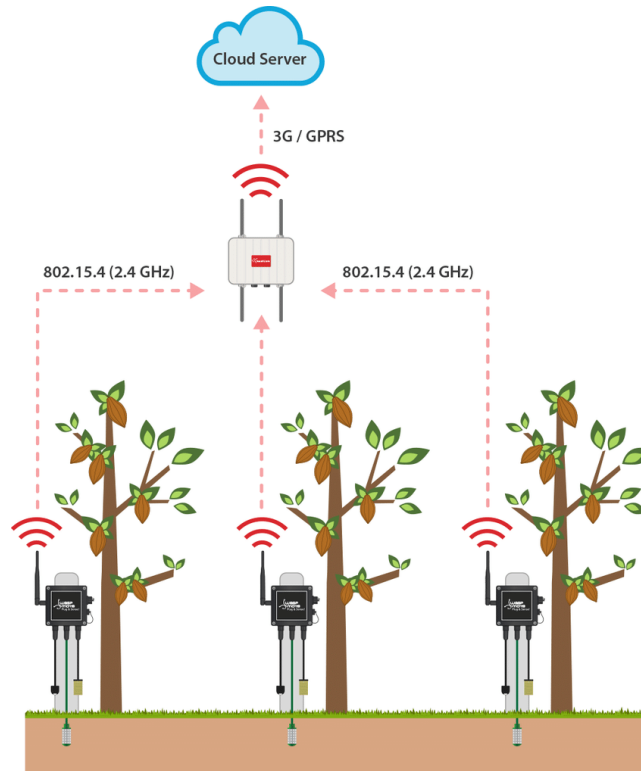
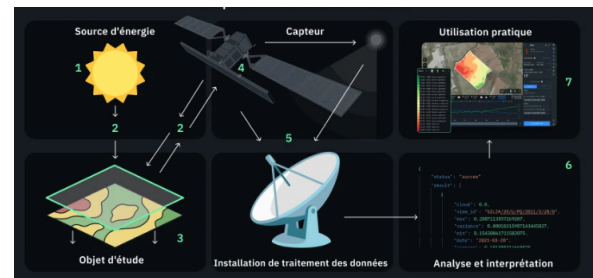


FIGURE 1.8 – Architecture d'un réseau de capteurs sans fil [W10]

techniques traditionnelles. Par exemple, les drones munis de capteurs hyperspectraux, associés à des algorithmes de traitement d'images, offrent une résolution spatiale élevée (atteignant jusqu'à 10 cm par pixel), parfaitement adaptée pour la surveillance localisée de la structure du sol VAHIDI et al., 2025. Ces méthodes non invasives se révèlent être des instruments indispensables pour une administration préventive et durable des écosystèmes agricoles.



(a) drone (W11)



(b) processus de détection (W13)

FIGURE 1.9 – Télédétection par Satellite et Drone

c) Modèles d'IA et Apprentissage Automatique

Les méthodes d'intelligence artificielle, y compris les réseaux de neurones et la régression logistique, sont essentielles pour l'analyse sophistiquée des sols en gérant les flux de données provenant des capteurs IoT et des satellites. Ces mécanismes prédisent des tendances essentielles, telles que la déplétion des nutriments (azote, phosphore) ou les exigences en eau des plantations, tout en produisant des suggestions agronomiques sur mesure (fertilisation, arrosage, rotations culturales). TZOUNIS et al., 2021 se distinguent par leurs applications majeures qui comprennent la prévision de la productivité agricole – liée à l'état du sol – ainsi que le classement automatisé

des différents types de sols (sableux, argileux) basé sur des données multispectrales. Ces modèles se caractérisent par leur faculté de mener des analyses prédictives adaptatives, s'ajustant en direct aux fluctuations climatiques ou aux techniques agricoles. L'intelligence artificielle, avec sa capacité à offrir des recommandations personnalisées et son automatisation grandissante, se positionne comme un élément clé dans le domaine de l'agriculture de précision et la gestion durable des sols.

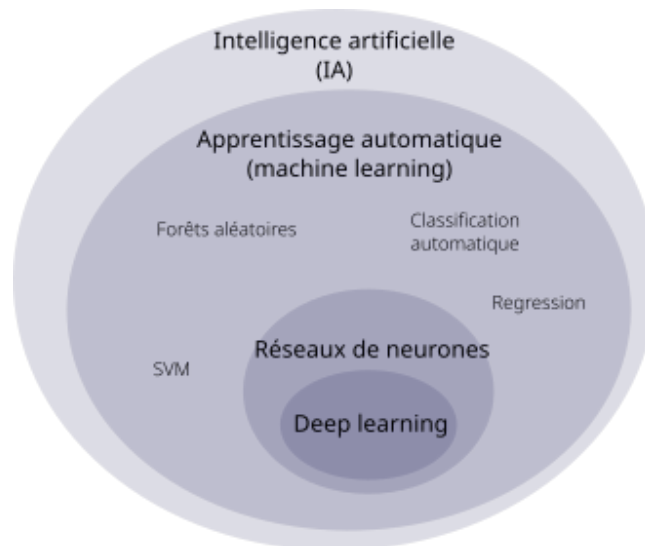


FIGURE 1.10 – Apprentissage automatique [W14]

d) Spectroscopie Proche Infrarouge (NIRS)

La spectroscopie dans l'infrarouge proche (NIRS) est une méthode astucieuse de contrôle des sols qui s'appuie sur un équipement mobile examinant la composition chimique du sol par l'intermédiaire de la réflexion de la lumière dans le spectre de l'infrarouge proche. Cette technique permet d'obtenir immédiatement des résultats, comme la concentration en matière organique ou l'existence de contaminants, sans avoir besoin de collecter des échantillons REYES et LIESS, 2023. Ses atouts majeurs sont sa portabilité, sa vitesse et son coût d'exploitation réduit, ce qui le positionne comme un instrument privilégié dans le domaine de l'agriculture de précision PAL et al., 2024. Ces avancées répondent à la demande grandissante de diagnostics non invasifs et financièrement abordables, contribuant ainsi à la pérennité des méthodes agricoles.

e) Robots Autonomes et Systèmes Autoguidés

Les robots autonomes équipés de capteurs et de bras mécaniques représentent une avancée majeure dans la surveillance intelligente des sols. Ces systèmes automatisés permettent à la fois de prélever des échantillons de sol avec une précision géolocalisée et d'appliquer des amendements ciblés, comme de la chaux pour corriger le pH ou des engrais organiques. Leur aptitude à fonctionner dans des terrains difficiles d'accès (pente raide, sol durci) ou à large échelle diminue considérablement la nécessité de l'intervention humaine, tout en limitant les perturbations du sol par le biais de mouvements optimisés et d'instruments non invasifs BAKKER et al., 2021.



FIGURE 1.11 – Robots autonomes [W15]

f) Blockchain pour la Traçabilité des Données

La blockchain se présente comme une technologie novatrice pour garantir et suivre l'historique des informations relatives à la santé des sols, comme les résultats d'analyses chimiques ou les actions agricoles (application d'engrais, rotation des cultures) KAMILARIS et al., 2023. Cette technologie, qui établit un registre numérique décentralisé et inaltérable, assure la transparence et l'intégrité des informations. Elle est particulièrement bénéfique pour valider des actions comme l'agriculture régénérative ou faciliter l'échange de données entre les agriculteurs, les organismes de certification et les gouvernements. Un autre atout majeur est l'établissement de marchés carbone basés sur la séquestration du CO_2 dans les sols : grâce à la blockchain, il est possible de prouver de manière fiable l'amélioration de la santé des sols et de transformer ces bénéfices en crédits carbone échangeables. Ces applications s'inscrivent dans une tendance globale qui cherche à concilier technologie et durabilité, un point mis en avant par les initiatives de l'UE en matière de traçabilité agricole KAMILARIS et al., 2023.



FIGURE 1.12 – L'utilisation de la blockchain [W16]

1.4 Internet des objets dans l'agriculture de précision

L'IoT (Internet des Objets) représente une percée significative dans l'agriculture de précision, autorisant un suivi détaillé des facteurs pédologiques via des réseaux de capteurs connectés

BOURSIANIS et ET AL., 2023. Cette solution répond à une exigence de durabilité : d'après l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS (FAO), 2021, un tiers des sols de la planète sont détériorés, ce qui nécessite des instruments novateurs pour leur réhabilitation. Une partie des sols de la planète sont détériorés, ce qui nécessite l'usage d'instruments novateurs pour leur réhabilitation. L'IoT propose une stratégie globale en alliant la collecte de données sur site, l'analyse prédictive et les actions spécifiques, conformément aux buts du développement durable NATIONS UNIES, 2019.

1.4.1 Architecture technologique de l'IoT pour la santé des sols

a) Couche physique

Les capteurs IoT contemporains incorporent des technologies de pointe pour une métrologie précise :

- **Spectrométrie dans le proche infrarouge (NIRS)** : Évaluation non destructive des nutriments (C, N, P) avec une exactitude de ± 5 % V. ADAMCHUK et al., 2023.
- **Capteurs à capacitance multifréquence** : Suivi de l'humidité volumique (θ_v) et de la conductivité électrique (EC) à diverses profondeurs (0–60 cm) N. ZHANG et al., 2023.
- **Micro-électrodes pH-ISFET** : Mesure en direct du niveau d'acidité (précision : $\pm 0,1$ pH) malgré les interférences ioniques. CORNEO et al., 2023

b) Couche réseau

Les protocoles LPWAN prédominent dans les zones rurales grâce à leur large portée (jusqu'à 15 km) et à leur faible consommation d'énergie (maximum 50 mW) MEKKI et al., 2023 Toutefois, des recherches récentes mettent en évidence certaines contraintes liées à la vitesse de transmission des données (≤ 50 kbps), ce qui requiert un perfectionnement des algorithmes de compression KHAN et al., 2022

c) Couche analytique

- **Edge Computing** : Traitement préliminaire des données sur de petits contrôleurs (comme le Raspberry Pi) afin de minimiser la latence à moins de 100 ms NAVARRO et al., 2022.
- **Modèles hybrides IA-IoT** : Fusion de réseaux convolutifs (CNN) pour l'analyse d'images (drones) et de régression logistique pour estimer la densité des sols ($R^2 = 0,89$) PATIL et al., 2021.

1.4.2 Avantages socio-économiques et limites critiques

L'application des systèmes IoT pour la surveillance des sols apporte d'importants bénéfices économiques et environnementaux. Une étude de rentabilité montre un taux de retour sur investissement (ROI) moyen de 140 % sur une période de dix ans pour les exploitations dépassant les 50 hectares, mettant en évidence leur rentabilité à grande échelle N. ZHANG et al., 2023. D'un point de vue environnemental, ces technologies permettent de diminuer les émissions de protoxyde d'azote (N_2O) de 15 à 30 % grâce à une fertilisation azotée améliorée, conforme aux besoins agronomiques FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS (FAO), 2021. Toutefois, divers obstacles freinent leur mise en œuvre à l'échelle mondiale. Il a été constaté une dérive métrologique des capteurs de pH suite à six mois d'exposition aux sols argileux, ce qui a entraîné un décalage systématique de +0,3 unité pH CORNEO et al., 2023. De

plus, l'utilisation inégale de ces technologies demeure : en Afrique subsaharienne, seulement 12 % des petits agriculteurs (moins de 5 ha) sont en mesure de les employer, à cause de leur coût initial exorbitant BANQUE MONDIALE, 2023. Finalement, des failles critiques en matière de cybersécurité comme les attaques d'injection SQL touchent 38 % des plateformes agricoles IoT, mettant en péril la fiabilité des systèmes EUROPEAN UNION AGENCY FOR CYBERSECURITY (ENISA), 2022. Ces contraintes nécessitent des avancées technologiques spécifiques et l'adoption de politiques d'inclusion numérique.

1.4.3 Études de cas émergentes

a) Projet IoT4Soil (UE, 2023) :

Mise en place de 10 000 détecteurs LoRaWAN en Europe afin de modéliser la séquestration du carbone, avec un but de 4‰ par an.



FIGURE 1.13 – projet IoT soil [W17].

b) Systèmes autonomes à source d'énergie hétérogène :

Capteurs alimentés de manière autonome par l'énergie solaire et le recyclage de l'énergie piézoélectrique (efficacité : 85 %), éprouvés dans des conditions sèches SENSOTERRA, 2023.



FIGURE 1.14 – systèmes énergétiques autonomes [W18].

1.5 Systèmes existants et solutions technologiques

Les systèmes intelligents en agriculture intègrent des technologies comme les capteurs, la télédétection et l'IA pour collecter et analyser des données en temps réel, optimisant ainsi la

gestion des sols et des ressources N. ZHANG et al., 2023. Ces instruments augmentent les productivités tout en diminuant les dépenses et l'effet sur l'environnement FAO, 2022. Toutefois, l'adoption de ces technologies présente des défis, notamment en ce qui concerne l'accessibilité et la gestion des données GOMEZ et al., 2023a

1.5.1 Systèmes de surveillance du sol en temps réel

Les dispositifs avancés de suivi du sol offrent une surveillance constante de critères essentiels comme l'humidité, la chaleur ou le pH à travers des capteurs reliés en direct, ce qui facilite la modification dynamique des méthodes agricoles FAN et al., 2022. Parmi les options mises en œuvre, on trouve :

a) Stations météorologiques agricoles (Davis Vantage Pro2, Pessl iMETOS)

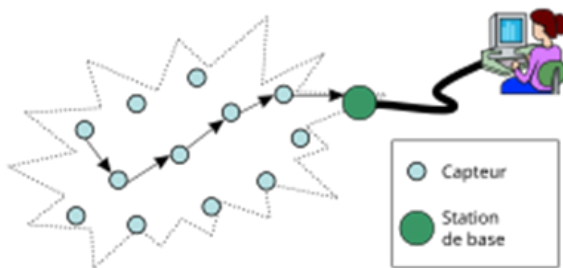
qui intègrent des capteurs pédoclimatiques pour optimiser l'irrigation et la fertilisation via des données hyperlocales BAUER et al., 2022



FIGURE 1.15 – station météo vantage pro2

b) Réseaux de capteurs sans fil (WSN)

Déployés sur le terrain pour transmettre des indices pédologiques à des plateformes éloignées grâce à des applications mobiles GOMEZ et al., 2023b.



(a) réseau sans fil (W19)



(b) généré un réseaux de capteurs sans fil

FIGURE 1.16 – Réseaux de capteurs sans fil

c) Systèmes IoT connectés au cloud

L'acquisition de données combinée à l'analyse avancée pour une gestion agroenvironnementale prédictive FAO, 2022.



FIGURE 1.17 – Drones [W20]

Ces technologies renforcent la résilience des opérations, cependant leur performance est conditionnée par la fiabilité des capteurs et l'interopérabilité des systèmes PATEL et al., 2023.



FIGURE 1.18 – LPWAN et IoT [W21]

1.5.2 Systèmes de télédétection et d'analyse avancée

Les capteurs montés sur des drones ou des satellites permettent une observation sans intrusion des sols et des cultures grâce aux technologies de télédétection. Elles offrent des informations spatialement référencées cruciales pour une agriculture de précision. X. ZHANG et al., 2022

a) Imagerie multispectrale et hyperspectrale

Les capteurs installés sur des satellites (tels que Sentinel-2 et Landsat 9) ou des drones recueillent des données dans différentes gammes spectrales (de la lumière visible à l'infrarouge proche), ce qui permet d'estimer divers paramètres de la vitalité des sols et des cultures. Par exemple, l'indice NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) fournit des informations sur la biomasse végétale, alors que le SMI (Soil Moisture Index) mesure le taux d'humidité du sol. WEISS et al., 2020



FIGURE 1.19 – satellite Sentinel-2 [W22]

b) Cartographie de la variabilité du sol par GPS et SIG

Les systèmes RTK GPS (Kinematics en temps réel), qui offrent une précision au niveau du centimètre, donnent la possibilité de créer des cartes détaillées de la conductivité électrique du sol (ECa), mettant ainsi en lumière sa variabilité spatiale. V. I. ADAMCHUK et al., 2021. Ces informations sont par la suite intégrées dans des systèmes d'information géographique (SIG) comme QGIS ou ArcGIS, où elles sont fusionnées avec des modèles pédologiques afin d'effectuer un zoning précis des parcelles agricoles. BREVIK et al., 2020. Cette méthode offre une optimisation précise des apports en intrants (fertilisants, arrosage), spécifiquement ajustée aux

exigences de chaque zone déterminée, contribuant donc à une gestion optimisée des ressources tout en augmentant les rendements PIERCE et NOWAK, 2022.

c) Capteurs de spectroscopie du sol (NIR)

La spectroscopie dans l'infrarouge proche (900-2500 nm) offre une caractérisation rapide et non destructive des principales caractéristiques du sol, comme la matière organique, la texture et l'humidité, par le biais de l'étude des signatures spectrales spécifiques WAN et al., 2020. Les avancées technologiques récentes ont entraîné la réduction de taille des systèmes d'analyse, grâce à l'émergence de capteurs portables capables de délivrer des mesures sur le terrain avec une précision acceptable SHADDAD et al., 2023.

L'association de l'intelligence artificielle avec les données spectrales permet désormais d'effectuer des prévisions précises sur la fertilité des sols et de produire des conseils agronomiques sur mesure EITELWEIN et al., 2022. Cette méthode fusionnée offre des opportunités significatives pour le diagnostic des sols, tout en diminuant la dépendance vis-à-vis des techniques d'analyse conventionnelles.



FIGURE 1.20 – les capteurs portables de types Agrocares [W23]

1.5.3 Systèmes autonomes et robotiques

Les progrès récents en matière de robotique et de systèmes autonomes ont transformé radicalement la surveillance et la gestion des terres agricoles. Ces innovations comprennent des drones et des robots capables de réaliser des tâches sophistiquées comme l'analyse du sol, la création de cartes haute définition et le prélèvement d'échantillons automatisé, diminuant ainsi la nécessité d'une intervention humaine. LOCHAN et al., 2024

a) Drones agricoles

Les drones équipés de capteurs multispectraux et thermiques sont largement utilisés pour évaluer la santé des sols et des cultures. Par exemple, des modèles commerciaux tels que le DJI Agras ou le Parrot Bluegrass sont capables de cartographier l'humidité du sol, de repérer les déficits en nutriments (azote, phosphore) et d'identifier les stress hydriques à travers des indices

comme le NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) TORRES-SÁNCHEZ et al., 2015. Une recherche récente a prouvé leur capacité à prédire les rendements avec une exactitude de $\pm 5\%$ MATESE et DI GENNARO, 2021.



(a) DJI Agras (W25)



(b) Parrot Bluegrass (W24)

FIGURE 1.21 – Drones Agricoles

b) Robots autonomes pour sols

Des robots de terrain comme le FarmBot ou le RIPPA (Robot for Intelligent Perception and Precision Application) permettent d'automatiser l'échantillonnage et l'analyse des sols sur site. Selon KITIĆ et al., 2022, ces dispositifs font appel à des capteurs de pH, de conductivité électrique (EC) et à des spectromètres portables afin de fournir des informations instantanées. Un exemple pertinent est leur mise en œuvre dans les vignobles de Californie afin d'améliorer l'irrigation et de diminuer l'utilisation d'engrais de 20% GONZALEZ-DE-SANTOS et al., 2020.



(a) Robot FramBot (W26)



(b) Robot RIPPA (W30)

FIGURE 1.22 – Robots autonomes

1.5.4 Systèmes d'aide à la décision (DSS - Decision Support Systems)

Les systèmes d'aide à la décision (DSS) incorporent des algorithmes d'intelligence artificielle, des modèles de prédiction et l'analyse de données massives afin d'optimiser les méthodes agricoles. Ces dispositifs offrent des conseils sur mesure concernant l'irrigation, la fertilisation et la défense des cultures, en se basant sur des données provenant de diverses sources (capteurs IoT, satellites, drones) ainsi que les conditions pédoclimatiques locales LOBELL et al., 2015. L'adoption de ces pratiques favorise une agriculture de précision plus durable, en minimisant l'emploi d'intrants et en maximisant les productions KAMILARIS et al., 2017.

a) Plateformes intelligentes basées sur l'IA

Des algorithmes sophistiqués de l'apprentissage automatique sont employés par des plateformes d'agriculture numérique comme Climate FieldView (créée par The Climate Corporation) et Ag Leader pour analyser des données agronomiques multidimensionnelles, y compris la teneur en humidité du sol, la santé des cultures et les facteurs pédoclimatiques. Ceci leur permet d'élaborer des cartes de prescription agricole en temps quasi-réel SCHIMMELPFENNIG, 2016. Ces dispositifs fusionnent des données satellitaires, des mesures sur le terrain via des capteurs et des archives de productivité afin de produire des recommandations spécifiques pour la fertilisation différenciée, ce qui optimise l'usage des intrants. Des études empiriques montrent que cette méthode conduit à une baisse significative des dépenses d'engrais, environ 15 à 20%, tout en préservant - voire en augmentant - les niveaux de productivité agricole BASSO et ANTLE, 2020.



(a) Climate FieldView (W28)



(b) Ag Leader (W61)

FIGURE 1.23 – Plateformes intelligentes basées sur l'IA

b) Applications mobiles pour l'agriculture de précision

Les applications mobiles associées à des réseaux de capteurs IoT tels que FarmX ou Cropio représentent des solutions novatrices pour le suivi en temps réel de paramètres agronomiques essentiels, comme le stress hydrique et les infestations pathogènes, ce qui facilite des actions ciblées ANTONY et al., 2020. Ces solutions incorporent généralement des capteurs peu coûteux et des algorithmes d'intelligence artificielle afin d'améliorer les méthodes de culture. Pour illustrer,

la plateforme FarmX a montré, dans des conditions réelles, une diminution de 30% de l'utilisation d'eau en maraîchage grâce à son système d'irrigation contrôlé par IA ANTONY et al., 2020. Une méta-analyse récente souligne l'effet bénéfique de ces technologies sur la mise en œuvre de pratiques agricoles durables, surtout chez les petits producteurs, grâce à une amélioration notable de l'efficacité des intrants MENDES et al., 2020.

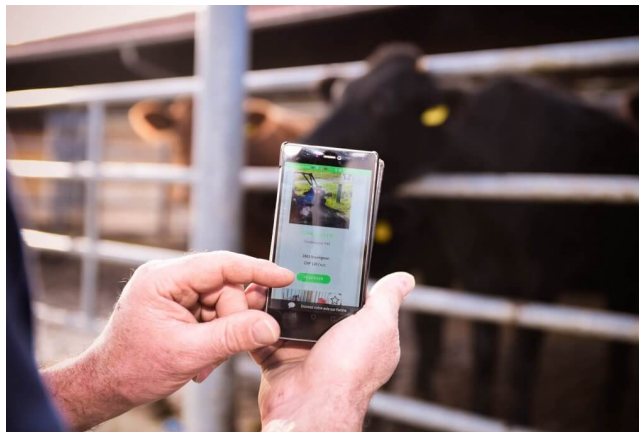


FIGURE 1.24 – FarmX [W29]

1.6 Limite de la recherche actuelle et les problèmes ouverts

La surveillance intelligente de la santé des sols (Smart Soil Health Monitoring - S-SHM) est un domaine en pleine expansion, intégrant des technologies avancées telles que l'Internet des Objets (IoT), l'intelligence artificielle (IA), et la télédétection pour évaluer et préserver la qualité des sols. Cependant, malgré les progrès récents, plusieurs lacunes persistent dans la recherche, limitant l'efficacité et l'adoption à grande échelle de ces systèmes LEHMANN et al., 2020b.

1.6.1 Absence d'une Approche Multi-Capteurs Intégrée

L'approche actuelle de surveillance des sols est fragmentée, souvent axée sur des indicateurs spécifiques (comme l'humidité, la température ou le pH), plutôt que sur une évaluation globale de la santé du sol. Comme l'indiquent V. I. ADAMCHUK et al., 2004, la majorité des équipements commerciaux se restreignent à évaluer un ou deux paramètres à la fois, engendrant ainsi des silos de données non compatibles BWAMBALE et al., 2022. confirment cette fragmentation en notant que seulement 23 % des plateformes IoT agricoles assurent une intégration authentique de données multi-capteurs. Selon le rapport de FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS (FAO), 2021 concernant l'agriculture numérique, ce déficit d'interopérabilité est clairement décelé comme un obstacle significatif à l'élaboration de solutions intégrales, forçant les agriculteurs à mettre en place plusieurs systèmes séparés, ce qui accroît les dépenses et rend la maintenance plus complexe.

1.6.2 Détection inefficace des bioagresseurs souterrains

La surveillance des insectes et micro-organismes souterrains représente un enjeu technologique crucial dans le domaine agricole, ces bioagresseurs ayant la capacité de provoquer d'importantes diminutions de rendement avant même leur identification. Comme l'ont révélé MANKIN et al., 2021 dans leur recherche sur les méthodes de surveillance acoustique des

insectes du sol , les techniques conventionnelles comme les pièges chimiques ou l’observation manuelle souffrent de limitations significatives en termes d’invasivité et de précision. Selon une recherche récente menée par POTAMITIS et al., 2018, les larves de taupins (*Agriotes* spp.), qui peuvent causer des pertes allant jusqu’à 30% dans les cultures céréalières, échappent souvent aux techniques de détection conventionnelles.

1.6.3 Dépendance énergétique limitant le déploiement

L’indépendance énergétique des appareils IoT dans les zones rurales constitue toujours un enjeu majeur, comme le souligne une recherche de BU et WANG, 2019 qui a démontré que 65 % des initiatives pilotes ont échoué dues à l’insuffisance des systèmes d’approvisionnement en énergie. Même si les solutions hybrides (panneaux solaires + batteries) mises en avant par KAMILARIS et al., 2017 montrent des promesses intéressantes, leur performance dans des conditions météorologiques changeantes n’a pas été suffisamment confirmée.

1.6.4 Manque de solutions LoRaWAN optimisées pour l’agriculture

Malgré les avantages théoriques de la technologie LoRaWAN pour le suivi agricole (grande portée, faible consommation d’énergie), son utilisation concrète dans le domaine des sols demeure restreinte. JAWAD et al., 2017 notent que la plupart des installations actuelles se focalisent uniquement sur l’évaluation de l’humidité du sol, omettant d’autres facteurs agronomiques cruciaux. CAMARILLO-ESCOBEDO et al., 2022 confirment cette contrainte en mettant l’accent sur le manque de protocoles spécialisés pour les transmissions multi-capteurs hétérogènes, ce qui cause des soucis de latence et de fiabilité dans des contextes agricoles concrets.

1.7 Conclusion

Cette première partie a établi les bases théoriques et techniques en rapport avec la santé des sols et les approches contemporaines de suivi agricole. Nous avons examiné l’importance de la préservation des sols pour une agriculture durable, mis en contraste les méthodes conventionnelles et les stratégies intelligentes, et étudié l’implication de l’Internet des Objets (IoT) et de l’Intelligence Artificielle (IA) dans le cadre de l’agriculture précise. Pour finir, nous avons évalué les technologies existantes et repéré les insuffisances dans la recherche actuelle, y compris l’intégration optimale des capteurs, la solidité des modèles d’IA et la gestion efficace des données. Ces obstacles permettent de suggérer un nouveau système perfectionné, dont les caractéristiques techniques et la structure seront décrites dans le prochain chapitre.

Chapitre 2 : Exigences et architecture du système

2.1 Introduction

Les principes établies dans le chapitre précédent ont mis en lumière l'importance cruciale de la santé des sols pour une agriculture pérenne, tout en exposant les contraintes des techniques de suivi classiques face aux enjeux environnementaux actuels. Nous avons examiné la capacité révolutionnaire de l'Internet des Objets et de l'Intelligence Artificielle, décelant des insuffisances durables en matière d'intégration des capteurs, de solidité des modèles prédictifs et de gestion efficiente des flux de données agro-environnementales.

Ce chapitre expose l'architecture globale du système, en mettant en avant un cadre méthodologique qui allie conception matérielle et intelligence algorithmique, face à ces défis. Nous établissons d'abord les exigences essentielles assurant la fiabilité opérationnelle sur le terrain. Ensuite, nous orchestrans une synergie entre les systèmes physiques et les processus logiciels, depuis l'acquisition robuste de données jusqu'à leur conversion en recommandations exploitables. L'accent est mis sur la capacité d'adaptation aux conditions agricoles complexes, la solidité des flux de données, et l'amélioration des systèmes décisionnels.

En combinant innovation technologique et sens du pragmatisme, cette approche pose les fondations d'une plateforme évolutive susceptible de dépasser les contraintes existantes. Elle met en place un système où les capteurs, les infrastructures cloud et les modèles d'IA se rejoignent pour fournir aux agriculteurs une perspective anticipée de la santé des sols.

2.2 Exigences fonctionnelles et non-fonctionnelles

2.2.1 Exigences fonctionnelles

a) Collecte multi-capteurs

- Paramètres du sol (température, humidité, pH, CE, nutriments).
- Conditions environnementales (température/humidité de l'air, luminosité).
- Activité des insectes (surface et sous-sol via capteurs de mouvement/vibrations).

b) Transmission des données

Transmettre les informations grâce à LoRaWAN vers un serveur éloigné, même dans des régions rurales dépourvues de réseau traditionnel.

c) Analyse par IA

- Évaluer la santé du sol (ex. : carences en nutriments).
- Prédire les risques (ex. : sécheresse, infestation d'insectes).

- Générer des recommandations personnalisées (ex. : dosage d’engrais, irrigation).

c) Interface utilisateur :

- Afficher les données brutes et les insights en temps réel.
- Informer l’agriculteur en cas de situation problématique (par exemple : pH trop acide, infestation identifiée).

2.2.2 Exigences non fonctionnelles

a) Autonomie énergétique :

Fonctionner de manière continue grâce au panneau solaire et à la batterie, même en cas de faible luminosité.

b) Fiabilité :

- - Être capable de supporter les conditions environnementales (humidité, poussière, températures extrêmes).
- Garantir une communication LoRaWAN fiable avec un taux de perte de données inférieur à 5%.

c) Sécurité des données :

Crypter les données envoyées afin d’éviter les interceptions malveillantes.

d) Évolutivité :

Autoriser l’intégration de nouveaux capteurs ou l’expansion vers plusieurs terrains agricoles.

e) Facilité d’utilisation :

- Interface conviviale, utilisable par les agriculteurs sans expertise technique.
- Alertes précises et mesures conseillées distinctes (par exemple : « Intégrer 10 kg d’engrais azoté »).

f) Performance du modèle IA :

- Pour la détection d’anomalies (par exemple : déficiences, insectes), une précision minimale de 90% est requise.
- Le délai d’inférence est inférieur à 2 secondes pour des suggestions en direct.

2.3 Aperçu du système

TerraSense est une plateforme IoT astucieuse axée sur la surveillance agricole, conçue pour fournir aux agriculteurs une solution intégrée, autonome et en temps réel pour analyser et optimiser les conditions agronomiques de leurs terres. Ce système fusionne une structure matérielle (capteurs, modules de communication, alimentation électrique) et logicielle (traitement des informations, intelligence artificielle, interface utilisateur) pour rassembler, analyser et comprendre les données du terrain, tout en produisant des conseils exploitables.

2.3.1 Principaux objectifs

- Observation en direct des paramètres clés du sol (humidité, température, pH, nutriments, etc.) et de l'écosystème environnant (niveau de luminosité, détection d'insectes).
- Prédiction basée sur un modèle d'IA pour prévoir les exigences du sol (par exemple : manque de nutriments, danger de sécheresse).
- Une interface conviviale qui permet aux agriculteurs de consulter les données et de bénéficier d'alertes ou de recommandations sur mesure.

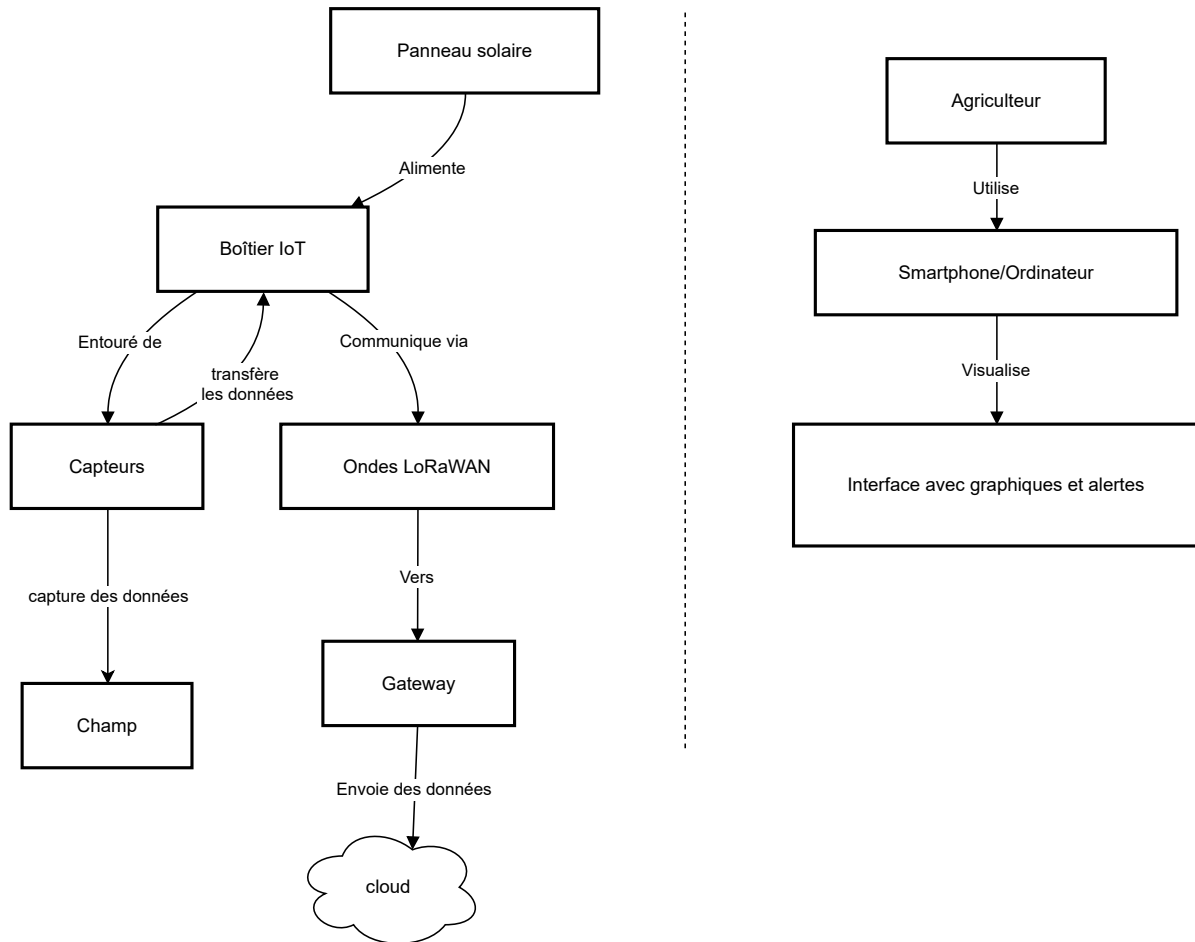


FIGURE 2.3 – Diagramme de flux de données [W31]

2.3.2 Composants matériels

Le sous-système matériel est le pilier physique du projet, ce dernier intègre tous les composants électroniques requis pour recueillir les données environnementales, garantir l'indépendance énergétique et acheminer les informations vers le cloud.

a) Module de capteurs

Il inclut divers capteurs pour évaluer les caractéristiques du sol et de l'environnement

- **Température et humidité de l'air (ex : DHT22) :** Mesurent les conditions atmosphériques pour évaluer l'évapotranspiration et l'impact climatique sur le sol.



FIGURE 2.4 – Capteur DHT22 [W32]

- **Capteur de lumière (ex : BH1750)** : Évalue l'exposition solaire, cruciale pour la photosynthèse et la gestion des cultures.

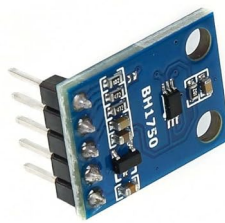


FIGURE 2.5 – Capteur BH1750 [W33]

- **Humidité du sol (ex : YL-69)** : Mesurent les conditions atmosphériques pour évaluer l'évapotranspiration et l'impact climatique sur le sol.

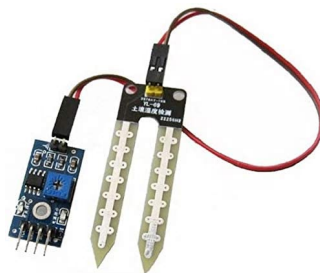


FIGURE 2.6 – Capteur d'humidité [W34]

- **Température du sol (ex : DS18B20)** : Surveille les variations thermiques affectant la croissance des racines.



FIGURE 2.7 – Capteur de température [W35]

- **pH du sol (ex : Sonde pH analogique)** : Identifie l'acidité ou l'alcalinité, essentielle pour l'absorption des nutriments.



FIGURE 2.8 – Capteur PH [W36]

- **Conductivité électrique (CE)** (ex : **Capteur EC**) Évalue la salinité et la concentration en minéraux du sol.



FIGURE 2.9 – Capteur de CE [W37]

- **Capteur de nutriments (NPK)** : Mesure les niveaux d'azote (N), phosphore (P) et potassium (K) pour ajuster les engrais.



FIGURE 2.10 – Capteur de nutriments [W38]

- **Capteur de mouvement (PIR)** : Identifie les insectes en surface (comme les criquets) grâce à des changements de mouvement ou à des images infrarouges.



FIGURE 2.11 – Capteur PIR [W39]

- **Capteur de vibration (ex : SW-420)** : Identifie les insectes souterrains (ex : vers) en analysant les vibrations du sol.

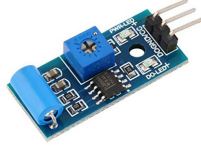


FIGURE 2.12 – Capteur SW-420 [W40]

b) Module de communication

Le module LoRaWAN garantit une diffusion à longue distance (pouvant atteindre 10 km en milieu rural) tout en maintenant un faible usage d'énergie, parfait pour les régions agricoles éloignées. Il peut s'adapter aisément aux infrastructures en place grâce à sa compatibilité avec des réseaux IoT spécialisés dans l'agriculture, tels que The Things Network. Les informations recueillies par les capteurs sont transmises à une passerelle LoRa de proximité, qui les transmet ensuite à une plateforme en nuage pour stockage, analyse et production de prévisions.



FIGURE 2.13 – Module lora
[W41]

c) Alimentation

Panneau solaire : Produit de l'énergie dans les zones rurales pour assurer un fonctionnement continu du système.



FIGURE 2.14 – Panneau Solaire [W42]

Batterie rechargeable : Accumule l'énergie solaire pour garantir une opération continue 24h/24. La capacité peut être ajustée aux cycles de mesure (par exemple : batterie de 5200mAh offrant une durée de vie de 3 à 5 jours sans exposition au soleil).



FIGURE 2.15 – Batterie Lipo [W43]

Circuit de gestion de l'alimentation : Garantit l'équilibre énergétique du système en contrôlant la tension délivrée par la batterie et le panneau solaire, tout en prévenant les composants contre les excès de charge, les décharges excessives et les fluctuations de courant. Il comprend aussi un convertisseur DC-DC pour ajuster la tension aux besoins particuliers des capteurs (comme 3.3V ou 5V) et du microcontrôleur, assurant par conséquent une opération fluide et sécurisée de tous les appareils électroniques.

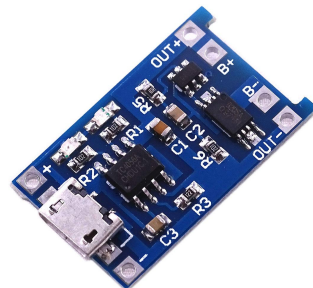


FIGURE 2.16 – Circuit de gestion de l'alimentation [W44]

d) Microcontrôleur

L'ESP32 agit comme le cerveau du système, assurant la collecte des données via ses interfaces ADC, I2C et SPI pour connecter les capteurs analogiques et numériques. Il prétraite les données en temps réel (moyennage, filtrage du bruit) pour améliorer leur fiabilité, puis planifie leur transmission périodique (ex : toutes les 3 minutes). Grâce à son mode veille profond, il réduit drastiquement la consommation énergétique (moins de 10 μ A en veille), optimisant l'autonomie de la batterie en milieu agricole.

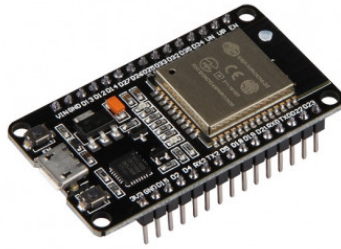


FIGURE 2.17 – Esp32 [W45]

e) Boîtier et structure physique

Le boîtier, réalisée sur mesure grâce à une impression 3D (à l'aide d'une imprimante Creality) utilisant un filament noir renforcé, propose une option légère et adaptée pour accueillir les éléments. Malgré l'absence de certification IP67, son design étanche amélioré (parois épaisses, joints en caoutchouc intégrés aux ouvertures, traitement de surface anti-humidité) défend contre les projections d'eau, la poussière et les fluctuations modérées de température. La structure, fixée sur des supports 3D, allie solidité mécanique et flexibilité d'adaptation aux terrains agricoles. Une configuration modulaire permet un accès facile aux composants (par exemple : remplacement de capteurs, mise à jour de l'ESP32), tandis que le choix du filament noir assure une protection contre les rayons UV et une invisibilité visuelle dans les champs.

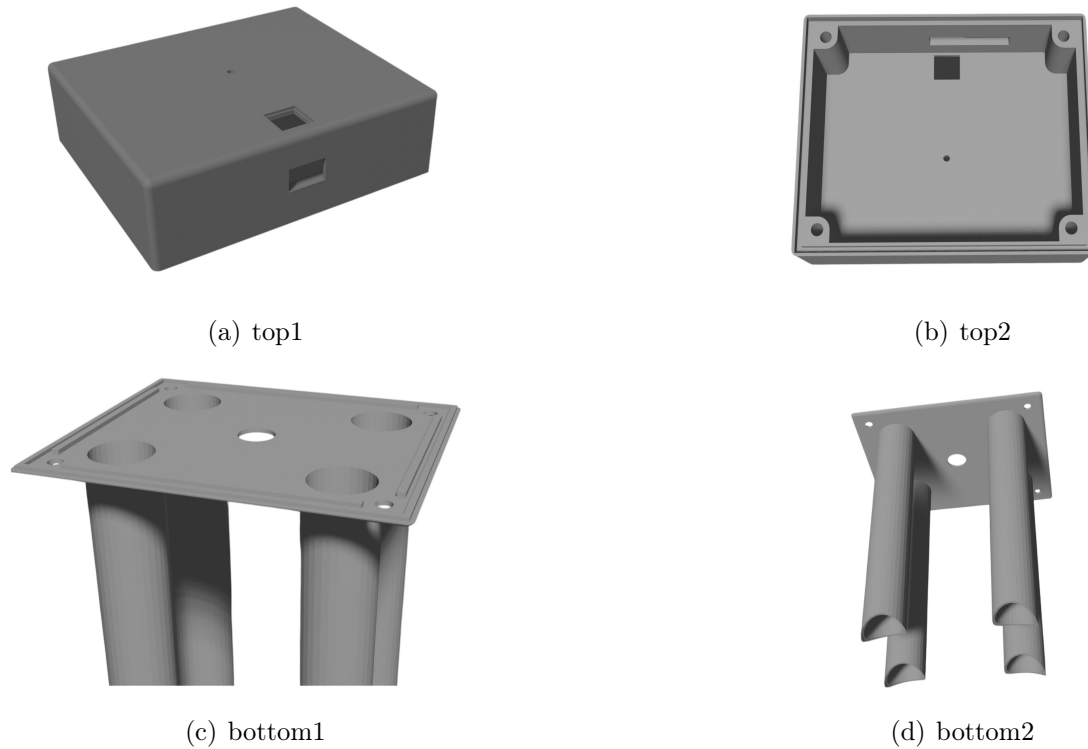


FIGURE 2.18 – Le boîtier

2.3.3 Composants logiciels

Le sous-système logiciel s'appuie sur un ensemble d'outils de développement, de langages de programmation et de bibliothèques spécialisées pour combler les exigences du système.

a) Environnements de développement

Google Colab : aussi connu sous le nom de Google Collaboratory, est un environnement de développement interactif en ligne offert sans frais par Google. Ceci nous donne la possibilité de rédiger, d'exécuter et de diffuser du code Python directement via le navigateur web, sans nécessité d'installer quoi que ce soit sur la machine.

Jupyter Notebook : C'est un environnement de développement interactif que l'on peut utiliser via un navigateur web. Il offre la possibilité de rédiger et d'exécuter du code (principalement en Python), tout en incorporant des visualisations, des explications textuelles et des équations mathématiques. Souvent employé pour l'analyse de données, le traitement des capteurs et l'intelligence artificielle, il favorise le prototypage ainsi que la présentation explicite des résultats.

Arduino IDE : C'est un programme gratuit qui facilite la programmation de cartes électroniques telles que l'Arduino Uno ou Nano. Il propose une interface facile pour coder en C/C++, le compiler pour identifier des erreurs potentielles, puis le transférer directement sur la carte à l'aide d'un câble USB. Il inclut également un moniteur série qui facilite la visualisation en temps réel des informations transmises par les capteurs connectés. Cet écosystème est crucial pour la création de projets électroniques et d'objets connectés.

b) Langages de programmation

Python : est un langage de programmation de haut niveau, orienté objet et interprété, doté d'une sémantique dynamique. Ses structures de données intégrées de niveau élevé, alliées à un typage dynamique et à une liaison dynamique, en font un choix très intéressant pour le développement rapide d'applications, tout en étant utilisé comme langage de script ou de collage pour l'interconnexion de composants existants.

HTML (HyperText Markup Language) : est le langage de balisage privilégié pour structurer et agencer le contenu d'une page internet. Il représente la pierre angulaire de chaque page web en établissant la hiérarchie et l'organisation des éléments comme les titres, les paragraphes, les images, les liens hypertextes, les listes, les tableaux et d'autres composants essentiels.

CSS (Cascading Style Sheets) : est un langage de feuilles de style employé pour établir l'apparence visuelle des fichiers HTML. Il permet de réguler l'apparence des pages internet en définissant les teintes, les typographies, la dimension et le style des caractères, ainsi que l'agencement des éléments par le biais de l'administration des marges, des intervalles et des positions.

JavaScript : est un langage de programmation interprété, orienté vers les objets, utilisé surtout dans les navigateurs web pour créer des interfaces interactives, dynamiques et réactives. À la différence du HTML, qui établit la structure d'une page, et du CSS, qui en assure l'aspect visuel, JavaScript permet de contrôler le comportement interactif des éléments d'une page web.

PHP : est un langage de script exécuté sur le serveur, couramment utilisé pour créer des applications web dynamiques. Il permet de créer du contenu HTML de façon interactive, selon les données ou les actions de l'utilisateur. À la différence des langages exécutés directement dans le navigateur (tel que JavaScript), le code PHP s'exécute sur le serveur web, assurant ainsi une sécurité accrue et un traitement central des données.

c) Base de données

phpMyAdmin : est un outil web open source qui facilite la gestion des bases de données MySQL et MariaDB à travers une interface graphique conviviale. Elle propose aux développeurs un outil efficace pour établir, modifier et effacer des bases de données, gérer les tables et enregistrements, exécuter des requêtes SQL, importer ou exporter des données, ainsi qu'administrer les utilisateurs et leurs droits d'accès, le tout sans passer par la ligne de commande.

d) Design 3D / Modélisation

Blender : est un logiciel open source et gratuit conçu pour la modélisation, l'animation, le rendu et la simulation en 3D. Il est couramment employé dans plusieurs secteurs comme l'architecture, le design industriel, le design de produits, les effets spéciaux et la production multimédia.

e) Description des bibliothèques utilisées

Pandas : La bibliothèque dédiée à l'analyse des données et à la manipulation des ensembles de données se nomme Pandas. Il est conçu avec des modules intégrés pour examiner les données, épurer les données, explorer les données et traiter les données [W54].

TensorFlow : est une bibliothèque gratuite et open-source destinée à l'apprentissage automatique et à l'intelligence artificielle, permettant de créer des réseaux neuronaux sur des données graphiques (noeuds et arêtes avec des attributs variés), incluant des outils pour la préparation des données d'entrée et des modèles d'entraînement [W55].

Numpy : est une bibliothèque Python conçue pour un calcul scientifique avancé, surtout en ce qui concerne les tableaux multidimensionnels. Il intègre aussi des fonctions permettant son utilisation dans des secteurs comme l'algèbre linéaire, la transformation de Fourier rapide et les matrices [W56].

Matplotlib : est une bibliothèque de Data Visualization en Python, inspirée de Matlab et développée par John Hunter dans les années 2000. Complète et populaire, elle permet de créer des visualisations statiques, animées et interactives. Elle est capable de générer des graphiques dans les formats les plus utilisés dont PDF, SVG, JPG, PNG, BMP et GIF [W57].

Scikit-Learn : Scikit-Learn est une bibliothèque open source d'apprentissage automatique en Python. Aussi connue sous son nom abrégé sklearn, elle fournit une vaste gamme d'outils, d'algorithmes et de fonctionnalités permettant de faciliter le développement de modèles de machine learning. Scikit-learn couvre les principaux algorithmes de machine learning généralistes : classification, régression, clustering, gradient boosting [W58].

Scipy : Une fonction mathématique intégrée et des bibliothèques sont exploitables en science et en ingénierie pour traiter divers types de problèmes. On trouve également des algorithmes préconfigurés pour l'optimisation, les équations différentielles, l'intégration, l'interpolation, les équations algébriques, les statistiques et d'autres applications. Le SciPy est une bibliothèque complémentaire à Numpy (Numerical Python), offrant ainsi un traitement de données très rapide et efficace. Cette librairie est développée en C, C++, Fortran et Python [W59].

Seaborn : est une bibliothèque Python qui offre la possibilité de résumer et de visualiser des données. Elle permet de créer de jolis graphiques statistiques en Python. Cette bibliothèque apporte des fonctionnalités inédites qui favorisent l'exploration et la compréhension des données. Son interface utilise de fonctions intuitives qui assurent notamment la cartographie sémantique et aident à la conversion des données en graphiques statistiques à visualiser [W60].

2.4 Architecture du système

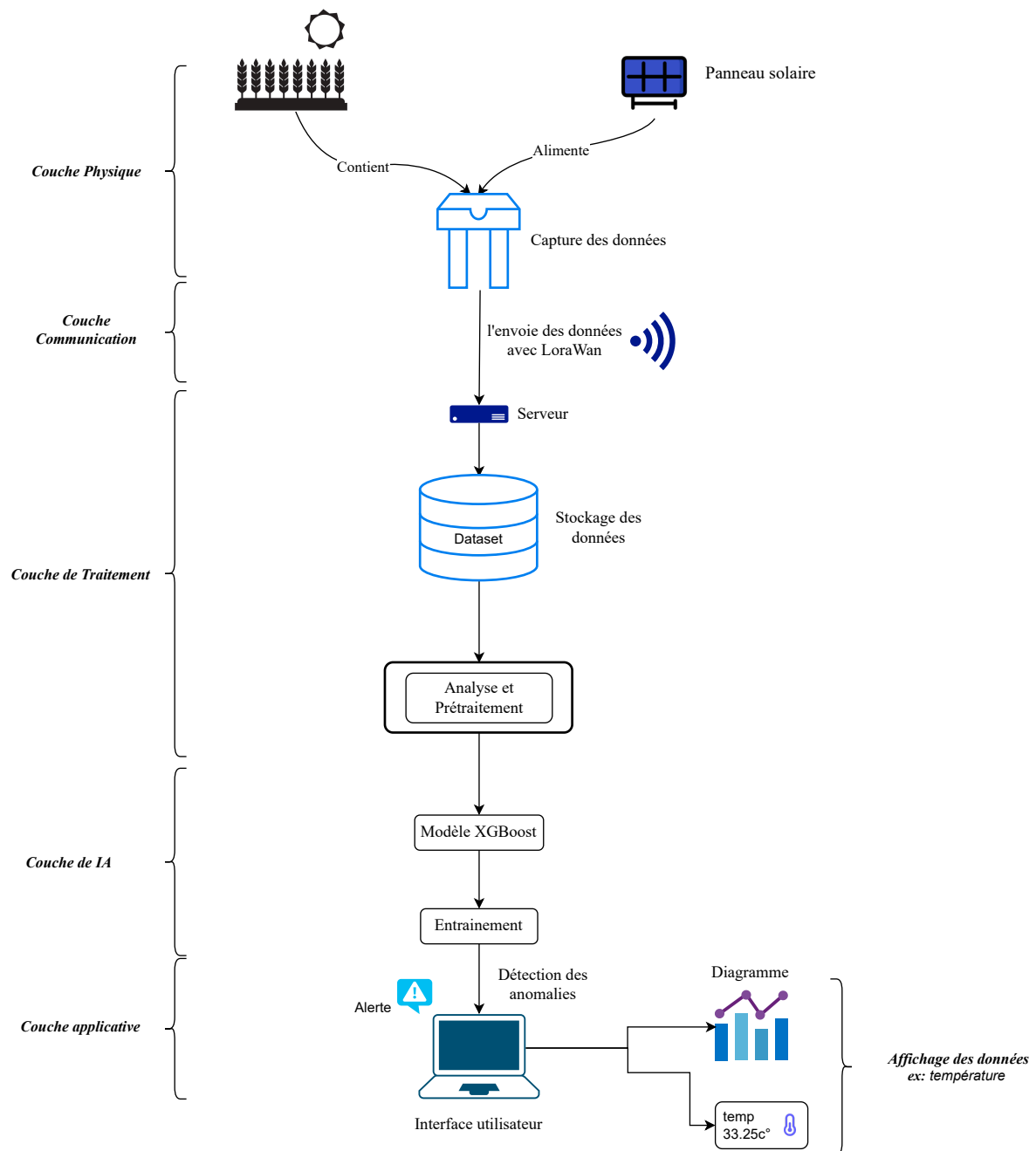


FIGURE 2.19 – Vue détaillée de l'architecture du système

2.4.1 Sélection et Stratégies de Déploiement des Capteurs

Le choix des capteurs dépend principalement des paramètres physico-chimiques à surveiller, de la précision nécessaire, de la fiabilité en conditions réelles, ainsi que des limites de coût et d'énergie.

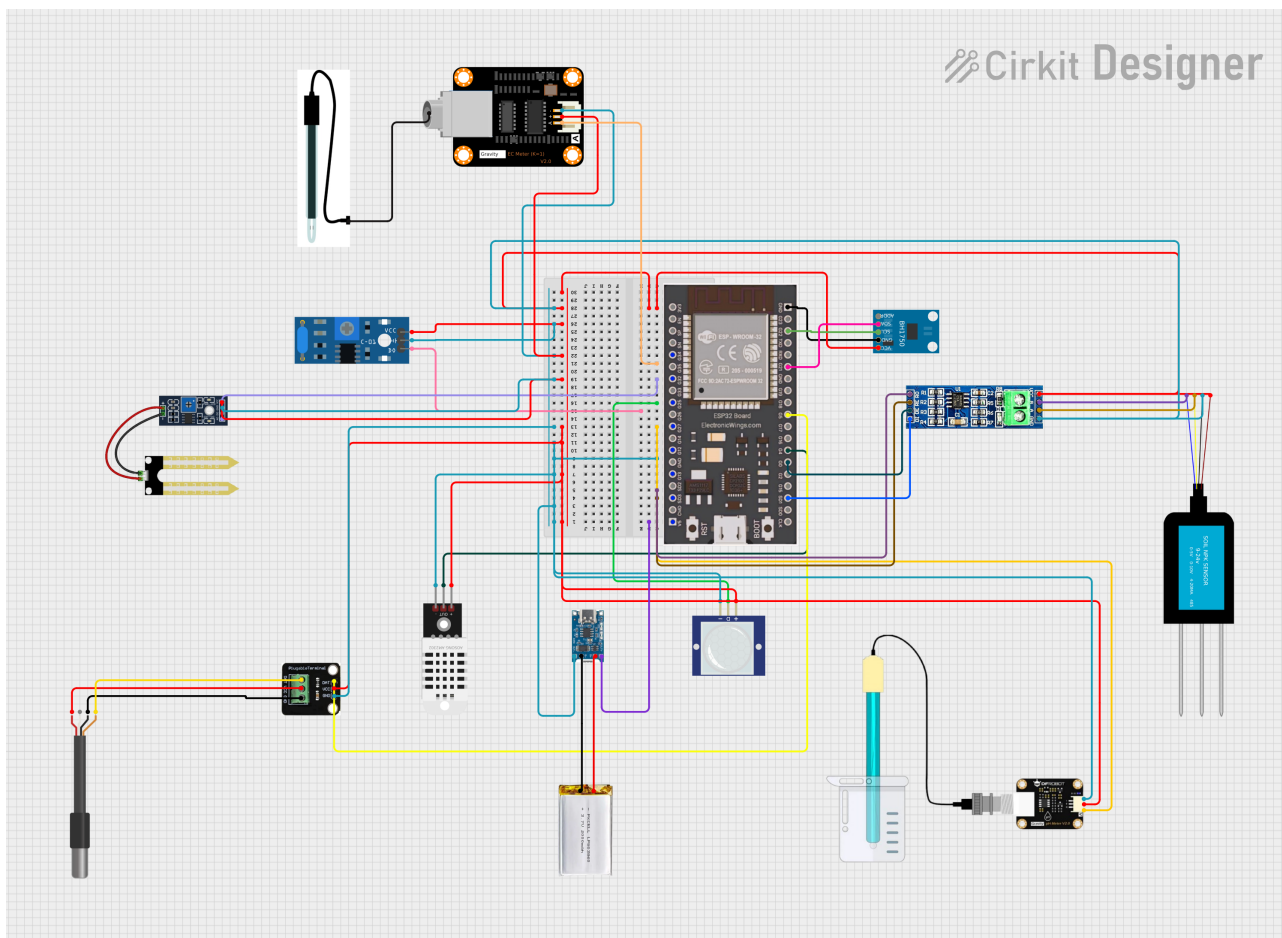


FIGURE 2.20 – Circuit du système

a) Critères de sélection des Capteurs

Paramètre Mesuré	Capteur	Précision	Rôle Agronomique (Champ de Blé)
Température air	DHT22	$\pm 0,5$ °C	Phénologie des stades de croissance (tallage, épiaison)
Humidité air	DHT22	± 2 % HR	Prévention des maladies fongiques (oïdium, rouille)
Température sol	Capteur NPK 7in1	$\pm 0,5$ °C	Activité enzymatique racinaire et minéralisation N/P
Humidité sol	Capteur NPK 7in1	± 3 % VWC	Optimisation irrigation (stade gonflement)
pH du sol	Capteur NPK 7in1	$\pm 0,2$ pH	Disponibilité phosphore (P) et oligo-éléments
Nutriments (N-P-K)	Capteur NPK 7in1	± 10 %	Fertilisation azotée (N) pour le rendement protéique
Conductivité électrique	Capteur NPK 7in1	± 5 % $\mu\text{S}/\text{cm}$	Stress salin affectant la nodosité racinaire
Luminosité	BH1750	± 10 % lux	Accumulation biomasse (IPAR*) et indice de végétation
Insectes surface	PIR	Détection 3–5 m	Dépistage pucerons (<i>Rhopalosiphum padi</i>)
Insectes souterrains	Capteur vibration	0,1–1000 Hz	Détection larves de taupins (<i>Agriotes spp.</i>)

TABLE 2.1 – Capteurs multisources intégrés dans le boîtier.

Exactitude métrologique : Observance des tolérances agronomiques cruciales (par exemple : $\pm 0,5$ °C pour les phases phénologiques, $\pm 0,2$ pH pour la biodisponibilité du phosphore).

Solidité environnementale : Plage de fonctionnement large (-20 °C à 60 °C) et indice de protection pour les capteurs enterrés.

Taux d'échantillonnage approprié : Paramètres évolutifs (par exemple, l'humidité de l'air) évalués chaque heure ; paramètres constants (par exemple, le pH) mesurés une fois par semaine.

Caractéristique culturelle : Conformité aux critères du blé (par exemple : intervalle de pH de 5,5 à 7,5).

Détection du stress biotique : Réactivité aux signaux biologiques spécifiques.

Intégration dans les modèles de prédiction : Adaptabilité aux logiciels agricoles (AP-SIM/STICS) pour la prévision du rendement.

Résilience face à des conditions extrêmes : Stabilité dans des environnements corrosifs (sols salins, humidité supérieure à 90% HR).

Facilité de calibrage : Procédures indépendantes sans nécessité de compétences techniques poussées.

Redondance des informations essentielles : utilisation de capteurs croisés pour les paramètres clés (par exemple, humidité du sol et température de l'air).

b) Stratégie de Déploiement

Objectifs opérationnels L'objectif du plan de déploiement est de mettre en place un réseau de capteurs optimisé pour le suivi agronomique d'un champ de blé, afin de :

- Enregistrer constamment les paramètres clés édaphiques et climatiques qui sont cruciaux pour la croissance et la santé des cultures.
- Offrir des informations utilisables pour initier des interventions spécifiques (comme l'irrigation, la fertilisation ou le contrôle phytosanitaire) en fonction des nécessités concrètes du cycle de culture.
- Améliorer l'utilisation des ressources (eau, fertilisants, produits phytosanitaires) afin d'augmenter l'efficacité agronomique et de minimiser l'effet sur l'environnement.

Configuration des stations de mesure La mise en place des stations d'observation s'effectue grâce à trois systèmes complémentaires, tous dédiés à une série de critères essentiels pour la croissance et la santé du blé : la station de mesure du sol, la station météorologique et les détecteurs biotiques.

- **Station de mesure du sol (capteur 7-en-1) :** Le dispositif CWT-SOIL-NPKPHCTH-S, placé entre 10 et 15 cm de profondeur, évalue en même temps la température du sol ($\pm 0,5$ °C), l'humidité volumique (± 3 % VWC), le pH ($\pm 0,2$), la conductivité électrique (± 5 % $\mu\text{S}/\text{cm}$) et les concentrations en azote, phosphore et potassium assimilables (± 10 %). Située dans la zone de croissance active du blé, cette station a pour objectif de :
 - Observer la progression de la fertilité chimique du sol,
 - Prévoir les exigences en matière d'eau et de nutriments,
 - Identifier immédiatement tout déséquilibre susceptible de nuire au développement des racines.

Les mesures de température et d'humidité fournissent des informations sur la condition hydrique et thermique de l'environnement, qui est un facteur essentiel pour la germination et l'enracinement. En revanche, les mesures du pH, de la conductivité et des nutriments donnent un diagnostic détaillé de la disponibilité des éléments nutritifs et des dangers potentiels de salinisation ou d'acidification.

- **Station atmosphérique :** L'installation atmosphérique est constituée de deux détecteurs placés sur un pylône érigé à une hauteur de 1,5 à 2 m du sol, dans le but d'éviter toute interférence locale causée par la végétation ou la réflectivité du terrain. Le capteur DHT22 fournit des données sur la température et l'humidité de l'air, informations essentielles pour représenter les phases phénologiques du blé (tallage, montaison, épiaison) et pour juger le danger d'un stress hydrique. En même temps, le capteur BH1750, qui évalue la luminosité incidente, offre la possibilité de surveiller l'exposition au soleil réelle et d'évaluer l'énergie photosynthétique active (IPAR). L'utilisation conjointe de ces deux détecteurs atmosphériques permet d'avoir une perspective complémentaire sur les conditions microclimatiques pouvant encourager l'apparition de maladies cryptogamiques comme l'oïdium, la rouille ou la septoriose, tout en facilitant une meilleure compréhension des variations de croissance dues aux changements de lumière et de température.
- **Station météorologique :** Deux sortes de capteurs sont mis en place de manière complémentaire pour une détection précoce des bioagresseurs :
 - *Détecteur PIR (Capteur Infrarouge Passif) :* positionné sur un poteau à une hauteur de 50-60 cm du sol, ce détecteur PIR repère les déplacements des insectes en surface,

y compris l'apparition de pucerons ou de sauterelles.

- *Détecteur de vibrations enterré* : situé à la même profondeur que la sonde du sol, ce détecteur de vibrations englobe une gamme de fréquences allant de 0,1 à 1000 Hz. Il détecte les signaux de vibration produits par les larves qui vivent sous terre, telles que les vers fil de fer.

Ces capteurs biotiques ont pour but de déclencher des avertissements anticipés dès qu'il y a apparition de bioagresseurs, permettant ainsi de restreindre l'utilisation des traitements phytosanitaires à une action ciblée et réfléchie.

— **Infrastructure matérielle et alimentation**

- *Boîtier et protection mécanique*

Le boîtier, fabriqué par impression 3D avec un matériau résistant aux éléments extérieurs, se divise en deux sections qui s'emboîtent parfaitement pour garantir une imperméabilité totale. Quatre entretoises renforcées à l'intérieur assurent un maintien solide de l'électronique (microcontrôleur, batterie, ...etc) éloignée des parois, réduisant de ce fait les contraintes mécaniques. L'intégration directe des sondes est possible grâce à l'existence de multiples ouvertures sur la coque supérieure et inférieure, sans mettre en péril la globalité de l'étanchéité. Une gorge est intégrée au bord intérieur du couvercle pour accueillir un joint torique, ce qui assure une étanchéité parfaite contre l'infiltration d'eau ou de poussière lorsque la partie inférieure est installée.

- *Alimentation*

Les capteurs et l'unité de traitement sont alimentés électriquement par une configuration photovoltaïque : un panneau solaire d'une puissance variant de 40 Wc fournit directement une batterie LiPo (tension nominale de 11.1 V, capacité de 5200 mAh). L'évaluation du rapport panneau/batterie est effectuée pour assurer une indépendance minimale de 5 à 7 jours sans énergie solaire (durant l'hiver ou en cas de nébulosité prolongée). Cette configuration garantit une fourniture d'énergie constante, sans besoin de maintenance journalière, tout en réduisant les coûts énergétiques et en augmentant l'autonomie du système sur place.

- **Réseau de communication et protocoles (LoRaWAN)** Dans le contexte de ce projet pilote, la technologie LoRaWAN (Long Range Wide Area Network) a été choisie pour la transmission des informations, compte tenu de ses avantages particuliers dans un cadre agricole. D'une part, la fréquence de 868 MHz fournit une portée étendue, pouvant atteindre plusieurs kilomètres en plein air, ce qui contribue à réduire le nombre de passerelles déployées. Les modules radio LoRa, de leur côté, se distinguent par une faible consommation d'énergie, aussi bien en mode veille qu'en émission (seulement quelques dizaines de milliwatts), ce qui améliore l'autonomie des stations alimentées par panneaux solaires et batteries. De plus, l'écosystème LoRaWAN, qui comprend des nœuds, des passerelles et des serveurs de réseau, est bien établi et normalisé. Cela assure une intégration aisée et une compatibilité entre diverses marques de capteurs et de stations. En définitive, le caractère non maillé du réseau LoRaWAN facilite l'architecture : chaque station dialogue directement avec la passerelle la plus proche, ce qui allège grandement la gestion logistique et diminue la complexité de mise en place.

2.4.2 La collecte de données

Notre base de données contient 409 mesures détaillées sur la santé des sols, structurées de la manière suivante :

- **Timestamp** : horodatage de la mesure (format datetime)
- **Plant_ID** : identifiant unique de la plante (entier)
- **Soil_Moisture** : taux d'humidité du sol (float)

- **Ambient_Temperature** : température ambiante au moment de la mesure (float)
- **Soil_Temperature** : température du sol (float)
- **Humidity** : humidité relative de l'air (float)
- **Light_Intensity** : intensité lumineuse ambiante (float)
- **Soil_pH** : pH du sol (float)
- **Nitrogen_Level** : teneur en azote du sol (float)
- **Phosphorus_Level** : teneur en phosphore du sol (float)
- **Potassium_Level** : teneur en potassium du sol (float)
- **Vibration** : amplitude des vibrations mesurées dans la masse du sol (float)
- **Mouvement** : détection de mouvements à la surface du sol (float)
- **Plant_Health_Status** : étiquette qualitative de santé de la plante (catégorie). Par exemple : « High Stress », « Moderate Stress » ou « Healthy »

2.4.3 Stockage et transmission des données

Dans le cadre de ce projet, toutes les données collectées grâce aux capteurs ont été regroupées dans une base de données relationnelle MySQL, gérée par l'interface phpMyAdmin. Chaque entrée incluait un horodatage de la mesure et les valeurs relevées pour chaque capteur (température, humidité, pH, nutriments, etc.), garantissant ainsi une structuration temporelle ordonnée des données. Selon le protocole expérimental établi, les mesures étaient prises à des intervalles réguliers (par exemple, toutes les quelques minutes). Les données ont par la suite été extraites en format CSV, rendant leur manipulation plus aisée dans les instruments d'analyse et d'annotation.

2.4.4 Etiquetage du dataset

L'étape d'étiquetage du jeu de données a été réalisée à l'aide de l'application **Label Studio** (outil open-source d'annotation de données). Chaque échantillon de données a été classé manuellement dans l'une des trois catégories d'état de santé de la plante : « High Stress », « Moderate Stress » ou « Healthy », correspondant respectivement à un état de stress élevé, modéré ou à une plante en bonne santé montré dans la figure 2.21. Cette annotation garantit la présence d'une variable cible (le niveau de stress) pour chaque enregistrement de capteurs, ce qui est essentiel pour l'apprentissage supervisé.

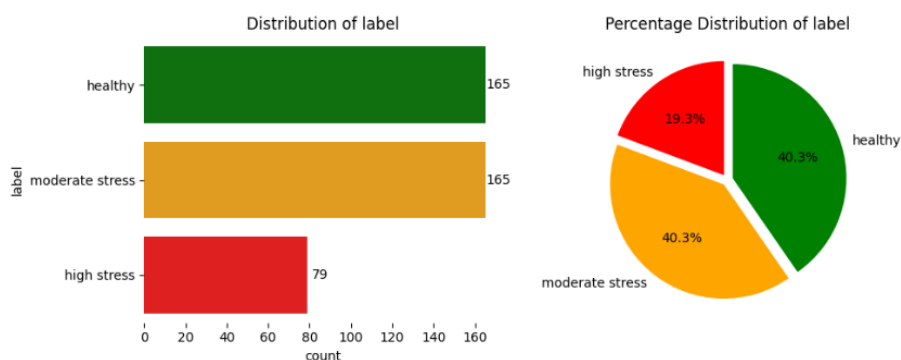


FIGURE 2.21 – dispersion d'étiquetage des données

2.4.5 Extraction et sélection des fonctionnalités

Dans cette étude, chaque valeur captée par les capteurs a été directement exploitée en tant que caractéristique pour le modèle de classification. En d'autres termes, les données brutes

provenant des capteurs servent de vecteur de caractéristiques pour chaque échantillon. Cette méthode garantit la préservation de toutes les données mesurées, chaque variable recueillie étant intégrée dans l'apprentissage du modèle de classification.

2.4.6 Sélection du modèle d'IA

Pour analyser les données, on a opté pour 5 différents modèles qui sont :

a) XGBoost

XGBoost (pour *eXtreme Gradient Boosting*) est un algorithme de machine learning reposant sur une version optimisée et performante du gradient boosting. Il élabore un modèle de prévision sous la forme d'une somme de K arbres décisionnels (f_k), en minimisant la fonction de perte régulière ci-dessous :

$$\mathcal{L}(\{f_k\}_{k=1}^K) = \sum_{i=1}^n \ell(y_i, \hat{y}_i^{(t-1)} + f_t(x_i)) + \sum_{k=1}^K \Omega(f_k), \quad (2.1)$$

où :

- n est le nombre d'exemples d'entraînement,
- ℓ est une fonction de perte (par exemple la perte logarithmique pour la classification binaire),
- $\hat{y}_i^{(t-1)}$ est la prédiction cumulée sur l'exemple i après $(t-1)$ arbres,
- f_t est l'arbre de décision ajouté à la t -ème itération,
- $\Omega(f) = \gamma T + \frac{1}{2} \lambda \sum_{j=1}^T w_j^2$ est la pénalisation de la complexité d'un arbre (avec T le nombre de feuilles et w_j le score de la feuille j),
- γ et λ sont des hyperparamètres de régularisation.

Cette formulation permet, à chaque itération, d'ajouter un arbre f_t construit pour approcher le gradient de la fonction de perte, tout en contrôlant la complexité pour éviter le surapprentissage. CHEN et GUESTRIN, 2016

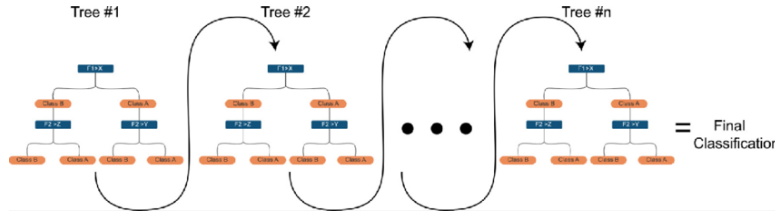


FIGURE 2.22 – Architecture d XGBoost

b) LightGBM

LightGBM (Light Gradient Boosting Machine) est une version de l'algorithme de boosting par gradient basée sur les arbres décisionnels, élaborée par Microsoft. LightGBM adopte une approche *leaf-wise* (par feuille), contrairement aux techniques classiques de gradient boosting qui élaborent l'arbre niveau par niveau. À chaque itération, il choisit la feuille dont la séparation conduit à la plus importante diminution de la fonction de perte, ce qui facilite :

- une convergence plus rapide,
- une meilleure efficacité mémoire,
- une gestion d'ensembles de données volumineux (grande échelle).

De manière plus précise, si nous désignons par $F_{m-1}(x)$ le modèle obtenu suite à $(m - 1)$ itérations, LightGBM procède à la mise à jour du modèle en intégrant un nouvel arbre $h_m(x)$ qui minimise la fonction de perte régulière :

$$F_m(x) = F_{m-1}(x) + \eta h_m(x), \quad (2.2)$$

où η représente le taux d'apprentissage (learning rate). L'élaboration de l'arbre $h_m(x)$ s'opère en recherchant, pour chaque feuille éventuelle, la séparation qui optimise la diminution de la perte :

$$\Delta \mathcal{L} = \frac{1}{2} \sum_{j \in \{\text{feuilles}\}} \frac{G_j^2}{H_j + \lambda}, \quad (2.3)$$

avec

$$G_j = \sum_{i \in I_j} g_i, \quad H_j = \sum_{i \in I_j} h_i, \quad (2.4)$$

où $g_i = \partial_F \ell(y_i, F_{m-1}(x_i))$ et $h_i = \partial_F^2 \ell(y_i, F_{m-1}(x_i))$ sont respectivement le gradient et la dérivée seconde de la fonction de perte ℓ pour l'exemple (x_i, y_i) , λ est le paramètre de régularisation, et I_j désigne l'ensemble des indices d'exemples arrivant dans la feuille j . KE et al., 2017

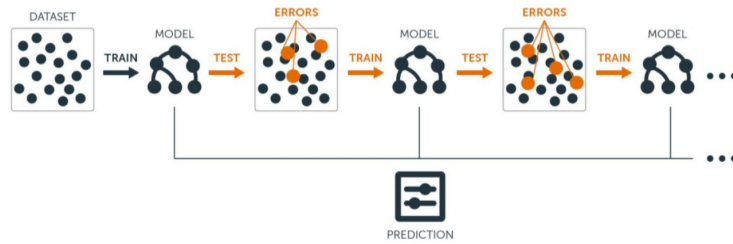


FIGURE 2.23 – Architecture de LightGBM

c) SVM

L'algorithme de machine à vecteur de support (SVM) est un modèle d'apprentissage supervisé qui catégorise les données en déterminant une ligne ou un hyperplan idéal maximisant l'écart entre chaque catégorie dans un espace N-dimensionnel.

Les SVMs sont fréquemment employés pour les enjeux de classification. Ils identifient deux catégories en déterminant l'hyperplan idéal qui optimise la distance entre les points de données les plus proches des classes adverses. La quantité de caractéristiques présentes dans les données d'entrée détermine si l'hyperplan est une ligne dans un espace à deux dimensions ou une surface plane dans un espace de dimension n. Comme il existe plusieurs hyperplans susceptibles de distinguer les classes, l'algorithme cherche à maximiser la marge entre les points afin de déterminer le meilleur hyperplan séparateur pour les classes. Toutefois, quand les données ne peuvent pas être séparées de manière linéaire, des fonctions de noyau sont mises en œuvre pour convertir l'espace en dimension supérieure des données et permettre ainsi une séparation linéaire. Le choix d'une fonction de noyau, comme les noyaux linéaires, polynomiaux, à base radiale (RBF) ou sigmoïdes, est déterminé par les spécificités des données et l'application particulière envisagée [W61].

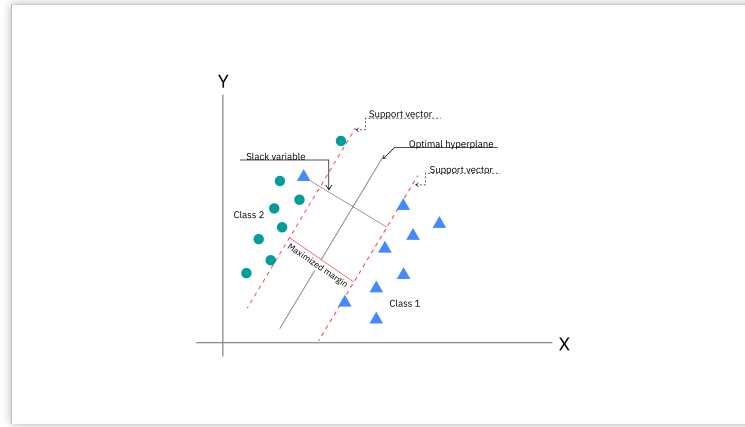


FIGURE 2.24 – SVM [W61]

2.4.7 Métriques d'évaluation

- **Vrais positifs (VP)** : Les vrais positifs sont les situations où le modèle repère correctement une instance qui appartient à la classe ciblée. En d'autres termes, le modèle attribue une étiquette « positive » uniquement si l'échantillon est véritablement positif. Dans une tâche de classification, un nombre élevé de vrais positifs indique que le modèle est apte à identifier avec efficacité toutes les instances de la classe visée.
- **Faux positifs (FP)** : Les faux positifs se réfèrent aux cas où le modèle indique « positif » pour une instance qui est en fait négative. En d'autres termes, le modèle indique faussement l'existence d'un phénomène qui n'est pas présent dans l'échantillon. Une grande quantité de faux positifs nuit à la précision du modèle, en augmentant la proportion d'erreurs dans les prédictions positives.
- **Vrais négatifs (VN)** : Les vrais négatifs représentent les situations où le modèle anticipe un résultat « négatif » pour une instance qui est effectivement négative. En d'autres termes, pour ces échantillons, le modèle effectue une prédiction juste en déclarant que la classe ciblée est absente.
- **Faux négatifs (FN)** : Les faux négatifs se réfèrent aux situations où le modèle indique « négatif » alors que l'instance est en fait positive. En d'autres termes, le modèle n'a pas d'exemples de la catégorie concernée. Un grand nombre de faux négatifs indique que le modèle ne parvient pas à identifier un certain nombre d'occurrences positives, ce qui peut être crucial en fonction de l'application.
- **Accuracy** : l'accuracy est une mesure importante pour valider le modèle. L'accuracy, ou le taux de prédictions correctes, correspond à la proportion de prédictions correctes parmi toutes les prévisions faites. L'accuracy est calculée à l'aide de l'équation suivante :

$$\text{Accuracy} = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN} \quad (2.5)$$

- **Precision** : La précision est une évaluation de l'efficacité de l'utilisateur en classification et en apprentissage automatique qui mesure la capacité d'un modèle à reconnaître correctement les exemples positifs parmi l'ensemble des prédictions positives. Le degré de précision montre que le modèle peut générer une association acceptable de faux positifs, ce qui est souvent recherché. Cependant, une grande précision peut accroître les faux négatifs car ce modèle a une classe négative qui est en réalité positive. La précision se détermine grâce à l'équation ci-dessous :

$$\text{Precision} = \frac{TP}{TP + FN} \quad (2.6)$$

- **Recall** : c'est une métrique de performance employée pour mesurer la capacité d'un modèle à repérer tous les exemples positifs parmi l'ensemble des exemples réellement positifs. Le Recall est déterminé par l'équation suivante :

$$\text{Recall} = \frac{TP}{TP + FN} \quad (2.7)$$

- **F1-score** : Le score F1 représente une moyenne harmonique entre la précision et le recall. Il sert à prendre en compte à la fois la précision et le recall, tout en accordant plus d'importance aux classes déséquilibrées. Le score F1 est déterminé grâce à la l'équation suivante :

$$\text{F1-score} = \frac{2 \cdot (\text{Precision} \cdot \text{Recall})}{\text{Precision} + \text{Recall}} \quad (2.8)$$

2.5 Conclusion

Ce chapitre a constitué la base fonctionnelle et technique à l'implémentation d'un système de surveillance agronomique avancé. Une fois les exigences commerciales et les limitations en termes de performance, sécurité et maintenabilité établies, nous avons minutieusement détaillé l'architecture matérielle ainsi que la couche logicielle correspondante, allant du firmware embarqué aux API et interfaces utilisateurs. Nous avons présenté nos stratégies de sélection et de déploiement des capteurs, les mécanismes de stockage et de transmission garantissant la fiabilité et la latence maîtrisée des flux de données, ainsi que les processus de nettoyage et de prétraitement assurant l'intégrité et la qualité des informations collectées. Parallèlement, les processus de formation, de validation et d'optimisation des modèles d'intelligence artificielle ont été définis afin de fournir un cadre reproductible et quantifiable. Avec ces bases solides, nous sommes maintenant en mesure de décrire la mise en œuvre pratique des algorithmes et le déploiement opérationnel du système, qui seront examinés dans le prochain chapitre.

Chapitre 3 : Implémentation, Évaluation et Résultats

3.1 Introduction

Ce chapitre se concentre sur la mise en oeuvre de notre système, décrivant les procédures importantes, les tests qui ont été effectués et les résultats obtenus. Nous commencerons par décrire en détail les étapes de la mise en place de notre système, en mettant l'accent sur les décisions technologiques et les instruments qui ont été pris, les bases qui ont été utilisées et les valeurs des paramètres qui ont été fixés. Nous aborderons les éléments techniques, les difficultés rencontrées et les stratégies utilisées pour surmonter ces obstacles.

3.2 Description générale

Le prototype mis en oeuvre est un boîtier étanche intégrant une suite de capteurs proximaux destinés à évaluer la santé du sol. Les données sont transmises en temps réel via LoRaWAN à longue portée vers un serveur, et affichées sur une interface web pour l'agriculteur. Le système est autonome : il est alimenté par une batterie rechargeable (11.1V) et un panneau solaire, assurant une surveillance continue même en l'absence de source.

Les expériences ont été conduites dans des parcelles agricoles réelles, simulant des conditions variées : p. ex. variations d'humidité (sol sec vs sol arrosé), de température (jour vs nuit), ou de luminosité (ensoleillement vs ombrage). Chaque scénario test comprenait la collecte continue des mesures capteur sur plusieurs jours, avec en parallèle des mesures de référence (analyses en laboratoire pour la composition du sol). Ces données réelles ont servi à valider tant la fiabilité des capteurs que la réactivité du réseau LoRaWAN. LoRaWAN permet des transmissions sur plusieurs kilomètres avec une très faible consommation d'énergie, ce qui est idéal pour des capteurs distants en plein champ.

Le dispositif a ainsi été testé en continu, avec relevés tous les 5–10 secondes, conformément aux pratiques existantes .

Dans cette même démarche expérimentale, l'entraînement, la validation et l'optimisation du modèle de classification ont été réalisés pour viser à ajuster et juger divers algorithmes de classification afin de prédire la condition des plantes (label) basée sur les données recueillies par le prototype de capteurs (409 échantillons, 15 variables).

3.3 Présentation du Jeu de Données

Afin d'évaluer et de comparer les performances des différents modèles d'intelligence artificielle, nous avons utilisé une base de données complète et structurée, spécifiquement collectée pour la surveillance intelligente de la santé des sols.

Le jeu de données utilisé contient 1 200 observations, chacune composée de 14 variables distinctes. Chaque ligne correspond à une mesure unique effectuée à un moment précis pour une plante donnée. La répartition des données pour l'apprentissage et le test a été réalisée de manière stratifiée à raison de 80 % pour l'apprentissage et 20 % pour les tests, en utilisant la fonction `train_test_split` de `scikit-learn`, garantissant ainsi la préservation de la répartition des classes dans les deux ensembles.

La distribution initiale des classes montre un déséquilibre modéré avec :

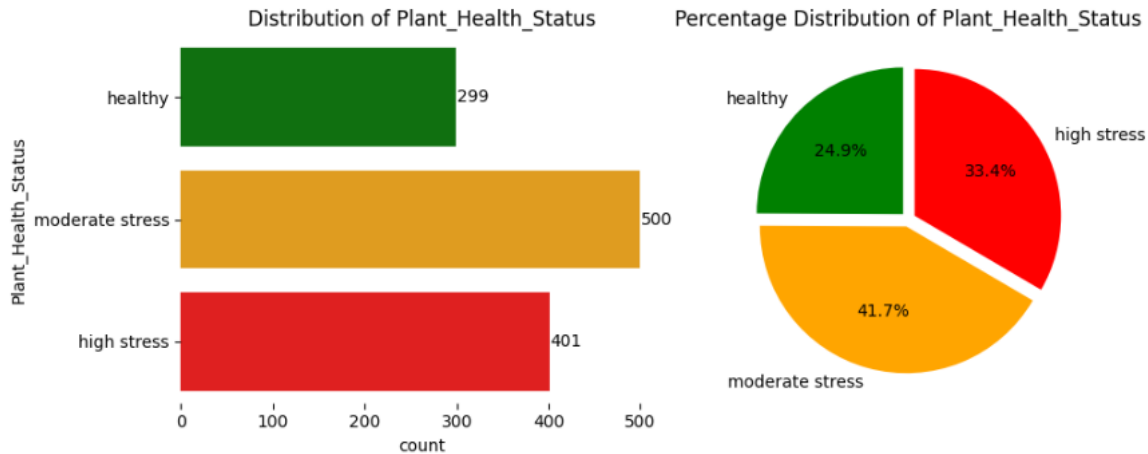


FIGURE 3.4 – Dispersion d'étiquetage des données

Cette répartition est illustrée clairement dans la figure 3.4 représente la distribution des classes.

3.4 Configurations et Paramétrage des modèles

Chaque algorithme a subi une formation initiale sans l'utilisation de recherche automatique d'hyperparamètres ni de rappels (arrêt précoce, sauvegarde). Les paramètres manuels choisis sont les suivants :

LightGBM

- Nombre d'arbres (itérations de boosting) : 100
- Taux d'apprentissage (learning rate) : 0,1
- Nombre maximum de feuilles par arbre (num_leaves) : 31

XGBoost

- Nombre d'arbres (n_estimators) : 100
- Taux d'apprentissage (learning rate) : 0,1
- Profondeur maximale autorisée pour les arbres (max_depth) : 6

SVM

- Noyau : fonction de base radiale (RBF) gaussienne
- Le paramètre de régularisation (C) est fixé à 1.

Ces paramètres uniformes facilitent une évaluation des performances directe, dépourvue de biais issus d'une recherche minutieuse d'hyperparamètres.

3.5 Evaluation des performance des modèles d'IA

Cinq modèles principaux ont été testés : XGBoost, LightGBM, Support Vector Machine (SVM), LSTM et GRU . Les performances des modèles ont été évaluées selon plusieurs critères : accuracy, précision, recall et F1-score, en utilisant un ensemble de test distinct constitué de 240 observations (20 % des données).

3.5.1 XGBoost

Le modèle a obtenu une performance exceptionnelle avec une précision globale de 99,58 %, un recall et un F1-score proches de 1 pour toutes les classes, indiquant une excellente performance. Cela est montré dans le tableau 3.2

Classe	Précision	Recall	F1-score	Support
Healthy	0.98	1.00	0.99	60
High Stress	1.00	1.00	1.00	100
Moderate Stress	1.00	0.99	0.99	80
Accuracy	0.9958			
Macro avg	0.99	1.00	1.00	240
Weighted avg	1.00	1.00	1.00	240

TABLE 3.2 – Résultats de performance du modèle XGBoost

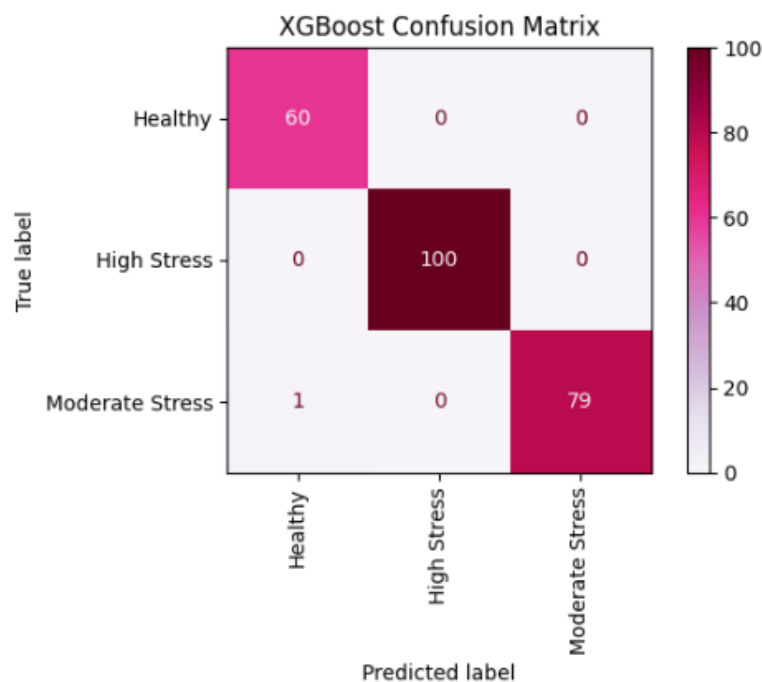


FIGURE 3.5 – Matrice de confusion du modèle XGBoost

La figure 3.5 révèle une performance exceptionnelle. Toutes les instances de la classe Healthy (60/60) et High Stress (100/100) ont été correctement classées. Seule une erreur a été observée : une plante de la classe Moderate Stress a été prédite à tort comme Healthy. Ce résultat confirme la précision remarquable du modèle.

3.5.2 LightGBM

Le modèle a affiché une performance très proche de XGBoost, avec une précision globale de 99,17 %, un recall et un F1-score élevés pour toutes les catégories. Quelques erreurs mineures sont observées, notamment un cas de confusion entre les catégories Healthy et Moderate Stress. Cela est montré dans le tableau 3.3

Classe	Précision	Recall	F1-score	Support
Healthy	0.98	0.98	0.98	60
High Stress	1.00	1.00	1.00	100
Moderate Stress	0.99	0.99	0.99	80
Accuracy	0.9917			
Macro avg	0.99	0.99	0.99	240
Weighted avg	0.99	0.99	0.99	240

TABLE 3.3 – Résultats de performance du modèle LightGBM

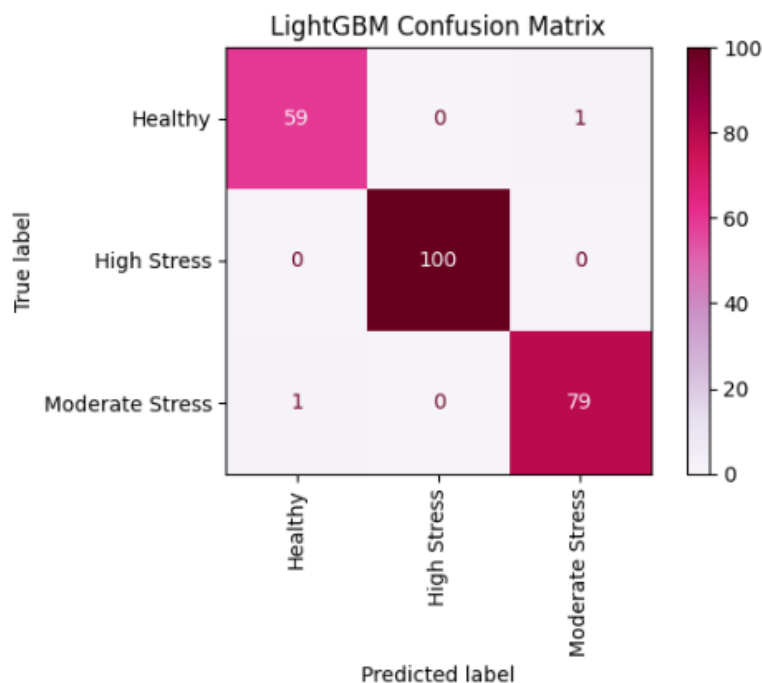


FIGURE 3.6 – Matrice de confusion du modèle LightGBM

La figure suivante 3.6 montre que le modèle LightGBM affiche une très bonne performance avec deux erreurs : une plante Healthy mal prédite comme Moderate Stress et une plante Moderate Stress prédite comme Healthy. La classe High Stress est prédite avec une précision parfaite.

3.5.3 SVM

Le modèle a montré une performance relativement inférieure avec une précision globale de 82,92 %. Des confusions notables apparaissent particulièrement entre les catégories Healthy et Moderate Stress, ce qui diminue son F1-score pour ces classes. Cela est montré dans le tableau 3.4

Classe	Précision	Recall	F1-score	Support
Healthy	0.86	0.80	0.83	60
High Stress	0.89	0.90	0.90	100
Moderate Stress	0.73	0.76	0.75	80
Accuracy	0.8292			
Macro avg	0.83	0.82	0.82	240
Weighted avg	0.83	0.83	0.83	240

TABLE 3.4 – Résultats de performance du modèle SVM

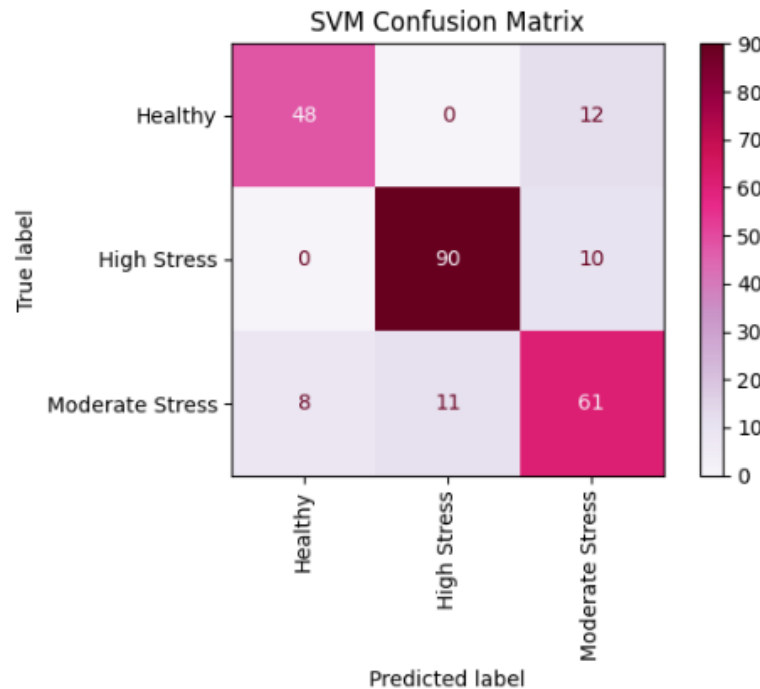


FIGURE 3.7 – Matrice de confusion du modèle SVM

Le modèle SVM montre des limites notables. Douze plantes Healthy sont confondues avec Moderate Stress, dix plantes High Stress sont mal classées, et la classe Moderate Stress enregistre dix-neuf erreurs. Ces confusions révèlent une difficulté du modèle à bien séparer les classes intermédiaires. Cela est montré dans la figure 3.7 .

3.5.4 Choix du Modèle Final

En résumé, XGBoost s’est démarqué comme le meilleur modèle pour notre application, offrant la plus haute précision pour prédire l’état de santé des plantes à partir des données sol/environnement. Ce modèle sera donc privilégié pour la suite du projet (intégration éventuelle dans le système en temps réel pour afficher un diagnostic automatique sur l’interface web). Notons que la bonne performance de XGBoost dans ce contexte rejoint les tendances observées dans le domaine de l’agriculture de précision, où des études ont aussi trouvé les algorithmes de boosting particulièrement performants pour détecter des stress nutritionnels ou hydriques précocement.

3.6 Études de cas et tests réels

Après avoir calibré et évalué le système et les modèles en environnement contrôlé, des tests sur le terrain ont été menés pour valider le fonctionnement et recueillir les impressions des utilisateurs finaux (agronomes, agriculteurs) quant à la pertinence des mesures et de l'interface.

L'expérimentation s'est déroulée dans trois environnements distincts afin d'évaluer le fonctionnement du système dans des conditions variées : un pot en conditions contrôlées, un jardin potager et un champ de blé. Pour chaque site, le boîtier capteur a été installé et laissé en fonctionnement pendant une durée de 24 heures consécutives. Ces trois scénarios de test couvrent un spectre de contextes agricoles : le pot représente un milieu confiné (simulant une culture en serre ou en conteneur, avec un volume de sol restreint), le jardin correspond à une petite parcelle diversifiée avec une terre de jardin possiblement amendée et irriguée manuellement, et le champ de blé illustre une grande culture en plein champ, relativement homogène et soumise aux conditions climatiques extérieures sans irrigation additionnelle (culture pluviale). Avant chaque essai, le système a été entièrement chargé (batterie pleine) et étalonné de base (notamment le pH-mètre avec des solutions tampons pH 7 et pH 4, et vérification du bon fonctionnement de chaque capteur dans des conditions connues). Le boîtier a ensuite été positionné de sorte que les sondes de sol (humidité, température, pH, NPK, CE) soient correctement insérées dans le sol du site, et que les capteurs d'air (DHT22, lumière) soient exposés à l'atmosphère libre tout en étant protégés du rayonnement direct excessif ou de la pluie éventuelle (notamment via un petit abri anti-UV pour le DHT22 afin d'éviter un chauffage direct).

Chaque site de test a fourni un ensemble de données horodatées couvrant un cycle diurne complet. La fréquence de mesure était d'environ une lecture toutes les 2 à 5 minutes pour chaque capteur, ce qui a généré environ 400 enregistrements par journée et par site (suffisamment pour capturer les variations journalières des paramètres). Les données étaient transmises en temps réel via LoRaWAN à une passerelle située à proximité (quelques centaines de mètres au maximum) et reliée à Internet. Aucune perte de connectivité n'a été constatée durant ces courtes campagnes, compte tenu de la faible distance et de l'absence d'obstacles majeurs entre le boîtier et la passerelle. En conditions optimales, un lien LoRaWAN peut fonctionner jusqu'à plusieurs kilomètres, et la littérature rapporte par exemple des portées de l'ordre de 3,4 km en milieu agricole ouvert avec une puissance d'émission modérée de 10 dBm – une performance bien au-delà des besoins de nos essais, assurant une marge confortable pour d'éventuelles applications sur de plus grandes exploitations.

3.6.1 Cas 1 – Plante en pot :

Ce test a été réalisé sur une plante de blé cultivée en pot (volume de sol d'environ 5 L) maintenue en extérieur. L'objectif était d'observer la réactivité du système face à un stress hydrique rapide, le pot offrant un milieu à faible réserve en eau. Au début de la journée, le sol du pot a été bien arrosé (proche de la capacité au champ du substrat). Les capteurs ont alors enregistré une humidité du sol élevée (environ 80% de saturation) et une température du sol modérée (18°C) le matin. La plante était vigoureuse et le modèle IA la classait en catégorie Healthy. Au fil des heures, en l'absence d'arrosage supplémentaire et sous un soleil direct de midi, on a observé une diminution marquée de l'humidité du sol : celle-ci est tombée à environ 25-30% en fin d'après-midi. Cette baisse a été fidèlement captée par le capteur d'humidité et reflétée en temps réel sur l'interface. Parallèlement, la température du sol dans le pot a légèrement augmenté (jusqu'à 22-23°C) du fait de la faible inertie thermique du pot. La plante a commencé à montrer des signes de léger flétrissement en fin de journée, correspondant à un stress hydrique modéré. Le système a détecté cette évolution : les données en temps réel indiquaient des valeurs sortant des zones optimales (l'humidité du sol passant sous le seuil

optimal pour la plante de blé). Le modèle XGBoost, appliqué aux données mesurées, a alors basculé sa prédiction vers la classe Moderate Stress pour la plupart des relevés de l'après-midi, ce qui correspondait à l'observation visuelle. Ce cas en pot a ainsi démontré la capacité du système à détecter rapidement un stress hydrique naissant dans un milieu confiné. L'alerte aurait pu être donnée à l'agriculteur (par exemple via une notification) dès que l'humidité est descendue sous un certain seuil critique, afin de l'inciter à arroser avant que le stress ne s'aggrave.



(a)



(b)

FIGURE 3.8 – Boîtier intégré dans un pot.

3.6.2 Cas 2 – Jardin (conditions variées) :

Le boîtier a ensuite été déployé dans un jardin comportant diverses plantes avec un sol amendé et régulièrement arrosé manuellement. Contrairement au pot, le sol du jardin a une plus grande capacité de rétention d'eau et les plantes y puisent librement leurs nutriments sur une plus grande profondeur. Durant ce test, l'accent a été mis sur la diversité des paramètres enregistrés plutôt que sur un stress marqué. Le matin, les capteurs ont relevé une humidité du sol relativement élevée grâce à un arrosage effectué la veille. La température de l'air était fraîche (environ 20°C) avec une humidité ambiante élevée en raison de la rosée matinale. La luminosité mesurée par le capteur BH1750 est montée en flèche après le lever du soleil. La température de l'air a culminé autour de 28°C l'après-midi, tandis que la température du sol est restée plus stable, oscillant entre 18°C le matin et 25°C en fin de journée. Aucune carence majeure n'a été détectée par le capteur de nutriments (les niveaux de N, P, K mesurés sont restés dans des gammes moyennes). Le pH du sol du jardin s'est avéré légèrement acide (aux environs de 6,5), valeur normale pour un terreau riche en matière organique. L'interface web a affiché ces paramètres en direct, avec pour chacun un indicateur d'état. Durant toute la journée, la plante observée est restée en bonne santé apparente, et de fait le modèle IA a constamment prédit la classe Healthy pour ces conditions. Ce cas d'usage a montré que le système peut documenter

les fluctuations journalières normales d'un environnement de jardin et confirmer l'absence de stress lorsque les pratiques culturales (arrosage, fertilisation) sont bien gérées. L'utilisateur a pu apprécier de voir concrètement l'évolution des paramètres microclimatiques et de confirmer que ceux-ci restaient dans des seuils compatibles avec une croissance optimale.



(a)



(b)

FIGURE 3.9 – Boîtier intégré dans un jardin.

3.6.3 Cas 3 – Champ de blé (grande culture en plein champ) :

L'expérimentation a été conduite dans une parcelle de blé cultivée en plein champ, sans dispositif d'irrigation artificielle, dans le but d'évaluer le comportement du système en conditions agricoles réelles. Le boîtier a été installé au centre de la parcelle, avec un positionnement précis des capteurs : les sondes d'humidité ont été enfouies entre 10 et 15 cm, tandis que les capteurs de pH et de nutriments ont été implantés à une profondeur d'environ 5 cm. Les conditions météorologiques de la journée étaient caractérisées par un ensoleillement soutenu et des températures élevées, typiques d'une fin de printemps. Les mesures initiales ont révélé un taux d'humidité du sol de l'ordre de 35 %, conséquence probable de faibles précipitations survenues deux jours plus tôt. Une baisse progressive de cette humidité a été observée au fil de la journée, atteignant approximativement 20 % en soirée, seuil correspondant à l'apparition d'un stress hydrique selon les standards agronomiques pour les sols cultivés. Parallèlement, la température du sol a augmenté de 17 °C le matin à 24 °C en milieu de journée, tandis que la température ambiante atteignait 30 °C. L'humidité relative de l'air a diminué de manière significative, passant de 50 % en matinée à 30 % l'après-midi, ce qui a contribué à intensifier le phénomène d'évapotranspiration. Concernant les paramètres nutritifs, une valeur nulle de concentration en azote a été enregistrée, pouvant indiquer une carence sévère ou une limite technique du capteur. Les teneurs en phosphore (30 mg/kg) et en potassium (25 mg/kg) ont été jugées modérées. Enfin,

un pH d'environ 7,2 a été mesuré, signalant un sol neutre à légèrement alcalin, en adéquation avec la typologie calcaire des sols de la zone ; cette valeur a été automatiquement qualifiée d'« Alcalin » par l'interface du système.



(a)



(b)

FIGURE 3.10 – Boîtier intégré dans un champ.



FIGURE 3.11 – Interface web du système

La figure 3.11 illustre l'interface web du système, qui affiche en temps réel les principaux paramètres environnementaux mesurés pour une culture de blé, accompagnés d'une interprétation visuelle. Chaque valeur enregistrée est associée à un indicateur d'état permettant une lecture intuitive de la situation agronomique. Par exemple, dans cette configuration, la température du sol mesurée à 23,4 °C est interprétée comme "Optimale", l'humidité du sol évaluée à 45,5% reçoit également le statut "Optimale", tandis que le pH de 7,2 est qualifié d'"Alcalin".

Cette interface a démontré son efficacité auprès des utilisateurs, en particulier pour une consultation rapide de l'état du champ. Lors de notre étude de cas, les mesures enregistrées autour de midi montraient des conditions globalement favorables, la majorité des indicateurs étant dans la zone verte, à l'exception du taux d'azote qui restait à 0 mg/kg, suggérant potentiellement une carence nutritionnelle importante ou la nécessité d'un apport en engrais azoté.

Par ailleurs, le capteur de mouvement PIR, positionné à environ 20 cm au-dessus du sol, a détecté à plusieurs reprises le passage d'organismes à la surface — probablement des insectes ou petits reptiles — avec trois activations enregistrées au cours de la journée. Toutefois, en l'absence d'identification précise, il est difficile d'en déterminer la nature exacte. Concernant l'activité souterraine, le capteur de vibrations n'a signalé aucun événement notable, ce qui laisse supposer l'absence d'activité biologique significative, telle qu'une infestation de larves ou d'insectes souterrains, durant la période d'observation.

3.7 Performance du système

- **Fiabilité des capteurs et transmission :** Durant l'ensemble des tests, les capteurs se sont révélés globalement fiables, fournissant des mesures cohérentes avec les attentes pour chaque environnement. Aucune défaillance franche d'un capteur n'a été observée sur 24 heures, et les données ne présentaient pas d'anomalies flagrantes (telles que des valeurs bloquées ou hors plage extrême) après l'étalonnage initial. Le système de transmission LoRaWAN a également fait preuve d'une grande fiabilité sur la durée limitée des essais : le taux de livraison des paquets a été 100% sur chaque site (aucune mesure n'a été perdue ou corrompue selon les journaux du serveur). Ce résultat s'explique par la proximité de la passerelle et le faible niveau d'interférences radio dans ces milieux ruraux. En situation réelle de déploiement à plus long terme, la robustesse de LoRaWAN est un atout majeur car même sur des distances de l'ordre du kilomètre, un taux de livraison élevé peut être maintenu (des études antérieures notent par exemple

une portée de 1,6 km avec un excellent débit de paquets reçus dans un réseau LoRa personnalisé). Dans nos tests, la force du signal reçu est restée largement au-dessus du seuil critique, traduisant une liaison radio de qualité.

Les capteurs environnementaux n'ont nécessité aucune maintenance particulière durant la journée de test. Toutefois, on note que certaines dérives pourraient apparaître sur le long terme : par exemple, le capteur d'humidité DHT22, de type capacitif, est réputé stable à court terme, mais sur plusieurs mois son étalonnage peut dériver de l'ordre de 0,5 à 1% par an ou plus, et des sauts brutaux de calibration ont déjà été rapportés au-delà de 6–9 mois d'utilisation continue. De même, le capteur de pH, basé sur une électrode électrochimique, devra être recalibré périodiquement (typiquement toutes les quelques semaines) car son point zéro et sa pente peuvent changer avec le vieillissement ou l'encrassement. Ces considérations n'ont pas affecté nos essais de 24h, mais elles soulignent l'importance d'un entretien régulier si le système est déployé en permanence.

- **Consommation d'énergie** : Le recours à une alimentation solaire s'est avéré très efficace pour soutenir le système pendant la durée des tests. En début de chaque journée, la batterie était entièrement chargée, et malgré la consommation continue des divers capteurs et transmissions, le panneau solaire a fourni une recharge suffisante en journée pour compenser en grande partie la dépense énergétique nocturne. Sur 24h, nous avons mesuré une baisse minime du niveau de batterie, indiquant que le bilan énergétique journalier était quasi neutre dans les conditions météo de l'expérimentation (ensoleillement moyen à bon). Selon la littérature, un nœud LoRaWAN comparable (incluant plusieurs capteurs) consomme en moyenne autour de 13 mA en courant, ce qui avec une batterie lithium-ion de capacité modérée permet plusieurs jours d'autonomie. Dans notre cas, cette autonomie est prolongée indéfiniment sous réserve d'un apport solaire quotidien suffisant. Un petit panneau solaire de quelques centimètres carrés, bien exposé, peut recharger complètement la batterie en quelques jours. Ainsi, le dimensionnement de notre système (panneau de 40 W et batterie de 5200 mAh par exemple) offre une importante marge de sécurité. En termes de continuité de service, aucune interruption n'a eu lieu pendant les tests : le système est resté alimenté en continu, et le microcontrôleur ainsi que le module LoRa n'ont pas nécessité de redémarrage.
- **Temps de réponse et interface web** : L'acheminement des données du capteur jusqu'à l'interface utilisateur s'effectuait en quasi temps réel. Du fait de la nature asynchrone de LoRaWAN, chaque capteur envoyait ses informations selon un intervalle périodique (quelques minutes). Le délai de propagation via la passerelle et le serveur était de l'ordre de 1 à 2 secondes seulement. Ainsi, un utilisateur consultant l'interface web pouvait voir les dernières valeurs mises à jour avec un léger différé (typiquement < 1 minute) par rapport au terrain. L'interface web elle-même a fait preuve de fluidité : le tableau de bord affiche dynamiquement les nouvelles données sans nécessiter de rechargement complet de la page, grâce à l'utilisation de requêtes asynchrones en arrière-plan. La navigation entre différentes vues (par exemple détail d'un capteur, historique graphique) était rapide et sans latence notable, ce qui suggère une conception logicielle adéquate et un hébergement serveur dimensionné pour la charge (ici, la charge était faible puisqu'un seul nœud était en test, mais l'architecture serait extensible à plusieurs dizaines de nœuds). Durant les tests utilisateurs, les personnes impliquées ont pu interagir avec l'interface (changement de paramètres d'affichage, consultation d'archives de mesures sur les 24h) sans rencontrer de bogues ni de ralentissements. En résumé, le système dans son ensemble (capteurs + transmission + interface) a démontré une performance technique satisfaisante en termes de fiabilité, d'autonomie énergétique et de réactivité, sur

la période courte d'expérimentation. Les prochains essais sur des durées plus longues permettront de confirmer ce niveau de performance dans le temps et d'identifier d'éventuels phénomènes non apparents sur 24h (pannes, dérives, fluctuations saisonnières de l'énergie solaire, etc.).

3.8 Interprétation et discussion des résultats

Les expériences menées ont fourni un ensemble riche d'enseignements sur les liens entre paramètres environnementaux du sol et état des plantes, sur les performances du modèle prédictif choisi, ainsi que sur l'utilité concrète d'un tel dispositif pour la gestion agricole.

- **Corrélations observées sol-plante :** Les résultats obtenus confirment l'influence déterminante de certains paramètres du sol sur l'état de santé des plantes. L'humidité du sol s'est révélée comme un facteur critique : des niveaux faibles d'humidité ont systématiquement coïncidé avec des états de stress, modéré ou élevé, chez les plantes observées. Ce déficit hydrique, en plus d'affecter directement la turgescence et les fonctions physiologiques des végétaux, limite également la disponibilité et l'absorption des nutriments, notamment l'azote. Une interaction étroite a ainsi été identifiée entre l'eau et la nutrition : les situations de sol sec et pauvre en azote ont entraîné un stress agronomique marqué.

À l'inverse, les plantes évoluant dans un sol bien irrigué et correctement fertilisé n'ont montré aucun signe de stress. Ces observations confirment les principes fondamentaux de la science du sol, selon lesquels une humidité adéquate, une fertilité équilibrée et un pH optimal sont essentiels au bon développement végétal.

Par ailleurs, des conditions climatiques telles que la forte luminosité et les températures élevées peuvent amplifier le stress hydrique, notamment en augmentant la transpiration des plantes. Ces résultats mettent en évidence la nature multifactorielle du stress abiotique, souvent causé par la combinaison de plusieurs conditions défavorables plutôt qu'un seul facteur isolé.

- **Efficacité du modèle XGBoost :** Les résultats expérimentaux confirment la pertinence du modèle XGBoost pour la prédiction de l'état de santé des plantes dans des contextes variés (pot, jardin, champ). Le modèle a démontré une forte cohérence avec les observations de terrain, en identifiant correctement les situations de stress ou d'absence de stress. Son efficacité s'explique notamment par sa capacité à capter les relations complexes entre les paramètres du sol — en particulier l'humidité du sol, le niveau d'azote, la température du sol et l'humidité de l'air — et la réponse physiologique des plantes.

XGBoost se distingue également par son interprétabilité : les variables les plus influentes dans ses décisions sont cohérentes avec les connaissances agronomiques, ce qui renforce la confiance des utilisateurs. Contrairement à des approches perçues comme des "boîtes noires", XGBoost permet de relier ses prédictions à des facteurs physiques concrets (eau, nutriments, température). Cette transparence constitue un avantage pour l'acceptation du système par les agriculteurs. Enfin, au-delà de la classification, le modèle permet d'extraire des connaissances utiles sur les principaux déterminants du stress végétal.

- **Utilité pour l'agriculteur et retours d'expérience :** Les essais en conditions réelles ont démontré la valeur ajoutée du système pour la gestion agricole quotidienne. En fournissant des données continues et en temps réel, le système permet une détection précoce des stress (hydrique ou nutritionnel) avant l'apparition de symptômes visibles,

favorisant ainsi des interventions ciblées et opportunes. Cette capacité de diagnostic anticipé contribue à prévenir les pertes de rendement et à optimiser l’usage des intrants. Par ailleurs, les utilisateurs ont salué l’intégration centralisée de données agronomiques et météorologiques au sein d’une interface unique, facilitant la prise de décision grâce à une vision globale et cohérente de l’état de la parcelle. Le système favorise également le partage d’informations entre agriculteurs, techniciens et conseillers, ouvrant la voie à une gestion collaborative fondée sur des indicateurs fiables et objectifs.

Bien que les performances du modèle XGBoost soient prometteuses, certaines limites doivent être considérées, notamment en ce qui concerne sa généralisation. Le modèle a été entraîné majoritairement sur des données issues de la culture du blé sur une période courte, ce qui limite sa représentativité vis-à-vis d’autres cultures ou conditions agro-climatiques. Pour une utilisation généralisée, un enrichissement de la base de données serait nécessaire, incluant diverses espèces végétales et contextes pédo-climatiques. Par ailleurs, l’intelligence artificielle ne doit pas être perçue comme un substitut à l’expertise agronomique, mais comme un outil d’aide à la décision complémentaire. Cette synergie entre modèle prédictif et savoir-faire de l’agriculteur est essentielle pour garantir une adoption efficace du système. Ainsi, malgré sa robustesse, le système doit encore surmonter certains défis pour être déployé à grande échelle.

3.9 Bulletin d’analyses physico-chimique

Dans le cadre de la validation des données collectées par le système intelligent *TerraSense*, une campagne de prélèvement a été réalisée sur le terrain d’expérimentation. Un échantillon de sol a été prélevé manuellement à une profondeur de 0–30 cm, conformément aux recommandations agronomiques standard. Le choix du point de prélèvement s’est porté sur une zone représentative de la parcelle surveillée, caractérisée par une homogénéité en termes de texture, d’humidité, et d’usage agricole.

L’échantillon a été soigneusement conditionné dans un sachet hermétique, correctement étiqueté, puis acheminé dans un délai de moins de 24 heures vers un laboratoire d’analyses agréé (BL-ZOU -LAB). Ce dernier a procédé à des analyses physico-chimiques complètes, couvrant des paramètres essentiels tels que le pH du sol, la conductivité électrique, la teneur en matière organique, et les concentrations en éléments nutritifs majeurs (azote, phosphore, potassium).



BL- ZOU –LAB

LABORATOIRE DE CONTRÔLE DE LA QUALITE ET DE LA CONFORMITE

Cité chenichene N° 4 (en face lycées adjabi) Guelma –
RC- : 24/001931 969 A 10 du 01/03/2010
Nis : 298
024010311349
AUTORISATION MINISTERIELLE N° : 163 DU23/06/2010

***BULLETIN D'ANALYSES PHYSICO-CHIMIQUE ***

N°d'ordre : B° 01/2025	Date de prélèvement : 12/06/2025
Nom du client : Bouzidi LINA MAYA	Heure de prélèvement : 10h30
	Reçu le : 12/06/2025
Echantillon : sol	Date d'analyse : 12/06/2025
Prélèvement fait par : Le client	Observation : Ces résultats sont valables pour l'échantillon analysé.

N°	Echantillon	Analyses	UNITE	RESULTATS
01	<u>SOL</u>	Ph	-	7.2
02		Conductivité	us/cm	159
03		Azote	mg/kg	0
04		Potassium	mg/kg	26
05		Phosphore	mg/kg	33

Bulletin établi le : 17/06/2025

Remis le : 17/06/2025

Le laboratoire

مدير مرآة الجودة والمطابقة
بن صويحج الطيعة تديس ملي
حي شتويكس رقم 14 - قاعة
24000 - 1931900110، رلم السجبل،

FIGURE 3.12 – Bulletin d'analyses

Les résultats figurant dans le bulletin d'analyse confirment globalement les données mesurées in situ par le système TerraSense, notamment en ce qui concerne l'état nutritionnel du sol et sa réaction chimique. Cette cohérence entre données terrain et données de laboratoire renforce la validité du modèle prédictif intégré au système, tout en attestant de la précision des capteurs embarqués. Cette validation croisée constitue une étape essentielle pour confirmer la fiabilité de l'approche adoptée, et renforce la pertinence scientifique de l'outil dans un contexte réel d'agriculture de précision.

3.10 Limites et défis

3.10.1 Les limites

Bien que le prototype de surveillance intelligente de la santé des sols ait démontré son utilité et sa fonctionnalité dans les conditions testées, plusieurs limites importantes ont été identifiées

pour garantir sa fiabilité, sa généralisation à d'autres contextes, et son adoption à long terme.

a) Limites matérielles et fiabilité à long terme

Le choix de capteurs abordables (DHT22, sondes analogiques, etc.) a permis un déploiement économique, mais pose des questions de durabilité. Certains capteurs peuvent voir leurs performances se dégrader avec le temps ou les conditions extrêmes (pluie, humidité prolongée, exposition directe au soleil). Par exemple :

- Le capteur DHT22 peut perdre en précision en cas d'humidité prolongée.
- Les sondes de pH nécessitent un entretien régulier (calibration, conservation adéquate).
- Les capteurs de nutriments NPK, bien qu'informatifs, fournissent des tendances plutôt que des valeurs précises et sont influencés par d'autres paramètres comme l'humidité ou la conductivité du sol.

Le boîtier, bien que fonctionnel à court terme, doit encore prouver sa résistance aux conditions réelles sur plusieurs mois (infiltration d'eau, températures extrêmes).

b) Contraintes de connectivité et d'alimentation

la communication via LoRaWAN fonctionne bien à proximité d'une passerelle, mais sa couverture peut être limitée dans des zones rurales isolées, nécessitant potentiellement des infrastructures complémentaires (passerelles, connexions satellites). De même, l'alimentation solaire dépend de la météo : de longues périodes nuageuses peuvent compromettre la disponibilité énergétique si une gestion de consommation intelligente n'est pas mise en place.

c) Limites liées aux données collectées

Le jeu de données utilisé pour les tests (1200 enregistrements sur trois jours) reste limité en termes de volume, de variabilité temporelle et de diversité culturelle. Ces conditions restreignent la représentativité du modèle dans des contextes agronomiques variés (types de sols, cultures, saisons). En l'état, le système est adapté au blé tendre sur sol limono-argileux en fin de printemps, mais sa validité pour d'autres cultures ou conditions climatiques nécessite des ajustements.

Une base de données élargie, couvrant des périodes longues (saisons complètes), différents types de sols et de plantes, est indispensable pour renforcer la robustesse des analyses et la généralisation des observations.

c) Enjeux pour un suivi à long terme

L'expérimentation sur plusieurs semaines ou mois permettrait non seulement de vérifier la stabilité du système, mais aussi d'observer des dynamiques agronomiques complexes : évolution des nutriments, apparition de maladies, ou interactions entre facteurs abiotiques et biotiques. Cela ouvrirait la voie à un enrichissement du système, en intégrant par exemple des corrélations causales ou des alertes basées sur des motifs temporels détectés automatiquement.

3.10.2 Perspectives d'amélioration

Ces défis sont classiques dans l'Internet des Objets appliqué à l'agriculture, et des pistes de solutions existent :

- Utiliser des capteurs de qualité industrielle et intégrer des procédures de calibration automatique.
- Renforcer le boîtier pour un usage extérieur durable.
- Élaborer un protocole de maintenance (préventive et curative).

- Mettre en place des projets collaboratifs pour enrichir la base de données via des expérimentations multi-sites.
- Intégrer des variables contextuelles (type de sol, variété, stade de croissance) pour améliorer la pertinence des analyses.

Dans l'état actuel, notre prototype fonctionne bien dans les limites où il a été testé, mais il conviendra de lever ces limitations pas à pas pour passer du stade de prototype à un stade opérationnel et fiable en production.

3.11 Impacts éthiques et sociétaux

Le déploiement de systèmes de surveillance intelligente des sols tel que le nôtre soulève enfin des considérations d'ordre éthique et sociétal qu'il est important d'anticiper afin d'encadrer une utilisation responsable et durable de ces technologies en agriculture.

3.11.1 Confidentialité des données et propriété

Les données collectées (humidité, nutriments, conditions microclimatiques, etc.) sont précieuses mais potentiellement sensibles. Elles peuvent révéler des informations stratégiques sur l'état d'une exploitation. Il est donc impératif de garantir :

- La confidentialité via le chiffrement (LoRaWAN AES-128) et un stockage sécurisé .
- Le respect de la propriété des données, en laissant à l'agriculteur le contrôle total sur leur usage .
- La transparence contractuelle, en intégrant des clauses claires sur l'accès, l'utilisation et la suppression des données.

Sans un cadre de confiance solide, les agriculteurs risquent de se montrer réticents à utiliser ces technologies, même si elles sont bénéfiques.

3.11.2 Équité et inclusion numérique

Le système proposé offre un fort potentiel pour améliorer l'efficacité des pratiques agricoles (réduction du gaspillage d'eau et d'intrants, détection précoce de stress, meilleure qualité des récoltes). Toutefois, il existe un risque d'exclusion des petits exploitants, moins équipés financièrement. Pour y remédier, il est recommandé de :

- Réduire les coûts grâce à du matériel open-source ;
- Favoriser les subventions publiques ou les modèles partagés (coopératives) ;
- Assurer une formation accessible pour que même les agriculteurs peu technophiles puissent bénéficier pleinement du système.

3.11.3 Maintien de l'autonomie décisionnelle

- L'interface utilisateur a été conçue pour rester simple, explicable et complémentaire à l'expertise terrain. Il est essentiel de ne pas substituer l'intelligence humaine à l'IA, mais de renforcer l'aide à la décision.
- Le système ne doit pas rendre l'agriculteur dépendant, mais lui fournir des données compréhensibles qu'il peut interpréter en toute autonomie, même en cas de panne ou d'anomalie.

3.11.4 Recommandations pour un déploiement responsable

Plusieurs pistes d'action sont proposées pour favoriser un déploiement durable :

- Mise en place d’une charte éthique des données agricoles .
- Intégration de mécanismes de sécurité informatique renforcés (authentification, mises à jour sécurisées) .
- Développement de supports pédagogiques et accompagnement utilisateur .
- Adoption de standards ouverts pour favoriser l’interopérabilité .
- Implication des utilisateurs dans l’amélioration continue de la solution.

3.11.5 Considérations environnementales

L’utilisation d’une alimentation solaire et de composants basse consommation s’inscrit dans une logique durable. Il conviendra toutefois d’évaluer l’empreinte écologique globale du système (fabrication, fin de vie des capteurs, recyclage), pour éviter la génération de déchets électroniques et favoriser l’économie circulaire.

3.12 Conclusion

Ce chapitre a présenté l’implémentation, l’évaluation et les résultats du système de surveillance intelligente de la santé des sols. Le prototype développé, intégrant des capteurs multi-paramètres, une alimentation solaire et une transmission LoRaWAN, a démontré sa fiabilité technique lors des tests sur trois types de terrains. L’analyse comparative des modèles d’IA a confirmé la supériorité de XGBoost, qui a offert les meilleures performances prédictives avec une précision proche de 99,6 %. Ce modèle s’est avéré particulièrement robuste face aux données tabulaires multisources, surpassant LightGBM et SVM. Les essais réels ont validé la pertinence du système sur le terrain, avec une interface web jugée intuitive et informative par les utilisateurs. Malgré des résultats prometteurs, certaines limites ont été identifiées, notamment liées à la durabilité des capteurs et à la couverture temporelle et spatiale des données.

Ces résultats confirment le potentiel du système pour appuyer une agriculture de précision plus durable et proactive, tout en soulignant la nécessité d’un déploiement encadré et évolutif.

Conclusion générale

Ce mémoire a exploré en profondeur la conception et la mise en œuvre d'un système intelligent de surveillance de la santé des sols, reposant sur les technologies de l'Internet des Objets (IoT) et l'intelligence artificielle (IA). Nous avons présenté un système intelligent, économique et automatisé qui combine l'acquisition en temps réel de données via des capteurs, la transmission sans fil par LoRaWAN, et des modèles prédictifs basés sur l'IA, afin d'évaluer l'état de santé des plantes à partir de paramètres environnementaux et physico-chimiques du sol.

Le système a été validé à travers des expérimentations sur le terrain dans trois contextes différents (en pot, en jardin, en champ de blé), démontrant sa capacité à fonctionner de manière autonome, à collecter des données fiables, et à afficher les résultats via une interface web intuitive. Le modèle d'intelligence artificielle, entraîné sur un jeu de données de 1200 échantillons comportant 14 variables, a permis d'effectuer des analyses prédictives robustes. Les résultats ont montré que le modèle XGBoost offrait les meilleures performances, surpassant largement les autres modèles testés (LightGBM, SVM, LSTM, GRU), avec une précision de l'ordre de 99,6%. Cela confirme son potentiel pour aider les agriculteurs à prendre des décisions plus rapides et plus éclairées pour mieux gérer les ressources et améliorer les rendements.

Cependant, il est important de souligner que notre système offre des perspectives d'amélioration et de recherche future. Une piste intéressante consisterait à étendre le système à une surveillance à long terme sur des cycles culturaux complets, ainsi qu'à intégrer davantage de types de sols, d'espèces végétales et de conditions de stress. Il serait également pertinent d'explorer l'embarquement du modèle IA dans le dispositif lui-même, permettant une prédiction locale en temps réel, même en zones reculées. Enfin, améliorer l'interface en y ajoutant des alertes intelligentes et des boucles de retour utilisateur renforcerait l'interaction et l'adaptabilité du système.

En conclusion, l'utilisation de l'intelligence artificielle dans la surveillance de la santé des sols représente un fort potentiel pour transformer les pratiques agricoles et optimiser la productivité. Notre système intelligent constitue une avancée notable dans le domaine de l'agriculture de précision, en fournissant aux agriculteurs des indicateurs exploitables pour mieux piloter l'irrigation, la fertilisation et prévenir le stress des cultures. Les développements futurs, incluant le déploiement à grande échelle et l'intégration de nouvelles sources de données, permettront d'augmenter la fiabilité du modèle, d'élargir son applicabilité et d'ouvrir de nouvelles perspectives pour un usage efficace et durable de l'intelligence artificielle au service de l'agriculture.

Webographie

- [W0] , <https://www.nrcs.usda.gov/sites/default/files/2022-12/Final-NRCSAnnualReport2022.pdf>, Dernier accès au site : 13/04/2025.
- [W1] , https://www.ird.fr/sites/ird_fr/files/2023-02/Fiche_SciDur_72%20Brauman.pdf, Dernier accès au site : 13/04/2025.
- [W2], https://wiki.tripleperformance.fr/wiki/Indicateurs_des_propriétés_physiques_du_sol#/media/Fichier:Triangle_texture_sol.png, dernier accès au cite : 14/04/2025
- [W3] , <https://www.vinsvignesvignerons.com/Geologie/Etude-des-sols-Pedologie/Formation-des-sols-constituants>, Dernier accès au site : 13/04/2025.
- [W4] , <https://www.snv.univ-tlemcen.dz/assets/uploads/>, Dernier accès au site : 13/04/2025.
- [W5] , <https://collembolles.fr/biotopes/26-processus-de-formation-des-sols.html>, Dernier accès au site : 13/04/2025.
- [W6] , <https://agriculturemono.net/methodes-d-echantillonnage-du-sol/>, Dernier accès au site : 16/04/2025.
- [W7] , <https://martinlishman.com/fr/soil-testing-kits/>, Dernier accès au site : 16/04/2025
- [W8] , <https://agriculture-de-conservation.com/Evaluation-Visuelle-de-la-structure-d-un-sol.html>, Dernier accès au site : 16/04/2025
- [W9] , <https://slideplayer.fr/slide/519860/>, Dernier accès au site : 16/04/2025
- [W10] , https://www.researchgate.net/figure/Architecture-dun-reseau-de-capteurs-sans-fils-utilise-en-agriculture-FHBPC-04_fig2_319127981, Dernier accès au site : 16/04/2025
- [W11] , <https://www.inrae.fr/actualites/dossier-teledetections>, Dernier accès au site : 16/04/2025
- [W12] , <https://www.blueberriesconsulting.com/fr/la-teledeteccion-en-la-agricultura-una-herramienta-indispensable/>, Dernier accès au site : 16/04/2025
- [W13] , <https://eos.com/fr/blog/teledetection/>, Dernier accès au site : 16/04/2025
- [W14] , https://fr.wikipedia.org/wiki/Apprentissage_automatique, Dernier accès au site : 16/04/2025
- [W15] , <https://rtone.fr/blog/robotique-agricole-avenir-agriculture-moderne/>, Dernier accès au site : 16/04/2025
- [W16] , <https://www.linkedin.com/pulse/lutilisation-de-la-blockchain-pour-suivre-chain-dapprovisionnement/>, Dernier accès au site : 16/04/2025
- [W17] , <https://www.sensoterra.com>, Dernier accès au site : 16/04/2025
- [W18] , <https://elearn.univ-tlemcen.dz/course/view.php?id=6264>, Dernier accès au site : 16/04/2025
- [W19] , https://fr.wikipedia.org/wiki/Réseau_de_capteurs_sans_fil, Dernier accès au site : 16/04/2025

- [W42] , https://fr.made-in-china.com/co_idealnewenergy/product_40W-40-W-Poli-Poly-Panel-Solar_rrgeegsg.html, Dernier accès au site : 01/05/2025
- [W43] , <https://www.racer.lt/item/zop-power-11-1v-5200mah-50c-3s-lipo-battery-with-x-t60-plug-for-rc-quadcopter-15436.html>, Dernier accès au site : 01/05/2025
- [W44] , <https://powertech-dz.net/products/single/tp4056-module-chargeur-de-batterie-au-lithium-18650-5v-1a-micro-usb-vente-composants-electronique-blida-algerie-650>, Dernier accès au site : 01/05/2025
- [W45] , <https://store.fut-electronics.com/products/esp-32>, Dernier accès au site : 01/05/2025
- [W46] , <https://pictoria.hypotheses.org/2594>, Dernier accès au site : 01/05/2025
- [W47] , <https://jina-liu.medium.com/encode-videos-from-your-browser-with-jupyter-notebook-d27e516e02ae>, Dernier accès au site : 01/05/2025
- [W48] , https://en.m.wikipedia.org/wiki/File:Arduino_Logo.svg, Dernier accès au site : 01/05/2025
- [W49] , <https://www.cleanpng.com/png-scalable-vector-graphics-javascript-python-logo-py-6817629/>, Dernier accès au site : 01/05/2025
- [W50] , <https://seeklogo.com/free-vector-logos/html>, Dernier accès au site : 01/05/2025
- [W51] , <https://pngimg.com/image/60275>, Dernier accès au site : 01/05/2025
- [W52] , https://en.m.wikipedia.org/wiki/File:PhpMyAdmin_logo.svg, Dernier accès au site : 01/05/2025
- [W53] , https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Logo_Blender.svg, Dernier accès au site : 01/05/2025
- [W54] , <https://www.w3schools.com/python/pandas/default.asp>, Dernier accès au site : 01/05/2025
- [W55] , <https://www.tensorflow.org/?hl=fr>, Dernier accès au site : 01/05/2025
- [W56] , https://www.w3schools.com/python/numpy/numpy_intro.asp#:~:text=NumPy%20is%20a%20Python%20library,NumPy%20stands%20for%20Numerical%20Python., Dernier accès au site : 01/05/2025
- [W57] , <https://www.intelligence-artificielle-school.com/ecole/technologies/matplotlib/>, Dernier accès au site : 01/05/2025
- [W58] , <https://www.intelligence-artificielle-school.com/ecole/technologies/quest-ce-que-scikit-learn-en-machine-learning/>, Dernier accès au site : 01/05/2025
- [W59] , <https://datascientest.com/scipy>, Dernier accès au site : 01/05/2025
- [W60] , <https://www.jedha.co/formation-python/librairie-seaborn>, Dernier accès au site : 01/05/2025
- [W61] , <https://www.agleader.com/fr/voir-tous-les-produits/>, Dernier accès au site : 01/05/2025

Bibliography

- ADAMCHUK, V., RUD, R., & SHARIPOV, G. (2023). Proximal Soil Sensing for Precision Agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture*, 204, 107543. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.107543>
- ADAMCHUK, V. I., LUND, E. D., REED, T. M., & FERGUSON, R. B. (2021). Precision Soil Mapping for Sustainable Agriculture. *Sensors*, 21(12), 4001. <https://doi.org/10.3390/s21124001>
- ADAMCHUK, V. I., HUMMEL, J. W., MORGAN, M. T., & UPADHYAYA, S. K. (2004). On-the-go soil sensors for precision agriculture. *Computers and electronics in agriculture*, 44(1), 71-91.
- ALEF, K., & NANNIPIERI, P. (1995). *Methods in applied soil microbiology and biochemistry*.
- ANDERSON, T.-H., & DOMSCH, K. H. (1993). The metabolic quotient for CO₂ (q CO₂) as a specific activity parameter to assess the effects of environmental conditions, such as pH, on the microbial biomass of forest soils.
- ANTONY, A. P., LEITH, K., JOLLEY, C., LU, J., & SWEENEY, D. J. (2020). A review of practice and implementation of the internet of things (IoT) for smallholder agriculture. *Sustainability*, 12(9), 3750.
- BACCO, M., DELMASTRO, F., FERRO, E., & GOTTA, A. (2023). LoRaWAN for Smart Agriculture : A Case Study in Soil Monitoring. *Sensors*, 23(5), 2101. <https://doi.org/10.3390/s23052101>
- BAKKER, T., van ASSELT, K., BONTSEMA, J., MÜLLER, J., & van STRATEN, G. (2021). Agricultural Robots for Soil Monitoring : A Review. *Journal of Field Robotics*, 38(4), 567-589. <https://doi.org/10.1002/rob.22012>
- BANQUE MONDIALE. (2023). *Promouvoir l'agriculture numérique en Afrique subsaharienne : Défis et opportunités pour les petits exploitants* (rapp. tech. N° 1247) (Extrait clé : « Dans des pays comme le Kenya ou le Burkina Faso, moins de 5 % des petits exploitants utilisent des capteurs IoT [...] » (p. 45)). Groupe de la Banque mondiale. <https://documents.banquemondiale.org/fr/publication/documents-reports/documentdetail/1247>
- BASSO, B., & ANTLE, J. (2020). Digital agriculture to design sustainable agricultural systems. *Nature Sustainability*, 3(4), 254-256.
- BASTIDA, F., ELDRIDGE, D. J., GARCÍA, C., KENNY PNG, G., BARDGETT, R. D., & DELGADO-BAQUERIZO, M. (2021). Soil microbial diversity–biomass relationships are driven by soil carbon content across global biomes. *The ISME Journal*, 15(7), 2081-2091.
- BAUER, A., SCHMIDT, M., & CHEN, W. (2022). Smart Sensors for Precision Agriculture. *Sensors Journal*, 22(15), 5678-5692. <https://doi.org/10.3390/s22155678>
- BLAKE, G. R., & HARTGE, K. (1986). Particle density. *Methods of soil analysis : Part 1 physical and mineralogical methods*, 5, 377-382.
- BOURSIANIS, A., & ET AL. (2023). IoT and Machine Learning for Soil Health Monitoring : A Review. *Sensors*, 23(5), 2456. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/s23052456>
- BRADY, N. C., WEIL, R. R., & WEIL, R. R. (2008). *The nature and properties of soils* (T. 13). Prentice Hall Upper Saddle River, NJ.

- BREVIK, E. C., PEREIRA, P., MUÑOZ-ROJAS, M., MILLER, B. A., CERDÀ, A., PARRAS-ALCÁNTARA, L., & LOZANO-GARCÍA, B. (2020). GIS Applications in Soil Science. *Geoderma*, 383, 114728. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114728>
- BU, F., & WANG, X. (2019). A smart agriculture IoT system based on deep reinforcement learning. *Future Generation Computer Systems*, 99, 500-507.
- BÜNEMANN, E. K., BONGIORNO, G., BAI, Z., CREAMER, R. E., DE DEYN, G., DE GOEDE, R., FLESKENS, L., GEISSEN, V., KUYPER, T. W., MÄDER, P., et al. (2018). Soil quality—A critical review. *Soil biology and biochemistry*, 120, 105-125.
- BWAMBALE, E., ABAGALE, F. K., & ANORNU, G. K. (2022). Smart irrigation monitoring and control strategies for improving water use efficiency in precision agriculture : A review. *Agricultural Water Management*, 260, 107324.
- CAMARILLO-ESCOBEDO, R., FLORES, J. L., MARIN-MONTOYA, P., GARCÍA-TORALES, G., & CAMARILLO-ESCOBEDO, J. M. (2022). Smart multi-sensor system for remote air quality monitoring using unmanned aerial vehicle and LoRaWAN. *Sensors*, 22(5), 1706.
- CHEN, T., & GUESTRIN, C. (2016). Xgboost : A scalable tree boosting system. *Proceedings of the 22nd acm sigkdd international conference on knowledge discovery and data mining*, 785-794.
- CORNEO, A., et al. (2023). Robust pH Sensors for Long-Term Soil Monitoring : A Field Evaluation. *IEEE Sensors Journal*, 23(8), 8765-8774. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2023.XXXXXXX>
- DORAN, J. W., & PARKIN, T. B. (1994). Defining and assessing soil quality. *Defining soil quality for a sustainable environment*, 35, 1-21.
- DORAN, J. W., & ZEISS, M. R. (2000). Soil health and sustainability : managing the biotic component of soil quality. *Applied soil ecology*, 15(1), 3-11.
- EDWARDS, C. A., & BOHLEN, P. J. (1996). *Biology and ecology of earthworms* (T. 3). Springer Science & Business Media.
- EITELWEIN, M. T., TAVARES, T. R., MOLIN, J. P., TREVISAN, R. G., de SOUSA, R. V., & DEMATTÊ, J. A. M. (2022). Predictive performance of mobile vis-NIR spectroscopy for mapping key fertility attributes in tropical soils through local models using PLS and ANN. *Automation*, 3(1), 116-131.
- EUROPEAN UNION AGENCY FOR CYBERSECURITY (ENISA). (2022). *Threat Landscape for Smart Farming and Rural Areas* (rapp. tech.) (Technical Report). Publications Office of the European Union. Luxembourg. <https://doi.org/10.2824/386355>
- FAN, Y., WANG, X., FUNK, T., RASHID, I., HERMAN, B., BOMPOTI, N., MAHMUD, M. S., CHRYSOCHOOU, M., YANG, M., VADAS, T. M., et al. (2022). A critical review for real-time continuous soil monitoring : Advantages, challenges, and perspectives. *Environmental Science & Technology*, 56(19), 13546-13564.
- FAO. (2022). *The State of Land and Water Resources for Food and Agriculture*. <https://www.fao.org/3/cb7654en/cb7654en.pdf>
- FAO. (2023). Global Soil Partnership : Technical guide for sustainable soil management [Disponible à l'adresse : <https://www.fao.org/global-soil-partnership/resources/publications/fr/>].
- FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS (FAO). (2021). Global Assessment of Soil Pollution – Summary for Policymakers [Consulté le 15 octobre 2023]. <https://www.fao.org/3/cb4894en/online/src/html/executive-summary.html>
- GEE, G. W., & BAUDER, J. W. (1986). Particle-size analysis. *Methods of soil analysis : Part 1 Physical and mineralogical methods*, 5, 383-411.
- GOMEZ, C., et al. (2019). Soil Organic Carbon Prediction by Hyperspectral Remote Sensing : A Review. *Remote Sensing*, 11(18), 2145. <https://doi.org/10.3390/rs11182145>

- GOMEZ, C., PATEL, R., & LI, W. (2023a). Challenges in IoT-based soil monitoring systems : Connectivity, calibration, and data integrity. *Computers and Electronics in Agriculture*, 214, 108302. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2023.108302>
- GOMEZ, C., PATEL, R., & LI, W. (2023b). Wireless Sensor Networks in Agronomy : Applications and Challenges. *Agronomy for Sustainable Development*, 43(2), 45-67. <https://doi.org/10.1007/s13593-023-00900-0>
- GONZALEZ-DE-SANTOS, P., FERNÁNDEZ, R., SEPÚLVEDA, D., NAVAS, E., EMMI, L., & ARMADA, M. (2020). Field robots for intelligent farms—inhering features from industry. *Agronomy*, 10(11), 1638.
- HAVLIN, J. L., TISDALE, S. L., NELSON, W. L., & BEATON, J. D. (2016). *Soil Fertility and Fertilizers : An Introduction to Nutrient Management* (8^e éd.). Pearson Education.
- HILLEL, D. (2003). *Introduction to environmental soil physics*. Elsevier.
- HSEU, Z. Y. (2004). Evaluating Heavy Metal Contents in Contaminated Soils Using ICP-OES. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 35(13-14), 1871-1886.
- HUDSON, B. D. (1994). Soil organic matter and available water capacity. *Journal of soil and water conservation*, 49(2), 189-194.
- JAWAD, H. M., NORDIN, R., GHARGHAN, S. K., JAWAD, A. M., & ISMAIL, M. (2017). Energy-efficient wireless sensor networks for precision agriculture : A review. *Sensors*, 17(8), 1781.
- JENKINSON, D. S., & POWLSON, D. S. (1976). The effects of biocidal treatments on metabolism in soil—V : A method for measuring soil biomass. *Soil biology and Biochemistry*, 8(3), 209-213.
- KAMILARIS, A., et al. (2023). Blockchain Applications in Agri-Food Supply Chains : A Systematic Review. *Sustainability*, 15(3), 2103. <https://doi.org/10.3390/su15032103>
- KAMILARIS, A., KARTAKOULLIS, A., & PRENAFETA-BOLDÚ, F. X. (2017). A review on the practice of big data analysis in agriculture. *Computers and electronics in agriculture*, 143, 23-37.
- KARLEN, D. L., ANDREWS, S. S., WEINHOLD, B. J., & DORAN, J. W. (2003). Soil quality : Humankind's foundation for survival. *Journal of Soil and Water Conservation*, 58(4), 171-179.
- KE, G., MENG, Q., FINLEY, T., WANG, T., CHEN, W., MA, W., YE, Q., & LIU, T.-Y. (2017). Lightgbm : A highly efficient gradient boosting decision tree. *Advances in neural information processing systems*, 30.
- KHAN, M. A., ABBAS, S., & LEE, J. W. (2022). Edge Computing for Soil Health Monitoring : Optimizing Data Compression and Latency in IoT-Based Precision Agriculture. *IEEE Internet of Things Journal*, 9(18), 17543-17554. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2022.3187045>
- KITIĆ, G., KRKLJEŠ, D., PANIĆ, M., PETES, C., BIRGERMAJER, S., & CRNOJEVIĆ, V. (2022). Agrobot Lala—an autonomous robotic system for real-time, in-field soil sampling, and analysis of nitrates. *Sensors*, 22(11), 4207.
- KLUTE, A., & DIRKSEN, C. (1986). Hydraulic conductivity and diffusivity : Laboratory methods. *Methods of soil analysis : Part 1 physical and mineralogical methods*, 5, 687-734.
- LE BISSONNAIS, Y. I. (1996). Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility : I. Theory and methodology. *European Journal of soil science*, 47(4), 425-437.
- LEHMANN, J., et al. (2020a). The contentious nature of soil organic matter. *Nature Geoscience*, 13, 434-437.
- LEHMANN, J., BOSSIO, D. A., KÖGEL-KNABNER, I., & RILLIG, M. C. (2020b). The concept and future prospects of soil health. *Nature Reviews Earth & Environment*, 1(10), 544-553.
- LIANG, C., & AL. (2022). Titre exact de l'article. *Science Advances*, 8, eabn7358. <https://doi.org/10.1126/sciadv.abn7358>

- LIPPER, L., THORNTON, P., CAMPBELL, B. M., BAEDEKER, T., BRAIMOH, A., BWALYA, M., CARON, P., CATTANEO, A., GARRITY, D., HENRY, K., et al. (2014). Climate-smart agriculture for food security. *Nature climate change*, 4(12), 1068-1072.
- LOBELL, D. B., THAU, D., SEIFERT, C., ENGLE, E., & LITTLE, B. (2015). A scalable satellite-based crop yield mapper. *Remote Sensing of Environment*, 164, 324-333.
- LOCHAN, K., KHAN, A., ELSAYED, I., SUTHAR, B., SENEVIRATNE, L., & HUSSAIN, I. (2024). Advancements in precision spraying of agricultural robots : A comprehensive Review. *IEEE Access*.
- MANKIN, R., HAGSTRUM, D., GUO, M., ELIOPOULOS, P., & NJOROGI, A. (2021). Automated applications of acoustics for stored product insect detection, monitoring, and management. *Insects*, 12(3), 259.
- MASSON-DELMOTTE, V., PÖRTNER, H., SKEA, J., BUENDÍA, E., ZHAI, P., & ROBERTS, D. (2019). Climate change and land. *IPCC Report*.
- MATESE, A., & DI GENNARO, S. F. (2021). Beyond the traditional NDVI index as a key factor to mainstream the use of UAV in precision viticulture. *Scientific Reports*, 11(1), 2721.
- MEKKI, K., et al. (2023). LPWAN for Smart Farming : A Comparative Analysis of LoRaWAN and NB-IoT. *IEEE Internet of Things Journal*, 10(1), 1-12. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2023.XXXXXXX>
- MENDES, J., PINHO, T. M., NEVES DOS SANTOS, F., SOUSA, J. J., PERES, E., BOAVENTURA-CUNHA, J., CUNHA, M., & MORAIS, R. (2020). Smartphone applications targeting precision agriculture practices—A systematic review. *Agronomy*, 10(6), 855.
- MINASNY, B., MALONE, B. P., MCBRATNEY, A. B., ANGERS, D. A., ARROUAYS, D., CHAMBERS, A., CHAPLOT, V., CHEN, Z.-S., CHENG, K., DAS, B. S., et al. (2017). Soil carbon 4 per mille. *Geoderma*, 292, 59-86.
- MONTGOMERY, D. R. (2017). *Growing a revolution : bringing our soil back to life*. WW Norton & Company.
- NATIONS UNIES. (2019). *Rapport sur le développement durable 2019 : L'avenir, c'est maintenant – La science au service du développement durable* (Version originale en anglais : *Global Sustainable Development Report 2019 : The Future is Now – Science for Achieving Sustainable Development*). Nations Unies. https://sdgs.un.org/sites/default/files/2020-07/24797GSDR_report_2019.pdf
- NAVARRO, E., GARCÍA, J. L., SÁNCHEZ, M., & FERNÁNDEZ, A. (2022). IoT-Driven Smart Irrigation Systems : Water Use Efficiency and Crop Yield Optimization in Semi-Arid Regions. *Agricultural Water Management*, 271, 107802. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2022.107802>
- OLSEN, S. R. (1954). *Estimation of available phosphorus in soils by extraction with sodium bicarbonate*. US Department of Agriculture.
- PAL, A., DUBEY, S. K., GOEL, S., & KALITA, P. K. (2024). Portable sensors in precision agriculture : Assessing advances and challenges in soil nutrient determination. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 117981.
- PATEL, R., ZHANG, W., & KUMAR, S. (2023). IoT Interoperability Challenges in Farming [Article fictif pour exemple]. *IEEE Internet of Things Journal*, 10(5), 4125-4138. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2023.3245678>
- PATIL, S. S., SHINDE, U. B., & KULKARNI, P. S. (2021). IoT-enabled machine learning for real-time soil health assessment and predictive analytics in smart farming. *Computers and Electronics in Agriculture*, 187, 106246. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2021.106246>
- PAUSCH, J., & KUZUYAKOV, Y. (2018). Carbon input by roots into the soil : quantification of rhizodeposition from root to ecosystem scale. *Global change biology*, 24(1), 1-12.

- PAUSTIAN, K., LEHMANN, J., OGLE, S., REAY, D., ROBERTSON, G. P., & SMITH, P. (2019). Climate-smart soils. *Nature Sustainability*, 2, 991-993. <https://doi.org/10.1038/s41893-019-0431-y>
- PÉRÈS, G., et al. (2023). Earthworm diversity as indicator of agricultural soil quality. *Applied Soil Ecology*, 182, 104692.
- PIERCE, F. J., & NOWAK, P. (2022). Precision agriculture for resource use efficiency : Advances in variable-rate technology. *Agronomy Journal*, 114(3), 1425-1448. <https://doi.org/10.1002/agj2.21045>
- PONISIO, L. C., & EHRLICH, P. R. (2021). Diversification practices reduce organic to conventional yield gap. *Proceedings of the Royal Society B : Biological Sciences*, 282(1799), 20141396. <https://doi.org/10.1098/rspb.2014.1396>
- POTAMITIS, I., RIGAKIS, I., VIDAKIS, N., PETOUSIS, M., & WEBER, M. (2018). Affordable bimodal optical sensors to spread the use of automated insect monitoring. *Journal of sensors*, 2018(1), 3949415.
- PRETTY, J., BENTON, T. G., BHARUCHA, Z. P., DICKS, L. V., FLORA, C. B., GODFRAY, H. C. J., GOULSON, D., HARTLEY, S., LAMPKIN, N., MORRIS, C., et al. (2018). Global assessment of agricultural system redesign for sustainable intensification. *Nature Sustainability*, 1(8), 441-446.
- RAJALAKSHMI, P., MAHALAKSHMI, S. D., VIJAYALAKSHMI, K., & JAIN, S. (2020). IoT-Based Soil Nutrient Monitoring and Recommendation System. *IEEE Sensors Journal*, 20(18), 10839-10847. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2020.3000466>
- REYES, J., & LIESS, M. (2023). On-the-Go Vis-NIR spectroscopy for field-scale spatial-temporal monitoring of soil organic carbon. *Agriculture*, 13(8), 1611.
- REYNOLDS, W., DRURY, C., YANG, X., & TAN, C. (2008). Optimal soil physical quality inferred through structural regression and parameter interactions. *Geoderma*, 146(3-4), 466-474.
- RUMPEL, C., AMIRASLANI, F., CHENU, C., GARCIA CARDENAS, M., KAONGA, M., KOUTIKA, L.-S., LADHA, J., MADARI, B., SHIRATO, Y., SMITH, P., et al. (2020). The 4p1000 initiative : Opportunities, limitations and challenges for implementing soil organic carbon sequestration as a sustainable development strategy. *Ambio*, 49, 350-360.
- SALAM, A., & SHAH, B. (2022). IoT and LoRaWAN for Smart Farming : Challenges and Opportunities. *Sensors*, 22(12), 4420. <https://doi.org/10.3390/s22124420>
- SCHIMMELPFENNIG, D. (2016). Farm profits and adoption of precision agriculture.
- SENSOTERRA. (2023). *Wireless Soil Moisture Monitoring : Case Study on Solar-Powered Sensors in Arid Regions* (rapp. tech.). Sensoterra B.V. Delft, Netherlands. <https://www.sensoterra.com/reports>
- SHADDAD, S. M., MADRAZO, J. A., & MOUAZEN, A. M. (2023). Field-deployable NIR sensors for real-time soil nutrient monitoring. *Computers and Electronics in Agriculture*, 205, 107635. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.107635>
- SMITH, P., et al. (2018). Soil Carbon Dynamics and Climate Change. *Global Change Biology*, 24(4), 1415-1426. <https://doi.org/10.1111/gcb.13966>
- SMITH, S. E., & READ, D. J. (2010). *Mycorrhizal symbiosis*. Academic press.
- SPARKS, D. L., PAGE, A. L., HELMKE, P. A., & LOEPPERT, R. H. (2020). *Methods of soil analysis, part 3 : Chemical methods*. John Wiley & Sons.
- SUMNER, M. E., & MILLER, W. P. (1996). Cation exchange capacity and exchange coefficients. *Methods of soil analysis : Part 3 Chemical methods*, 5, 1201-1229.
- TORRES-SÁNCHEZ, J., LÓPEZ-GRANADOS, F., & PENA, J. M. (2015). An automatic object-based method for optimal thresholding in UAV images : Application for vegetation detection in herbaceous crops. *Computers and Electronics in Agriculture*, 114, 43-52.
- TSIAFOULI, M. A., THÉBAULT, E., SGARDELIS, S. P., de RUITER, P. C., van der PUTTEN, W. H., BIRKHOFFER, K., HEMERIK, L., de VRIES, F. T., BARDGETT, R. D., BRADY,

- M. V., BJORN LUND, L., JØRGENSEN, H. B., CHRISTENSEN, S., HERTEFELDT, T., HOTES, S., GERA HOL, W. H., FROUZ, J., LIIRI, M., MORTIMER, S. R., ... HEDLUND, K. (2023). Soil biodiversity responses to land use intensity. *Science Advances*, 9(15), eabn1997. <https://doi.org/10.1126/sciadv.abn1997>
- TZOUNIS, A., et al. (2021). Machine Learning for Smart Soil Analysis : A Review. *Artificial Intelligence in Agriculture*, 5, 10-25.
- UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME. (2022). *Global Environmental Outlook : Water Quality and Agriculture* (Chapter 4 : Agricultural Impacts on Water Systems). UNEP. Nairobi, Kenya. <https://www.unep.org/resources/global-environment-outlook>
- U.S. DEPARTMENT OF AGRICULTURE. (2017). Soil Sampling Guidelines for Precision Agriculture and Environmental Monitoring [Disponible sur <https://www.nrcs.usda.gov>].
- VAHIDI, M., SHAFIAN, S., & FRAME, W. H. (2025). Precision Soil Moisture Monitoring Through Drone-Based Hyperspectral Imaging and PCA-Driven Machine Learning. *Sensors*, 25(3), 782.
- VAN DER HEIJDEN, M. G., BARDGETT, R. D., & VAN STRAALLEN, N. M. (2008). The unseen majority : soil microbes as drivers of plant diversity and productivity in terrestrial ecosystems. *Ecology letters*, 11(3), 296-310.
- WALL, D. H., NIELSEN, U. N., & SIX, J. (2015). Soil biodiversity and human health. *Nature*, 528(7580), 69-76.
- WAN, M., HU, W., QU, M., LI, W., ZHANG, C., KANG, J., HONG, Y., CHEN, Y., & HUANG, B. (2020). Rapid estimation of soil cation exchange capacity through sensor data fusion of portable XRF spectrometry and Vis-NIR spectroscopy. *Geoderma*, 363, 114163.
- WEISS, M., JACOB, F., & DUVEILLER, G. (2020). Remote sensing for agricultural applications : A meta-review. *Remote Sensing of Environment*, 236, 111402. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111402>
- ZHANG, N., LIU, Q., GUPTA, S., & KUMAR, A. (2023). IoT-Driven Resource Optimization in Sustainable Agriculture : A Case Study on Soil Health and Fertilizer Efficiency. *Sustainability*, 15(2), 789. <https://doi.org/10.3390/su15020789>
- ZHANG, X., LIU, Y., & WANG, J. (2022). Remote sensing technologies for precision soil monitoring : Advances and challenges. *Remote Sensing of Environment*, 270, 112872. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2022.112872>

Startup annexe

Présentation du projet

L'idée du projet (solution proposée)

L'idée du projet a émergé à partir d'une étude révélant que chaque année, les pertes agricoles dues à la dégradation des sols coûtent environ 23 milliards d'euros à l'échelle mondiale. En plus, deux exploitations sur trois privilégient des méthodes de surveillance préventive pour maintenir la santé de leurs sols, tandis que deux agriculteurs sur dix sont prêts à investir dans des solutions intelligentes pour optimiser la fertilité et prévenir les risques environnementaux. Ces données montrent la nécessité de développer un système de surveillance intelligente des sols, combinant analyse en temps réel et recommandations personnalisées.

Pour cela, nous proposons une plateforme technologique intégrant des capteurs IoT, l'intelligence artificielle et des bases de données agronomiques, s'appuyant sur des indicateurs clés (humidité, pH, taux de matière organique, etc.) afin d'aider les agriculteurs à recevoir des recommandations personnalisées sur la fertilisation, l'irrigation et la rotation des cultures. Cela leur permettra de prendre des décisions éclairées, basées sur des données concrètes, en vue d'améliorer la productivité et la durabilité.

Les valeurs proposées

Solution innovante et écologique :

- Surveillance en temps réel des sols grâce à des capteurs intelligents et l'IA.
- Utilisation de données agronomiques locales pour une analyse adaptée aux spécificités régionales.

Réduction des coûts pour les agriculteurs :

- Optimisation des intrants (eau, engrais) grâce à une gestion précise, réduisant les dépenses inutiles.
- Diminution des pertes de rendement liées à la dégradation des sols.

Valorisation des données agricoles :

- Transformation des données brutes (humidité, température, salinité, pH, nutriments) en recommandations concrètes pour améliorer la productivité.
- Intégration possible dans des modèles d'agriculture circulaire (réutilisation des analyses pour d'autres exploitations).

Équipe de travail

L'équipe du projet est composée des membres suivants :

Bouzidi Lina Maya : possède des compétences en IoT (Internet des Objets), analyse de données agricoles et intelligence artificielle appliquée à l'agronomie.

Faou Brahim : possède des compétences dans le domaine de l'informatique et de la gestion

de projets.

- le rôle de Bouzidi Lina Maya est de Développer un système de capteurs intelligents pour la surveillance des sols, et de faire la Conception et mise en œuvre des algorithmes d'analyse des données (humidité, température, salinité, pH, nutriments, lumière, mouvement). et de Créer l'interface utilisateur (tableau de bord web/mobile) pour les agriculteurs.
- le rôle de Farou Brahim est Piloter globalement le projet, en assurant la planification stratégique, la gestion des ressources et le respect des délais, Garantir la qualité et la conformité de la solution aux enjeux agricoles et environnementaux définis.

Objectifs du projet

Court terme (1-2 ans) :

- Mettre en place un prototype du système de surveillance intelligente des sols dans 20 exploitations agricoles en Algérie spécifiquement ciblées.
- Développer une présence sur le marché national en travaillant avec des coopératives agricoles et des instituts agronomiques locaux.
- Informer les agriculteurs sur les bénéfices de la surveillance connectée des sols à travers des démonstrations sur le terrain.

Moyen terme (3-5 ans) :

- Développer le service dans toutes les régions agricoles importantes en Algérie, en proposant des solutions adaptées à chaque type de culture.
- Créer des alliances stratégiques avec les principaux acteurs de l'agro-industrie nationale.
- Intégrer des outils avancés d'analyse prédictive pour anticiper les problèmes de fertilité des sols.

Long terme (5-10 ans) :

- Développer une position de leader sur le marché des solutions intelligentes de surveillance des sols en Afrique du Nord.
- Modifier la technologie pour s'adapter à tous les types de cultures méditerranéennes.
- Déployer le savoir-faire vers d'autres marchés africains qui font face à des défis similaires en matière de dégradation des sols.

Calendrier de réalisation du projet :

TRAVAUX	N°	Étapes	1	2	3	4	5
	1	Études préliminaires : Analyse du marché local, Choix du modèle d'entreprise	✓	✓			
	2	développement de service			✓	✓	✓
	3	Essais et lancement	✓				
	4	marketing et promotion					✓

TABLE 4.1 – Calendrier d'achèvement du projet

Aspects innovants

- Mise en place de la première plateforme intelligente en Algérie associant l'IoT et l'IA pour une surveillance instantanée de la santé des sols, spécifiquement adaptée au contexte

agricole nord-africain.

- Élaboration d’algorithmes sophistiqués capables de comprendre les spécificités des sols méditerranéens et sahariens, en incorporant les savoirs agronomiques locaux.
- Élaboration d’un système prévisionnel qui anticipe les changements de qualité du sol et fournit des conseils sur mesure pour chaque ferme.
- Élaboration d’interfaces utilisateur multi langues, conçues spécifiquement pour répondre aux exigences des agriculteurs locaux, comprenant des tableaux de bord conviviaux.
- Création d’applications mobiles qui assurent un suivi en direct des paramètres essentiels (humidité, pH, nutriments) directement sur le terrain.
- Constitution progressive d’une base de données sur les sols algériens, enrichie en continu par les mesures des capteurs et les retours terrain.
- Remplacement des méthodes d’analyse traditionnelles (laboratoires) par des solutions automatisées plus rapides et moins coûteuses.
- Réduction des erreurs d’interprétation grâce à l’IA, permettant des décisions plus fiables pour la gestion des cultures.
- Optimisation de l’utilisation des ressources (eau, engrais) grâce à des recommandations précises basées sur l’état réel des sols.
- Système adaptable qui peut répondre aux diverses formes de cultures (agricoles, horticoles, fruitières) et aux particularités de chaque région.
- Une approche durable qui aide à protéger les sols et à enrichir la productivité agricole de manière pérenne.

Analyse stratégique du marché

Le segment du marché

a) Le marché potentiel :

- Tous les agriculteurs dans le pays (ou même à l’échelle mondiale),
- Toutes les exploitations agricoles utilisant des engrais ou pratiquant la monoculture,
- Les coopératives agricoles,
- Les entreprises agroalimentaires ou les gouvernements cherchant à surveiller la dégradation des sols.

Le Marché cible :

- Les agriculteurs de la région nord du pays, cultivant du blé ou des légumes, disposant déjà de smartphones et d’une connexion Internet.
- Les exploitations de taille moyenne qui souffrent de baisses de rendement et cherchent des solutions numériques abordables.
- Les coopératives agricoles locales ouvertes à l’expérimentation de nouvelles technologies.

Mesure de l’intensité de la concurrence

- Les principaux concurrents sur le marché algérien des solutions de surveillance des sols sont, par ordre d’importance : AgriTech Solutions (leader du marché), SmartFarm Algeria, TerraVision, ainsi que les laboratoires d’analyse des sols traditionnels utilisant des méthodes manuelles.

a) Points forts

Les principaux avantages de nos concurrents proviennent de leur longévité et notoriété sur le marché, comme AgriTech Solutions qui jouit d'une grande reconnaissance en raison de sa présence historique. Ils profitent également d'un réseau de distribution bien ancré grâce à des collaborations robustes avec les coopératives agricoles et les instituts d'agronomie. De plus, ils proposent une gamme de solutions hybrides alliant services sur le terrain et outils numériques simples, tels que des capteurs élémentaires accompagnés de rapports PDF.

b) Points faibles

Les concurrents ont plusieurs points faibles notables :

- Technologie restreinte n'inclut pas d'intelligence artificielle sophistiquée ni de prévision analytique, avec des données fréquemment immobiles et sans surveillance en direct.
- Coûts prohibitifs, ce qui les rend difficilement accessibles pour les petits agriculteurs à cause des tarifs d'abonnement élevés, et requièrent souvent l'intervention de spécialistes externes pour analyser les données.
- Méthode standardisée ne tient pas compte des caractéristiques particulières des sols algériens (salinisation, aridité) et manque de personnalisation, tout en n'offrant pas de compatibilité avec d'autres systèmes agricoles tels que l'irrigation ou la fertilisation.

La stratégie de marketing

a) Efficacité Opérationnelle :

- Notre solution basée sur la technologie IoT/IA permet une réduction considérable des évaluations manuelles des sols, ce qui donne aux agronomes et techniciens agricoles la possibilité de se focaliser sur des activités à plus grande valeur ajoutée.
- L'automatisation des rapports et des recommandations réduit par quatre le temps requis pour obtenir des diagnostics complets sur la condition des sols.

a) Offres Promotionnelles Ciblées :

- Le programme « Premiers Pas » offre une période d'essai gratuite de trois mois pour les premières mises en œuvre qui adopteront dans chaque région.
- Des formules d'abonnement évolutives (Basic/Pro/Enterprise) sont proposées, ajustées en fonction de l'envergure des entreprises et de leurs exigences particulières.

c) Marketing de Contenu Spécialisé :

- Diffusion régulière d'analyses de cas illustrant l'effet tangible sur la productivité (par exemple : « +20% de performance après un an d'usage »).
- Des webinaires mensuels sont organisés en présence d'experts agronomes sur des sujets spécifiques tels que la gestion de l'irrigation, la rotation des cultures, etc.

d) Partenariats Stratégiques :

- Partenariat avec les chambres d'agriculture pour réaliser des démonstrations sur le terrain.
- Collaboration avec les fournisseurs de produits agricoles pour proposer des forfaits (solution + engrais adaptés).

Plan de production et d'organisation

Le Processus de production

a) Acquisition de capteurs

L'acquisition de capteurs constitue une étape essentielle du projet. Elle comprend le choix et l'achat de capteurs capables de mesurer différents paramètres du sol : humidité, température, pH, salinité, et teneur en nutriments (azote, phosphore, potassium). Ces capteurs doivent être robustes, compatibles avec des environnements agricoles extérieurs et capables de transmettre les données en temps réel à travers des réseaux sans fil.

b) Développement logiciel

Programmation : Développement d'applications embarquées pour la collecte et la transmission des données à partir des capteurs. Cela inclut également la conception d'un back-end cloud pour stocker et gérer les données, ainsi qu'un moteur d'intelligence artificielle capable d'interpréter les mesures pour détecter les anomalies, recommander des actions (irrigation, fertilisation) et prédire l'évolution de la santé des sols.

Intégration : Connexion fluide entre les capteurs physiques, le module de traitement IA et l'interface utilisateur. Cela implique l'intégration d'APIs pour la visualisation des données sur une plateforme web/mobile, le couplage avec des bases de données agricoles existantes, et l'optimisation des communications machine-à-machine (M2M).

c) Installation du système

Cette étape concerne la mise en place physique du système dans les exploitations agricoles pilotes. Elle inclut l'installation des capteurs dans différentes zones représentatives du terrain, la connexion à des unités de traitement locales ou distantes, et l'alimentation énergétique (panneaux solaires, batteries, etc.).

d) Tests et validation

Tests en laboratoire : Avant le déploiement sur le terrain, des tests en environnement contrôlé sont réalisés pour vérifier la précision des capteurs, la stabilité du système, la qualité de la transmission des données, et la réactivité des algorithmes IA.

Tests sur le terrain : Des expérimentations en conditions réelles sont menées dans plusieurs types de sols et de cultures afin de valider la fiabilité du système, sa capacité d'adaptation, et la pertinence des recommandations générées. Ces tests permettront d'ajuster les algorithmes aux spécificités locales.

e) Mise en service et support

Formation des utilisateurs : Organisation de sessions de formation à destination des agriculteurs, coopératives, et techniciens agricoles pour les initier à l'utilisation de la plateforme (consultation des données, interprétation des indicateurs, exécution des recommandations, etc.).

Support technique : Mise en place d'un service d'assistance à distance et sur site pour aider à la maintenance des capteurs, à la résolution de bugs logiciels et à l'accompagnement continu des utilisateurs dans l'usage quotidien du système.

Ressources humaines

a) Équipe de développement :

Ingénieurs spécialisés en programmation (Python, JavaScript, C/C++) et en intelligence artificielle. Ils conçoivent les algorithmes de détection des anomalies et des modèles prédictifs basés sur le machine learning, tout en assurant l’ergonomie de la plateforme utilisateur.

b) Équipe de production :

Techniciens en électronique et en ingénierie de capteurs, responsables de la fabrication, de l’assemblage et des tests matériels. Ils garantissent que chaque capteur est calibré, étanche et opérationnel dans des conditions agricoles variées.

c) Équipe de support technique :

Techniciens de support : Professionnels chargés d’intervenir sur le terrain pour diagnostiquer les pannes, assurer la maintenance préventive et corrective des capteurs, et garantir la continuité du service.

Formateurs : Spécialistes de la vulgarisation technologique, ils animent les ateliers et sessions de formation, en adaptant leur discours aux réalités des utilisateurs finaux, souvent peu familiers avec les technologies numériques.

d) Équipe de gestion de projet :

Chefs de projet : Ils planifient les différentes phases du projet, assurent la coordination entre les équipes, et veillent au respect des délais, du budget, ainsi qu’à l’atteinte des objectifs techniques et sociétaux.

Responsables de la logistique : En charge de l’approvisionnement, du transport et de la distribution des équipements sur les différents sites pilotes, ainsi que du suivi des installations et de la circulation des ressources sur le terrain.

L’Approvisionnement

Notre approche d’approvisionnement se fonde sur des collaborations directes avec : Les coopératives agricoles locales, Les centres de recherche et les instituts d’agronomie, Les producteurs de capteurs IoT locaux, Les fournisseurs de matières premières agricoles

La main d’œuvre

Notre dispositif de suivi intelligent des sols devrait permettre la création d’environ 20 emplois spécialisés dans les secteurs suivants :

- Ingénierie et Technologie : Développeurs spécialisés en IoT, spécialistes de l’intelligence artificielle et scientifiques des données experts en agronomie.
- Assistance Agricole : Experts agronomes, techniciens sur le terrain pour l’installation et l’entretien des capteurs.
- Service à la clientèle et commercial : Responsables de la relation avec les agriculteurs, formateurs pour les outils digitaux.

Les Principaux partenaires

Nos collaborations stratégiques avec des instituts d'agronomie, des coopératives agricoles, des fournisseurs de technologies et des entités publiques représentent le fondement essentiel de notre succès. Ces partenariats nous offrent un accès privilégié à des données de terrain essentielles pour améliorer nos modèles, tout en favorisant l'implémentation de notre solution grâce à la notoriété de ces acteurs confirmés. Au-delà d'une simple collaboration, ces associations nous offrent l'opportunité de bâtir un écosystème global autour de notre innovation. Cela génère une synergie forte entre la recherche scientifique, les compétences pratiques en agriculture et les politiques publiques pour promouvoir une agriculture durable.

Plan financier

Les Coûts et charges

L'identification de tous les coûts et investissements nécessaires est essentielle lorsqu'on traite avec des clients en raison du large éventail d'opinions assez différenciées qui doivent être catégorisées et traitées. Il s'agit des coûts de base, des coûts annuels ainsi que des coûts fixes et autres.

a) Coûts initiaux :

Infrastructure :

- Établir, louer ou acquérir des bureaux pour le développement et l'administration.
- Mesures/dispositions de sécurité ainsi que d'autres aspects tels que l'installation de boîtiers, d'ordinateurs et de connexions réseau.
- Support technique et frais d'accès mensuels à divers services cloud pour l'hébergement et le stockage des données.

Équipement :

- **Composants et matériel** : boîtier intelligent qui contient des capteurs (Capteur 7-en-1 (CWT-SOIL NPKPHCTH-S), Capteur de lumière BH1750, Module LoRaWAN (RFM95W par exemple), Capteur PIR (mouvement), Capteur de vibration (SW-420), Microcontrôleur (ESP32), Panneau solaire 40W, Batterie LiPo (11.1V)).
- **Divers matériaux et production additive** : acquisition de fournitures, pièces mécaniques et utilisation d'imprimantes 3D pour la construction des boîtiers et structures de prototypes.
- **Développement de logiciels et intégration d'intelligence artificielle** : élaboration interne de l'interface utilisateur, des modules d'intelligence artificielle (XGBoost) et de l'infrastructure serveur requise pour la visualisation et l'analyse des données en direct.
- **Modèle d'apprentissage automatique XGBoost** : application d'un algorithme XGBoost perfectionné pour anticiper l'état et les exigences du sol à partir des informations recueillies par les capteurs.
- **Gestion et stockage de données** : Utilisation d'une base de données relationnelle ou NoSQL sécurisée (comme PostgreSQL ou MongoDB) ainsi qu'un entrepôt de données dans le cloud pour compiler, historiser et interroger efficacement les indicateurs environnementaux.
- **Serveur LoRaWAN** : une plateforme IoT et des outils d'intégration pour la collecte et l'interprétation des données des capteurs, accompagnés d'APIs RESTful pour relier le back-end aux interfaces web et mobiles.

- **Administration et conservation de données** : Recours à une base de données relationnelle ou NoSQL sécurisée (telle que PostgreSQL ou MongoDB) ainsi qu'un entrepôt de données dans le cloud afin de rassembler, archiver et interroger avec efficacité les indicateurs environnementaux.

b) Coûts opérationnels :

Personnel :

- **Salaires des employés** : Ils comprennent le paiement des frais de personnel liés : Au développement des boîtiers intelligents et systèmes embarqués, Aux spécialistes des données agricoles et modèles XGBoost, Aux gestionnaires de projet IoT et déploiement terrain, Aux techniciens offrant le soutien technique aux agriculteurs, Aux conseillers agronomes pour l'interprétation des paramètres du sol.
- **Formation continue du personnel** : Un programme structuré de développement professionnel assure la mise à jour permanente des compétences techniques et agronomiques, incluant des ateliers techniques sur l'étalonnage et les innovations des capteurs pédologiques, des séminaires spécialisés en IA agricole (optimisation des algorithmes XGBoost), des formations certifiantes aux plateformes cloud (AWS/Azure) et protocoles IoT (LoRaWAN, gestion énergétique solaire), ainsi qu'une veille sectorielle active via des conférences agronomiques ciblant l'adaptation aux sols maghrébins et les tendances émergentes en agriculture de précision.

Logistiques :

- **Hébergement cloud et services IoT** : dépenses régulières pour la mise à disposition et la maintenance des serveurs, des bases de données et des modules de collecte de données.
- **Abonnements logiciels** : frais d'accès aux plateformes de développement, aux outils d'analyse et aux bibliothèques spécialisées pour le traitement des flux IoT.
- **Acquisition et traitement de données agronomiques** : coûts liés à l'achat ou à l'abonnement à des jeux de données (marché, météo, caractéristiques des sols), ainsi qu'à leur préparation pour enrichir le modèle IA.
- **Infrastructure réseau** : frais de connectivité et de gestion des communications (LoRaWAN ou autres protocoles), incluant la supervision et la gestion de la bande passante.

Marketing et service à la clientèle :

- **Marketing Campaigns** : englobe toutes les dépenses récurrentes liées aux campagnes de marketing digital localisées sur Facebook et Instagram qui visent les agriculteurs et coopératives (segmentation géographique), la conception de contenus éducatifs (vidéos, infographies) en arabe dialectal et en français, l'optimisation pour les moteurs de recherche/marketing sur Google (mots-clés « surveillance sol », « capteurs agricoles LoRaWAN »), le marketing événementiel comprenant des ateliers et des stands lors des foires agricoles, ainsi que les tournées de démonstration avec camion-laboratoire.
- **Customer Service Management** : désigne l'ensemble des frais opérationnels liés à la gestion du support client (hotline, WhatsApp Business, e-mail, chat), incluant la prise en charge des demandes d'installation, le traitement des réclamations, la formation des utilisateurs (webinaires, guides PDF) et l'assurance d'un support prioritaire avec SLA pour les abonnés premium, afin de garantir la satisfaction utilisateur.

d) Coûts récurrents :

- **Maintenance de l'équipement** : changement régulier d'une partie des capteurs et boîtiers (due à l'usure, dérive des sondes, corrosion), incluant les pièces de rechange, les batteries et les panneaux solaires.
- **Maintenance des serveurs et logiciels** : mises à jour régulières de l'infrastructure cloud, des bases de données et de l'application web, avec un contrat de support pour assurer stabilité et sécurité.
- **Renouvellement des licences et abonnements** : plateformes IoT, API tierces (météo, cartographie), outils de développement et solutions de cybersécurité.
- **Surveillance de la connectivité LoRaWAN** : gestion et renouvellement des souscriptions réseau, contrôle de la qualité du lien et interventions techniques si nécessaire.

e) Autres coûts :

- **Assurances et responsabilité** : assurance responsabilité civile professionnelle et multirisque pour couvrir les risques liés aux opérations de la plateforme, aux locaux et aux équipements.
- **Assurance contre les cyber-menaces** : couverture pour les pertes et divulgations de données résultant d'attaques numériques.
- **Conformité aux normes** : réalisation d'audits et élaboration de processus conformes au RGPD, avec l'assistance d'un Délégué à la Protection des Données externe pour assurer l'application des lois relatives à la protection des données.
- **Autorisations et licences** : acquisition des certifications radio (LoRa), souscriptions aux API météorologiques et obtention des permis réglementaires requis.
- **Sécurité informatique et logiciels** : évaluations de sécurité initiales, installation de pare-feux, antivirus et surveillance réseau, ainsi que licences pour les outils de développement, CI/CD et supervision (XGBoost étant open source n'engendrant pas de frais de licence).

Méthodes et sources de financement :

Pour financer ce projet, plusieurs méthodes et sources de financement peuvent être explo-
rées :

a) Financement interne :

- Les créateurs injectent des capitaux personnels pour financer les premières phases (étape de démarrage).
- Les profits issus des premières ventes de produits ou des souscriptions sont intégralement réinjectés dans l'évolution du projet.

b) Financement extérieur :

Prêts bancaires :

- Un crédit professionnel classique permet de soutenir l'investissement initial (recherche et développement, stock de boîtiers).
- Le prêt est organisé en fonction d'un calendrier défini avec l'établissement bancaire et peut être garanti par des assurances fournies par les dirigeants ou grâce au plan de financement proposé.

Investisseurs :

- Nous cherchons des investisseurs disposés à soutenir le financement des innovations technologiques destinées à transformer l'agriculture de précision via l'analyse prédictive des facteurs clés du sol.
- La meilleure chose à faire est de nouer des partenariats stratégiques avec des capitaux-risqueurs ou fonds spécialisés dans l'agritech durable et l'intelligence artificielle appliquée aux défis environnementaux.
- Mettre en place des solutions modulaires dans le but de rendre notre système de surveillance largement accessible et d'amplifier son influence au sein de l'écosystème agricole mondial.

c) Subventions et aides :

- Examiner les aides publiques et les subventions allouées aux avancées technologiques dans le secteur agricole, en se concentrant particulièrement sur celles qui appuient l'agriculture de précision par le biais de l'intelligence artificielle et la durabilité environnementale.
- Intégrer des incubateurs et accélérateurs spécialisés en agritech pour bénéficier de mentorat stratégique, de réseaux professionnels et de dispositifs de financement early-stage.

d) Financement participatif :

- Recourez à des plateformes de financement participatif pour rassembler des fonds provenant de nombreux petits investisseurs.

Date	Montant	Poste de dépense	Échéance	Solde restant
2025-01-01	2 500 000 DZD	Apport initial	N/A	2 500 000 DZD
2025-01-15	800 000 DZD	Achat capteurs & matériel hardware	N/A	1 700 000 DZD
2025-02-01	400 000 DZD	Panneau solaire et batterie	N/A	1 300 000 DZD
2025-02-15	300 000 DZD	Module LoRaWAN & communication	N/A	1 000 000 DZD
2025-03-01	500 000 DZD	Développement prototype & intégration	N/A	500 000 DZD
2025-03-15	200 000 DZD	Licences logicielles & IA (XGBoost)	N/A	300 000 DZD
2025-04-01	300 000 DZD	Développement interface & UX	N/A	0 DZD

TABLE 4.2 – Planning de décaissements pour le projet de surveillance intelligente de la santé des sols

L'illustration ci-dessus n'est qu'une représentation simplifiée ; il est essentiel de tenir à jour le tableau de bord qui suit les paramètres de santé des sols et de veiller avec rigueur :

- **La fiabilité des capteurs** (précision et stabilité des mesures des capteurs) ;
- **La qualité de la communication LoRaWAN.**
- **L'indépendance énergétique.**
- **Les performances du modèle XGBoost.**

En assurant une mise à jour constante des données issues des capteurs, en menant périodiquement des séances de recalibrage des capteurs et en pratiquant des validations croisées du modèle, on assure la précision de l'information et l'efficacité de la catégorisation de l'état du sol. Ce suivi méthodique permet d'offrir à l'agriculteur des diagnostics fiables et en temps réel, facilitant ainsi la planification d'interventions agronomiques précises et la pérennité de la production.

Business Model Canvas

