



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne Démocratique et Populaire



وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة عبد الحميد بن باديس مستغانم  
Université Abdelhamid Ibn Badis de Mostaganem

كلية علوم الطبيعة والحياة  
Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie

قسم العلوم الفلاحية  
Département d'Agronomie

Filière : Sciences  
Agronomiques

Spécialité : Technologies avancées  
pour l'agriculture de précision



## Mémoire en vue de l'obtention du Diplôme de Master LMD

Présenté par: Abdelakder Mehdi DERKAOUI  
Mohammed Hebri SEKKAL

# Pilotage de l'irrigation par aspersion à l'aide de capteurs Intel-Irris sur une culture de blé tendre (*Triticum aestivum* L.), variété : Aïn Abid.

Soutenue publiquement le 25/06/2025

Devant le jury :

Chouarfia Charef	Pr	Président	Université de Mostaganem
Benkhelifa Mohammed	Pr	Directeur de mémoire	Université de Mostaganem
Amiri Ouafaa	MCB	Examinatrice	Université de Mostaganem

Travail réalisé à la ferme pédagogique de Mazagan

Année Universitaire : 2024-2025

## Dedicaces

# بِسْمِ اللّٰهِ الرَّحْمٰنِ الرَّحِیْمِ

حمداً لله الذي وفقني لإنهاء مساري الدراسي رغم كل المشاق والصعوبات التي واجهتها. فشكراً لله أولاً، ثانياً أودّ أن أشكر والديّ، أمي التي كانت سنداً ورفيقاً دائماً لي طوال حياتي، أبي الذي ساندني و دعمني ، وإلى إخوتي الذين قدموا لي دعماً بطريقتهم الفريدة من نوعها. وأخيراً ليس آخرًا، أودّ أن أشكر نفسي التي نجحتُ من أجلها رغم العقبات الصعبة.  
ربما وُجد الظلام لإِراحةِ العين من نور ساطع

*d'abord on veut remercier nos chère parents, qui m'ont soutenu et encouragé tout au long de mon parcours académique. Vos sacrifices, votre amour et votre confiance ont été nos sources d'inspiration et de motivation les plus importantes.*

*À nos frères et sœurs, pour leur soutien indéfectible et leurs encouragements constants. Vos conseils avisés et votre présence à notre côtés ont été d'une grande aide pour moi*

*À nos amis, pour leur soutien, leurs encouragements et leurs mots d'encouragement. Votre amitié a été un pilier important dans ma vie et a contribué à mon bien-être mental et émotionnel.*

*À nos professeurs et notre encadreur, pour leur enseignement, leur expertise et leur patience tout au long de notre parcours académique. Vos conseils et votre soutien ont été essentiels dans la réalisation de ce travail.*

*Enfin, à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail, je leur exprime ma gratitude sincère et mes remerciements les plus chaleureux.*

## Remerciements

Tout d'abord, nous souhaitons exprimer notre profonde gratitude envers le Divin, le Tout-Puissant et le Miséricordieux, qui nous a donné la force, la patience et la détermination nécessaires pour mener à bien ce modeste projet.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à Monsieur Benkhlifa, mon professeur et encadrant, pour son accompagnement précieux, ses conseils éclairés, ainsi que sa disponibilité tout au long de ce travail. Son expertise et sa rigueur scientifique ont grandement contribué à l'aboutissement de ce mémoire.

Je remercie également chaleureusement toutes les personnes qui travaillent à la ferme pour leur accueil, leur aide sur le terrain et leur précieuse collaboration. Leur expérience et leur soutien m'ont été d'une grande utilité lors de la phase pratique de ce projet.

Enfin, je remercie tous ceux qui, de près ou de loin, ont participé à la réalisation de ce travail et m'ont soutenu durant cette période.

# Résumé

Dans un contexte de raréfaction des ressources en eau et de besoin croissant en production agricole, la gestion efficace de l'irrigation est devenue un enjeu majeur, notamment en Algérie où le climat est principalement aride et semi-aride. Ce mémoire s'intéresse à l'optimisation de l'irrigation par aspersion à l'aide des capteurs Intel-IrriS, appliquée à la culture du blé tendre.

L'objectif principal de ce travail est d'évaluer l'efficacité d'un système d'irrigation piloté par capteurs d'humidité du sol, comparé à une irrigation classique. La première partie de l'étude présente les différents types d'irrigation et les pertes d'eau associées. Ensuite, une analyse approfondie des capteurs d'humidité – notamment les capteurs capacitifs et résistifs – est réalisée, avec un accent particulier sur le système Intel-IrriS.

La partie expérimentale a été menée sur deux parcelles : l'une équipée de capteurs Intel-IrriS et l'autre non équipée. Les résultats ont montré une réduction significative de la consommation d'eau et une meilleure gestion de l'humidité du sol dans la parcelle instrumentée. L'irrigation pilotée a permis de déclencher les arrosages uniquement lorsque cela était nécessaire, améliorant ainsi l'efficacité de l'irrigation et favorisant un développement optimal de la culture.

Ce mémoire conclut que l'intégration des capteurs intelligents dans les systèmes d'irrigation constitue une solution prometteuse pour une agriculture durable, économe en eau et adaptée aux enjeux climatiques actuels.

# Abstract

In the face of increasing water scarcity and the growing demand for agricultural production, efficient irrigation management has become a key challenge—particularly in Algeria, where the climate is predominantly arid and semi-arid. This thesis focuses on optimizing sprinkler irrigation through the use of Intel-IrriS soil moisture sensors, applied to the cultivation of soft wheat.

The main objective of this work is to evaluate the effectiveness of a sensor-controlled irrigation system compared to conventional methods. The first part of the study reviews the different irrigation techniques and the associated water losses. It also provides a detailed analysis of soil moisture sensors—especially capacitive and resistive types—with a specific focus on the Intel-IrriS system.

The experimental section was carried out on two plots : one equipped with Intel-IrriS sensors and one without. The results demonstrated a significant reduction in water use and improved soil moisture management in the sensor-equipped plot. Sensor-based irrigation enabled precise watering only when necessary, thereby enhancing irrigation efficiency and supporting optimal crop development.

This thesis concludes that integrating smart sensors into irrigation systems offers a promising solution for sustainable agriculture—reducing water consumption and adapting better to current climatic challenges.

# ملخص

في ظل التحديات المتزايدة المرتبطة بندرة المياه والحاجة المتزايدة للإنتاج الزراعي، أصبحت إدارة الري بشكل فعال ضرورة ملحة، خاصة في الجزائر التي تتميز بمناخ جاف وشبه جاف. تهدف هذه المذكرة إلى دراسة وتحسين نظام الري بالرش من خلال استخدام حساسات رطوبة التربة اينتلايررص، وذلك في زراعة القمح اللين.

يتمثل الهدف الرئيسي من هذا العمل في تقييم فعالية نظام ري يعتمد على الحساسات، مقارنةً بأسلوب الري التقليدي. تتناول الجزء الأول من الدراسة لمحة عن تقنيات الري المختلفة والحساسات المائية المرتبطة بها، بالإضافة إلى تحليل دقيق لأنواع حساسات الرطوبة، وخاصة الحساسات السعوية والمقاومية، مع التركيز على نظام اينتلايررص.

وقد أُجريت التجارب على قطعتين زراعتين : الأولى مزودة بالحساسات، والثانية بدونها. أظهرت النتائج أن استخدام الحساسات أدى إلى تقليص كبير في كمية المياه المستعملة، مع تحسين واضح في إدارة رطوبة التربة. كما ساعد هذا النظام في تحديد توقيت الري بدقة حسب الحاجة الفعلية للنبات، مما رفع من كفاءة الري وساهم في نمو أفضل للمحصول. خلصت هذه الدراسة إلى أن دمج التقنيات الذكية مثل حساسات اينتلايرص في أنظمة الري يمثل حلاً واعدًا لتحقيق زراعة مستدامة، تُراعي الاقتصاد في استهلاك المياه وتتكيف مع التغيرات المناخية الراهنة.

# Table des matières

<b>Introduction générale</b>	<b>9</b>
<b>I Pertes d'eau en irrigation</b>	<b>1</b>
I.1 Histoire	1
I.2 Les types d'irrigation	2
I.2.1 Irrigation de surface	2
I.2.2 Avantages et inconvénients de l'irrigation de surface	6
I.2.3 Irrigation par aspersion	6
I.2.4 Avantages et inconvénients de l'irrigation d'aspersion	8
I.2.5 Irrigation par goutte à goutte	8
I.2.6 Avantages et inconvénients de l'irrigation de goutte à goutte	10
I.3 Comparaison des différentes méthodes d'irrigation	10
I.4 Irrigation en Algérie	11
I.5 Conclusion	13
<b>II Capteurs d'humidité du sol</b>	<b>14</b>
II.1 Humidité et principes physiques	14
II.1.1 Détermination de l'humidité	15
II.2 Capteur d'humidité de sol capacitif	16
II.2.1 Avantages et inconvénients de capteur d'humidité capacitif	17
II.3 Capteur d'humidité de sol résistif	17
II.3.1 Avantages et inconvénients de capteur d'humidité résistif	17
II.4 Erreurs des capteurs d'humidité du sol	18
II.4.1 Erreurs systématiques	18
II.4.2 Erreurs aléatoires	18
II.4.3 Différences entre capteurs résistifs et capacitifs	18
II.5 Capteur Intel-IrriS	19
II.5.1 L'écrans principaux IIWA	20
II.5.2 Architecture	21
II.5.3 Configuration des fichiers	22
II.6 Capteur d'humidimètre de sol WATERMARK	23
II.7 Comparaison des capteurs d'humidité du sol	25
II.8 Conclusion	25
<b>III Partie expérimental</b>	<b>27</b>
III.1 Présentation du site expérimental	27
III.1.1 Localisation géographique de la ferme expérimentale	27
III.1.2 Description pédoclimatique et caractéristiques du sol et du climat	28
III.1.3 Choix de la culture (blé tendre) et de la période expérimentale	29
III.2 Dispositif expérimental	30
III.2.1 Description des deux zones expérimentales	30
III.2.2 Modalités de l'irrigation appliquée dans chaque zone :	32
III.2.3 Méthode de suivi de l'humidité du sol et déclenchement de l'irrigation	33

III.2.4	Calcul du débit d'eau d'irrigation . . . . .	34
III.3	Résultats obtenus . . . . .	36
III.3.1	Durée d'irrigation dans chaque site . . . . .	36
III.3.2	Volume d'eau utilisé dans chaque cas . . . . .	36
III.4	Analyse et interprétation des résultats . . . . .	37
III.4.1	Avantages de l'irrigation pilotée par capteurs . . . . .	38
III.4.2	Comparaison avec l'irrigation fixe . . . . .	39
III.4.3	Impact sur la gestion durable de l'eau . . . . .	40
III.5	Difficultés rencontrées et solutions apportées . . . . .	40
III.5.1	Problèmes techniques et environnementaux . . . . .	40
III.5.2	Réglage des capteurs et validation du seuil de saturation . . . . .	41
III.6	Conclusion . . . . .	42
	<b>Conclusion générale</b>	<b>43</b>
	<b>Références bibliographique</b>	<b>44</b>

# Liste des figures

I.1	Lac Moires . . . . .	1
I.2	Irrigation par bassins des rizières . . . . .	2
I.3	Irrigation par bassins à flanc de coteau. . . . .	2
I.4	Irrigation par bassins pour les arbres forestiers. . . . .	3
I.5	Irrigation par bassins pour les arbres fruitiers. . . . .	3
I.6	Irrigation par sillon pour les cultures maraîchères. . . . .	4
I.7	Irrigation par sillons pour les arbres fruitiers. . . . .	4
I.8	Sillons alimentés par ouvertures. . . . .	5
I.9	Sillons alimentés par siphons. . . . .	5
I.10	Sillons alimentés par tuyau. . . . .	5
I.11	Irrigation de surface par planches (ruissellement). . . . .	6
I.12	Composants hydrauliques de l'irrigation par aspersion . . . . .	7
I.13	Répartition de l'irrigation par aspersion . . . . .	8
I.14	Système élémentaire pour irrigation goutte à goutte . . . . .	9
I.15	Répartition générale des terres . . . . .	12
I.16	Superficie irriguée au Sahara . . . . .	12
II.1	Répartitions de l'eau dans le sol . . . . .	15
II.2	Capteur d'humidité capacitif . . . . .	16
II.3	Capteur d'humidité résistif . . . . .	17
II.4	Kit de Intel-Irris . . . . .	19
II.5	Capteur capacitif SEN0308 et le capteur tensiomètre 200SS . . . . .	20
II.6	Interface de l'application WaziApp . . . . .	20
II.7	Les fichiers principaux et les composants de IIWA . . . . .	21
II.8	Kit de WATERMARK . . . . .	24
III.1	La ferme expérimentale (Mezeghrane – Université de Mostaganem . . . . .	27
III.2	Position géographique (Googla Map) . . . . .	28
III.3	Le blé tendre ( <i>Triticum aestivum</i> L.) . . . . .	29
III.4	L'installation de capteur Intel-Irris sur la surface . . . . .	30
III.5	L'installation de capteur Intel-Irris sur le profond . . . . .	31
III.6	Irrigation par aspersion sans capteurs . . . . .	31
III.7	Interface de l'application WaziGate . . . . .	33
III.8	Méthode de calculer le débit d'eau d'irrigation . . . . .	34
III.9	Résultats obtenu par les capteurs . . . . .	35

# Liste des tableaux

I.1	Comparaison des différents systèmes d'irrigation. . . . .	11
I.2	Evolution des superficies irriguées en Algérie . . . . .	11
II.1	Comparaison entre capteurs résistifs et capacitifs . . . . .	19
II.2	Plage de mesure typique de WATEMARK . . . . .	24
II.3	Comparaison des capteurs d'humidité du sol . . . . .	25
III.1	Durée d'irrigation pour chaque tour avec et sans capteurs Intel-IrriS . . . . .	36
III.2	Volumes d'eau utilisés pour chaque tour avec et sans capteurs Intel-IrriS . . . . .	37

# Introduction générale

L'agriculture moderne se heurte à des contraintes de plus en plus fortes, notamment en matière de gestion des ressources naturelles. Parmi celles-ci, l'eau constitue un facteur limitant majeur, en particulier dans les régions où le climat est aride ou semi-aride, comme c'est le cas en Algérie. La raréfaction des ressources hydriques, accentuée par le changement climatique, pousse le secteur agricole à adopter des solutions plus efficaces et durables.

L'irrigation, bien qu'essentielle pour assurer des rendements réguliers, est également l'un des postes les plus consommateurs d'eau douce. De nombreuses exploitations utilisent encore des méthodes d'irrigation classiques, souvent peu adaptées aux conditions actuelles. Ces systèmes, basés sur des programmations fixes ou des observations visuelles, peuvent entraîner des excès ou des manques d'eau, avec des conséquences directes sur les cultures, les sols et la disponibilité en eau à long terme.

Face à ce constat, des outils technologiques comme les capteurs d'humidité du sol ont été développés pour améliorer la gestion de l'irrigation. Ces dispositifs permettent de mesurer en temps réel l'humidité du sol, afin de déclencher l'arrosage uniquement lorsque cela s'avère nécessaire. L'objectif est de réduire les pertes, d'optimiser l'utilisation de l'eau et d'assurer un meilleur suivi du développement des cultures.

Le système Intel-IrriS est un exemple de ces nouvelles approches. Il s'appuie sur des capteurs installés à différentes profondeurs du sol, connectés à une application qui analyse les données et aide à la prise de décision. Dans ce mémoire, l'efficacité de ce système a été testée sur une culture de blé tendre, afin de comparer ses performances à celles d'un système d'irrigation traditionnel.

L'étude comprend trois parties. La première aborde les principaux types de systèmes d'irrigation et les pertes hydriques qui leur sont associées. La deuxième partie est consacrée aux capteurs d'humidité du sol, en mettant l'accent sur la technologie utilisée dans cette expérimentation. Enfin, la dernière partie présente le protocole expérimental mis en place, les résultats obtenus, et une analyse comparative des deux méthodes d'irrigation.

Ce travail vise ainsi à évaluer, sur une base concrète, dans quelle mesure l'utilisation de capteurs connectés permet une irrigation plus ciblée, plus économique et plus performante, dans un contexte où chaque mètre cube d'eau devient un enjeu stratégique.

# Chapitre I

## Pertes d'eau en irrigation

L'irrigation est une pratique essentielle en agriculture, permettant d'assurer un apport en eau suffisant aux cultures, en particulier dans les régions arides et semi-arides. Cependant, une grande partie de l'eau utilisée pour l'irrigation est perdue avant d'être effectivement absorbée par les plantes. Ces pertes représentent un enjeu majeur, tant sur le plan environnemental qu'économique, et nécessitent une gestion optimisée des ressources hydriques.

### I.1 Histoire

D'après les statistiques de la FAO, 20 % des terres arables sont irriguées mais produisent 40 % des récoltes. L'irrigation est donc un moyen efficace d'améliorer la productivité de manière importante. Il y a pourtant des risques environnementaux liés à l'irrigation notamment la stagnation des eaux et une salinité accrue.

Les inondations annuelles du Nil rythmaient la vie agricole. Vers 3000 avant notre ère, un système d'irrigation fut créé à partir du Nil pour en détourner une partie des flots vers un lac, le lac Moeris. Le Moeris était composé d'un réservoir (le lac), d'un canal d'écoulement, d'un groupe de régulateurs, de prises d'eau, de barrages, etc...

Il servait en certaines saisons à suppléer au manque d'eau et à régulariser le niveau d'une immense voie d'eau parallèle au Nil destinée à la circulation, en toutes saisons, des lourds chalands nécessaires à la construction des pyramides. Le complexe hydraulique restauré sous la XII dynastie, servant à la fois à l'irrigation et aux communications, fut prolongé jusqu'au lac Mariout. Utilisé jusqu'à l'époque arabe ce canal fut successivement nommé : canal de Memphis, canal Bahire, El Asara, Bahr el Lebein. [1]

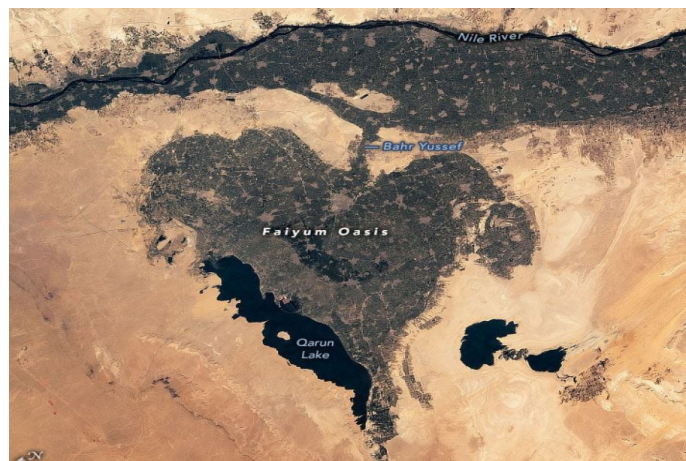


FIGURE I.1 – Lac Moires

## I.2 Les types d'irrigation

Le choix d'un système d'irrigation est un paramètre important, qui a des conséquences plus ou moins directes sur l'efficacité de l'irrigation ou sur les rendements des cultures irriguées. Mais avant de choisir le mode d'irrigation, il a lieu de connaître, les différents modes.

### I.2.1 Irrigation de surface

L'irrigation de surface ou irrigation gravitaire consiste à répartir l'eau sur la parcelle cultivée par ruissellement sur le sol dans les sillons (irrigation à la raie) ou en nappe (irrigation par planche ou calant) ou encore par submersion contrôlée (irrigation par bassins) [2].

Généralement l'irrigation de surface comprend trois grands types de techniques d'irrigation de surface, à savoir :

#### Irrigation par bassin

Les bassins sont constitués de cuvettes en terre, à fond à peu près plat, entourées de diguettes de faible hauteur. Ces diguettes sont conçues pour empêcher le passage de l'eau aux champs adjacents.



FIGURE I.2 – Irrigation par bassins des rizières



FIGURE I.3 – Irrigation par bassins à flanc de coteau.

La méthode par bassins est aussi utilisée pour l'irrigation des arbres forestiers (Figure I.4) ou bien les arbres fruitiers (Figure I.5); dans ce cas une petite cuvette (bassin) est aménagée autour de chaque arbre.



FIGURE I.4 – Irrigation par bassins pour les arbres forestiers.



FIGURE I.5 – Irrigation par bassins pour les arbres fruitiers.

En général, cette technique d'irrigation s'applique à toutes les cultures qui peuvent tolérer la submersion par les eaux pour une longue durée.

### **Irrigation à la raie**

Les sillons sont des petites rigoles en terre, aménagées dans le sens de la pente du terrain, pour transporter l'eau entre les rangées de cultures. L'eau s'infiltre dans le sol, principalement par les côtés du sillon, tout le long de son trajet dans le sens de la pente du terrain. Généralement, les plantes sont cultivées sur les billons séparant les sillons. Cette technique est valable pour l'irrigation de toutes les cultures en lignes que ce soient cultures maraîchères (Figures I.6) ou bien pour les arbres fruitiers (Figures I.7) et pour toutes les cultures qui ne tolèrent pas la submersion par les eaux de leur feuillage ou de leur collet pour une longue durée



FIGURE I.6 – Irrigation par sillon pour les cultures maraîchères.



FIGURE I.7 – Irrigation par sillons pour les arbres fruitiers.

Les sillons sont alimentés par des prises d'eau aménagées sur les berges du canal d'amenée. Ces ouvrages de prise peuvent être soit des simples ouvertures aménagées sur les berges du canal d'amenée (Figure I.8), soit des siphons (Figure I.9), ou bien des tuyaux d'alimentation passant à travers la berge du canal d'amenée (Figure I.10).

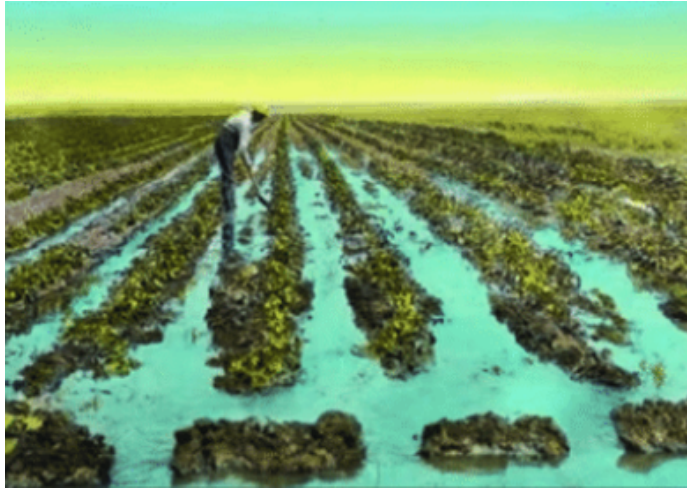


FIGURE I.8 – Sillons alimentés par ouvertures.



FIGURE I.9 – Sillons alimentés par siphons.



FIGURE I.10 – Sillons alimentés par tuyau.

## Irrigation par planches

Les planches sont des bandes de terrain, aménagées en pente douce et séparées par des diguettes. Elles sont aussi appelées calants ou planches d'irrigation (Figure I.11). L'alimentation en eau des planches est faite de plusieurs façons : soit à l'aide de prises d'eau aménagées sur le canal d'amenée et équipées d'une vannette, soit par des siphons, ou bien par des tuyaux d'alimentation passant à travers les berges du canal d'amenée. La lame d'eau introduite ruisselle en descendant la pente de la planche, guidée par les diguettes des deux côtés de celle-ci.



FIGURE I.11 – Irrigation de surface par planches (ruissellement).

## I.2.2 Avantages et inconvénients de l'irrigation de surface

### Avantages

- Coût relativement faible
- Ne nécessite aucune technologie
- Nécessite un niveau de connaissances relativement faible pour l'exploitation et l'entretien

### Inconvénients

- Très faible efficacité d'utilisation de l'eau
- Contribution aux émissions de gaz à effet de serre en raison des pratiques courantes
- Lessivage des engrais
- Engorgement de l'eau
- Pollution des sources d'eau due au lessivage
- Application altérée des éléments nutritifs

## I.2.3 Irrigation par aspersion

L'irrigation par aspersion consiste à fournir l'eau nécessaire aux cultures sous une forme analogue à la pluie naturelle. L'eau est mise sous pression, généralement par pompage, pour être ensuite distribuée au moyen d'un réseau de canalisations. La distribution d'eau est faite au moyen de rampes d'arrosage équipées d'asperseurs. L'eau sort sous la forme d'un jet et se répartit en gouttelettes d'eau qui tombent sur le sol. Le choix du dispositif de pompage, des asperseurs et la bonne gestion de l'eau doivent garantir la distribution uniforme de l'eau d'irrigation, l'irrigation par aspersion s'adapte à toutes les pentes de terrain cultivable, qu'elles soient uniformes ou irrégulières. Les rampes d'arrosage portant les asperseurs doivent

suivre autant que possible les courbes de niveau. Cette disposition a l'avantage de minimiser les variations de pression le long de la rampe et de garantir un arrosage uniforme.

La technique d'irrigation par aspersion est la meilleure pour les sols sableux à taux d'infiltration assez fort, sans pour autant ignorer qu'elle s'adapte parfaitement à la plupart des types de sol. La pluviométrie moyenne des asperseurs (en mm/h) doit être inférieure au taux d'infiltration permanent du sol, pour éviter le ruissellement des eaux en surface. Cette technique est à écarter pour l'irrigation des cultures sur des sols à encroûtement rapide. Au cas où on ne peut pas recourir à d'autres techniques d'irrigation, les asperseurs doivent être choisis de sorte que la distribution de l'eau soit en pluie fine. On doit éviter l'emploi des asperseurs à fortes pressions délivrant une forte pluie (grosses gouttes).

Les 2 figures suivantes illustrent un réseau d'irrigation par aspersion, mettant en évidence la structure hydraulique et la répartition de l'eau sur la parcelle.

Le système d'irrigation par aspersion représenté ici est basé sur un réseau de conduites principales et latérales, alimentant des asperseurs pour une distribution homogène de l'eau sur la culture. [3]

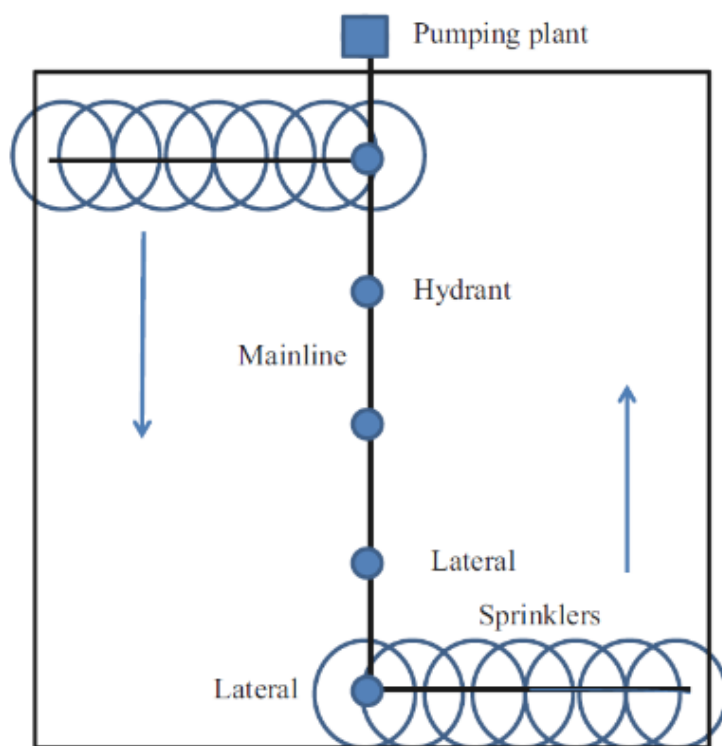


FIGURE I.12 – Composants hydrauliques de l'irrigation par aspersion

La figure suivante représente l'organisation hydraulique du système d'irrigation par aspersion. Il est composé des éléments suivants :

- Station de pompage qui assure la mise sous pression de l'eau.
- Conduit principal acheminant l'eau sous pression depuis la station de pompage vers les conduites secondaires.
- Point de connexion permettant le branchement des conduites latérales aux conduites principales.
- Conduites secondaires raccordées à la conduite principale, distribuant l'eau aux asperseurs.
- Dispositifs diffusant l'eau sous forme de gouttelettes pour simuler une précipitation naturelle.

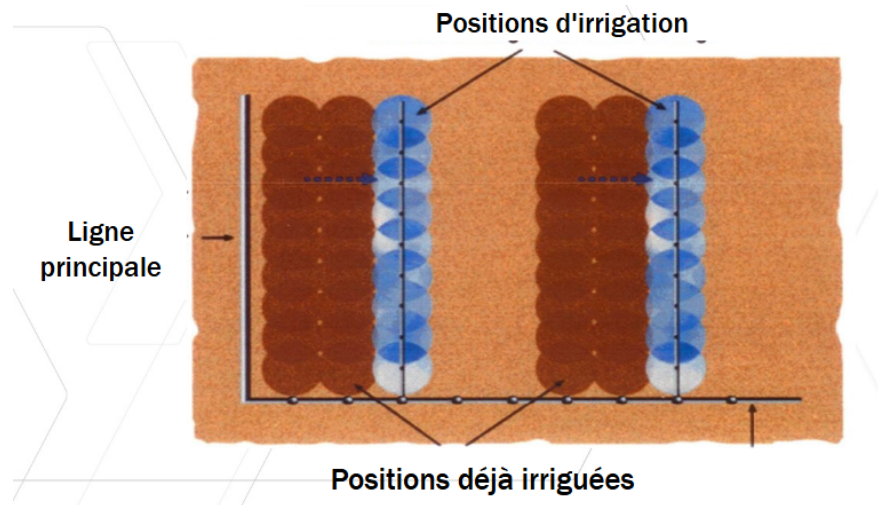


FIGURE I.13 – Répartition de l'irrigation par aspersion

la figure illustre la manière dont l'eau est distribuée sur la parcelle grâce aux asperseurs.

- Ligne principale assure l'acheminement de l'eau vers les conduites latérales.
- Zones couvertes par les asperseurs (zones bleues).
- Parties du champ qui ont reçu l'eau lors des applications précédentes.

#### I.2.4 Avantages et inconvénients de l'irrigation d'aspersion

##### Avantages

- Abordable et facile à mettre en place
- Dans les bonnes conditions : très bonne uniformité de la distribution de l'eau
- Large gamme de débits et de modes de mouillage
- Convient à tous les types de sol
- Peut également être utilisé à d'autres fins, comme le refroidissement en cas de températures élevées
- Solution parfaite pour la protection contre le gel
- Convient à l'application d'engrais
- Capable de fournir des taux d'application très élevés

##### Inconvénients

- Coût plus élevé par émetteur (par rapport au goutte-à-goutte)
- L'uniformité de la distribution de l'eau est réduite en cas de vent
- La pression requise est généralement plus élevée.

Ce système d'irrigation par aspersion est conçu pour fournir une distribution uniforme de l'eau, minimisant le ruissellement et l'évaporation. Ce type de système est particulièrement adapté aux cultures maraichères, céréalières et aux prairies, assurant une irrigation efficace avec une consommation d'eau maîtrisée.

#### I.2.5 Irrigation par goutte à goutte

L'irrigation goutte à goutte est un système à très faible débit (1 à 4 l/h) permettant un pilotage précis des approvisionnements d'eau grâce à un arrosage juste au niveau des racines, réduisant ainsi les pertes par infiltration ou évaporation.

Un système goutte à goutte élémentaire est composé d'éléments qui assurent et surtout contrôlent le transport de l'eau depuis la source d'eau : forage, puits, réservoir, rivière jusqu'aux racines des plantes ; même l'eau de récupération peut être utilisée (avec des filtres ad hoc).

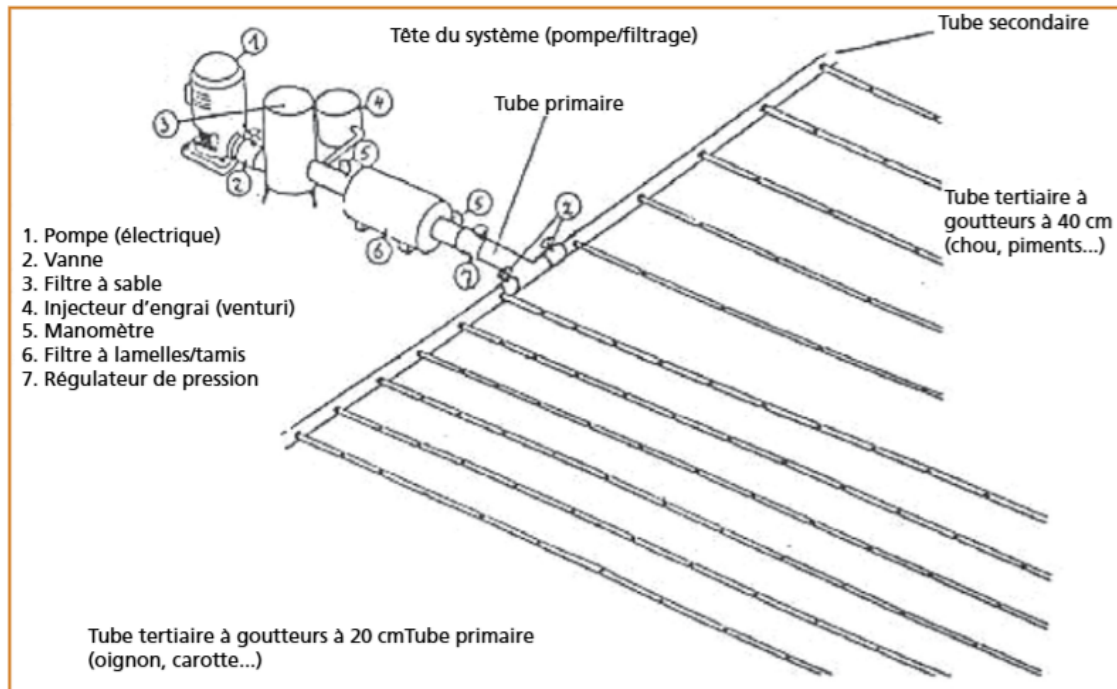


FIGURE I.14 – Système élémentaire pour irrigation goutte à goutte

Cette figure illustre un système d'irrigation localisée, plus précisément un réseau de goutte-à-goutte, mettant en évidence ses principaux composants hydrauliques et leur disposition sur le terrain [4]. Ces différents éléments sont :

#### Tête du système (pompe et filtration)

La tête du système constitue le point d'entrée de l'eau dans le réseau d'irrigation. Elle comprend :

**Pompe électrique** qui assure le pompage de l'eau, augmentant ainsi la pression requise pour la distribution dans le réseau.

**Vanne** permettant de contrôler l'ouverture et la fermeture du circuit.

**Filtre à sable** qui retient les particules solides et empêche l'obstruction des goutteurs.

**injecteur d'engrais de type venturi** utilisé pour la fertigation, permettant l'apport d'éléments nutritifs directement via l'eau d'irrigation.

**manomètre** qui mesure la pression de l'eau afin de garantir une distribution homogène.

**filtre à lamelles ou tamis** qui affine la filtration en retenant les particules plus fines.

**régulateur de pression** qui assure une pression constante et adaptée aux goutteurs.

## Réseau de distribution

**Tube primaire** canalise l'eau à partir de la tête du système vers l'ensemble du réseau. Il joue un rôle central dans la répartition du débit.

**Tubes secondaires** ils dérivent du tube primaire et permettent d'amener l'eau vers différentes zones de la parcelle.

**Tubes tertiaires avec goutteurs intégrés** ils assurent la distribution de l'eau directement aux plantes via des goutteurs espacés selon les besoins de chaque culture.

- Espacement de 40 cm pour des cultures comme le chou et le piment.
- Espacement de 20 cm pour des cultures à plus forte densité comme l'oignon et la carotte.

### I.2.6 Avantages et inconvénients de l'irrigation de goutte à goutte

#### Avantages

- Précision de l'apport en eau
- Réduction des pertes par évaporation
- Efficacité du réseau
- Adaptation aux conditions topographiques et édaphiques difficiles
- Insensibilité au vent
- Diminution du fongus des feuilles et maladies des fruits
- Application intégrée d'eau et l'éléments nutritifs – fertigation

#### Inconvénients

- Risques d'obstruction des émetteurs
- Coûts initiaux élevés
- Accumulation de sel à la surface du sol
- Exposition des tuyaux et goutteurs aux dégâts
- Limitation du volume des racines

Ce système représente donc une solution d'irrigation moderne adaptée aux cultures maraîchères, combinant efficacité hydraulique, économie d'eau et gestion optimisée des nutriments.

## I.3 Comparaison des différentes méthodes d'irrigation

Pour choisir une méthode d'irrigation, l'agriculteur doit connaître les avantages et les inconvénients des différentes méthodes existantes. Il doit savoir quelle méthode convient le mieux aux conditions locales. Malheureusement, dans de nombreux cas, il n'existe pas de solution optimale unique : toutes les méthodes ont leurs avantages et leurs inconvénients. L'essai des différentes méthodes dans les conditions locales existantes constitue la meilleure base pour un choix judicieux de la méthode d'irrigation.

L'adéquation des différentes méthodes d'irrigation (surface, aspersion, goutte-à-goutte) dépend principalement les facteurs suivants :

- Les conditions naturelles
- Le type de culture
- Le type de technologie
- L'expérience antérieure en matière d'irrigation
- La main-d'œuvre nécessaire
- Les coûts et avantages

Ce tableau permet de comparer facilement les principaux types d'irrigation :

TABLEAU I.1 – Comparaison des différents systèmes d'irrigation.

Types d'irrigation	Surface	Aspersion	Goutte à goutte
Convient pour	Terrains plats, diverses cultures	Aménagements paysagers, cultures diverses	Horticulture, agriculture à grande échelle, aménagement paysager
Efficacité de l'eau	Modérée	Modérée à élevée	Très élevée
Coût d'installation initial	Faible	Modéré	Modéré à élevé
Coût d'exploitation	Faible	Modéré	Faible
Gestion des nutriments	Précision faible	Précision modérée	Précision très élevée
Adaptabilité à différents environnements	Limitée	Modérée	Élevée
Potentiel d'automatisation	Faible	Modéré	Élevée
Exigences d'entretien	Modérées	Modérées	Modérées

## I.4 Irrigation en Algérie

L'irrigation en Algérie est un sujet crucial dans un contexte où la superficie totale du pays est estimée à environ 238.17 millions d'hectares. Environ 80 % de cette superficie est constituée de terres improductives non dédiées à l'agriculture, tandis que 14 % sont utilisées par l'agriculture, avec seulement 3 % de ces terres effectivement cultivées. Les terres irriguées, représentant environ 300,000 hectares, connaissent une régression, principalement dans les zones irriguées du littoral et des plaines, malgré l'augmentation des superficies des cultures irriguées grâce au Fond National de la Relance et du Développement Agricole (FNRDA) [5], comme le montre le tableau suivant :

TABLEAU I.2 – Evolution des superficies irriguées en Algérie

Année	1962	1989	1995	2003	2010	2021
<b>Superficies irriguées (ha)</b>	165000	378000	454000	512700	1400000	1500000

Dans un contexte où la partie Nord de l'Algérie, représentant moins de 10 % de la superficie du pays, reçoit 90 % de l'écoulement total en eau, l'irrigation localisée émerge comme une solution stratégique. ; Bien que cette technique soit encore peu développée, ses avantages potentiels, notamment une économie d'eau estimée à 1 milliard de  $m^3$ , pourraient doubler la SAU [6] irriguée et accroître les rendements agricoles d'au moins 30 %

Cependant, l'irrigation localisée est encore à ses débuts en Algérie, principalement implantations le Sud du pays et dans les zones céréalières et sous serres. Les superficies potentiellement aptes à cette technique, combinées à celles actuellement irriguées, représentent 42 % de la SAU irriguée nationale, soit 190,145 hectares, chiffre qui pourrait être relevé à 80 % en incluant d'autres cultures. Cette technique est encore peu connue et implémentée de manière disparate, malgré son fort potentiel.

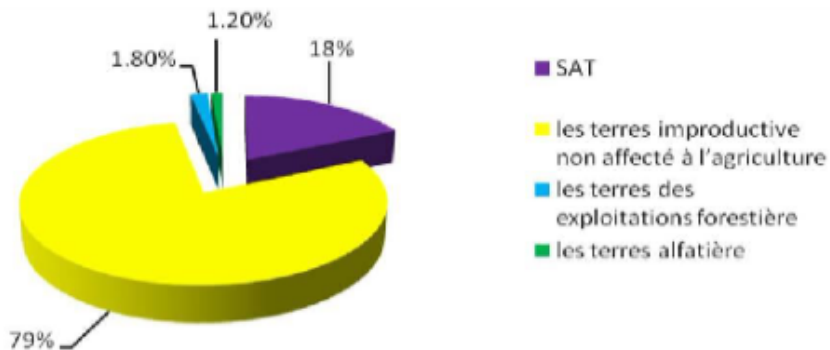


FIGURE I.15 – Répartition générale des terres

Dans le Sahara algérien l'agriculture irriguée a dépassé les 150,000 hectares en 1998, avec des répartitions spécifiques entre différentes cultures. Pour la zone exploitant les eaux du continental intercalaire (C.I) et du continental terminal (C.T), la superficie actuellement irriguée est d'environ 100,000 hectares. L'évolution de la consommation en eau pour l'irrigation des périmètres irrigués n'a pas été linéaire, comme illustré dans la Figure , en raison des changements de stratégies intervenus au cours des dernières décennies

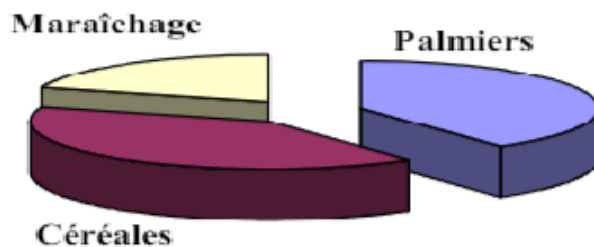


FIGURE I.16 – Superficie irriguée au Sahara

## I.5 Conclusion

Ce premier chapitre a permis de mettre en lumière les enjeux majeurs liés à la gestion de l'eau en agriculture, notamment dans les zones soumises à un stress hydrique croissant. L'irrigation, en tant que levier essentiel d'amélioration de la productivité agricole, nécessite aujourd'hui une approche plus efficiente et durable. Les pratiques traditionnelles d'irrigation, souvent basées sur des calendriers fixes ou des observations empiriques, montrent leurs limites face aux exigences actuelles en matière d'économie d'eau et d'optimisation des rendements. C'est dans ce contexte que s'inscrit l'intérêt de stratégies innovantes basées sur des outils technologiques avancés.

L'irrigation en Algérie est confrontée à des défis significatifs malgré les avancées réalisées. La régression des superficies irriguées, la nécessité croissante de recourir à des techniques comme l'irrigation localisée et les fluctuations de la consommation en eau dans les régions désertiques soulignent l'importance d'une gestion durable des ressources hydriques. Des investissements et une attention continue sont nécessaires pour optimiser l'utilisation de l'eau, augmenter les rendements agricoles et assurer la sécurité alimentaire dans le pays. Les données présentées dans les figures et les tableaux soulignent l'urgence d'actions concertées pour relever ces défis et promouvoir un développement agricole durable en Algérie.

# Chapitre II

## Capteurs d'humidité du sol

L'humidité est un paramètre aussi important que la pression ou la température. Elle modifie les caractéristiques électriques des matériaux et agit sur les réponses des systèmes réalisés. Elle peut être exprimée en un certain nombre de manières, et le nombre de méthodes pour la mesurer est encore plus grand. La surveillance et le contrôle de l'humidité paraît d'une grande importance pour la fiabilité des dispositifs.

Le besoin de protection de l'environnement a mené à l'expansion dans le développement de capteur. Les capteurs d'humidité ont attiré l'attention dans les domaines industriels et médicaux [7]. La mesure et la commande de l'humidité est importante dans beaucoup de secteurs comprenant l'industrie (papier, électroniques), l'environnement domestique (climatisation), la médecine (équipement respiratoire), etc....

Différentes méthodes sont utilisées pour les mesures d'humidité, par exemple, changements des propriétés mécaniques, optiques, et électriques des mélanges de vapeur d'eau de gaz [8].

Deux types de capteurs d'humidité existent :

- Capteur d'humidité capacitif
- Capteur d'humidité résistif
- Capteur d'humidité tensionmètre

### II.1 Humidité et principes physiques

La notion d'humidité du sol que l'on aborde ici est une notion d'humidité massique, notée % RH et exprimée selon :

$$\%RH = \frac{M_{\text{eau}}}{M_{\text{sol}}} \times 100, \quad \text{où} \quad \begin{cases} \%RH \text{ est l'humidité du sol en \%} \\ M_{\text{eau}} \text{ est la masse d'eau en g} \\ M_{\text{sol}} \text{ est la masse du sol en g} \end{cases} \quad (\text{II.1})$$

En agriculture, on définit trois répartitions dans le sol tel que le montre la Figure suivante [9] :

La première répartition est la saturation. Il est avéré que le sol est saturé lorsqu'il y a présence d'eau à l'état liquide dans sa composition. Son % RH est alors supérieur à 60 %. Cet état n'est pas souhaité car les racines ont tendances à pourrir dans cette humidité ambiante.

Le deuxième état du sol est qualifié de sol humide. Dans cet état, l'humidité est comprise entre 60 % et 20 %. C'est l'état idéal en agriculture. Le sol contient de l'eau sous forme de poches d'air humide situées entre les grains du sol. Il s'agit de cette humidité que les racines viennent capter pour se nourrir. Le taux exact d'humidité est variable selon le type de culture et de sol.

Le dernier état est le point de flétrissement. Cet état intervient aux alentours de 20 % d'humidité selon les sols. L'humidité est toujours présente mais sous forme de fines pellicules d'eau autour des grains du sol. En deçà de cette humidité, la plante n'est plus capable de prélever l'eau contenue dans le sol, il faut donc l'éviter .

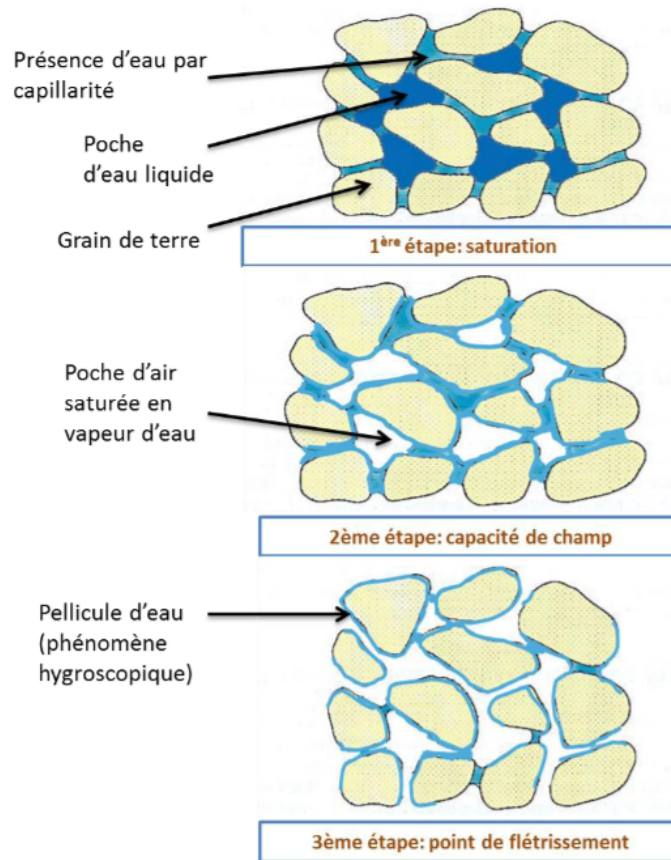


FIGURE II.1 – Répartitions de l'eau dans le sol

En résumé, l'irrigation doit réguler l'humidité du sol au-dessus du point de flétrissement mais en dessous de la saturation pour favoriser un développement optimal des cultures.

Les seuils de changement d'état sont variables selon la température. En effet, plus la température sera élevée, plus l'eau se transformera facilement en gaz. Les seuils seront donc relevés car la formation d'eau liquide sera plus difficile et l'eau aura tendance à être présente sous forme de vapeur. Ces variations interviennent sur les couches supérieures du sol, en effet au-delà de 30 cm de profondeur le sol est thermalisé.

### II.1.1 Détermination de l'humidité

La détermination de l'humidité est basée sur la quantité de vapeur d'eau par unité de masse de l'atmosphère. Comme tous les gaz dans l'atmosphère, la vapeur d'eau constitue une partie finie de toute la pression atmosphérique. Cette pression partielle de vapeur d'eau est proportionnelle au contenu d'humidité atmosphérique et fournit ainsi une mesure de la quantité absolue d'humidité dans l'air. Si un échantillon d'air est saturé de molécules d'eau à une température donnée, il atteint par la suite un état d'équilibre dans lequel le taux des molécules d'eau sortantes du liquide est le même que le taux des entrantes dans le liquide. En conséquence, le contenu de vapeur d'eau dans l'air et la pression de vapeur d'eau deviennent constants. La pression de vapeur dans cet état s'appelle la pression de vapeur d'eau de saturation et elle augmente avec l'augmentation de la température [10].

L'humidité absolue est définie comme un rapport de la masse de vapeur d'eau par unité de volume d'air, qui peut être exprimée comme :

$$\text{Humidité absolue} \left( \frac{g}{m^3} \right) = \frac{\text{la masse de la vapeur d'eau}}{\text{volume d'air}} \quad (\text{II.2})$$

L'humidité absolue change avec l'expansion de volume d'air de sorte qu'elle ne donne pas une représentation fiable de l'humidité globale dans l'air. L'humidité spécifique est le rapport de la masse de vapeur d'eau par unité de la masse de mélange d'air-eau-vapeur.

L'humidité absolue change avec l'expansion de volume d'air de sorte qu'elle ne donne pas une représentation fiable de l'humidité globale dans l'air. L'humidité spécifique est le rapport de la masse de vapeur d'eau par unité de la masse de mélange d'air-eau-vapeur.

$$\text{Humidité spécifique} = \frac{\text{la masse de la vapeur d'eau}}{\text{unité masse de mélange d'air-eau-vapeur}} \quad (\text{I-2})$$

Le rapport de mélange est défini comme la masse de vapeur d'eau par unité de la masse d'air sec :

$$\text{rapport de mélange} \left( \frac{g}{m^3} \right) = \frac{\text{la masse de la vapeur d'eau}}{\text{masse d'air sec}} \quad (\text{I-3})$$

L'humidité relative est le rapport du contenu de vapeur d'eau dans l'air à la quantité maximale de vapeur d'eau que l'air peut maintenir à une température donnée :

$$\text{Humidité relative} = \frac{\text{quantité de vapeur d'eau dans l'air}}{\text{quantité de vapeur d'eau que l'air peut tenir}} \quad (\text{I-4})$$

Puisque la pression de vapeur de saturation est une fonction de la température, l'humidité relative change non seulement avec la quantité de vapeur d'eau dans l'air, mais également avec la température. L'humidité relative est importante parce que c'est un paramètre sans dimension et il est associé à la sécheresse du matériel.

## II.2 Capteur d'humidité de sol capacitif

Des capteurs capacitifs d'humidité relative sont largement répandus dans des applications industrielles, commerciales, et la télémétrie de météorologie. Ils se composent d'un substrat sur lequel une couche mince d'oxyde de polymère ou de métal est déposée entre deux électrodes conductrices. La surface de sensation est enduite d'une électrode poreuse en métal pour la protéger contre la contamination et l'exposition à la condensation. Le substrat est en général fabriqué en verre, en céramique, ou en silicium. Le changement par accroissement de la constante diélectrique d'un capteur d'humidité capacitif est presque directement proportionnel à l'humidité relative de l'environnement. Le changement de la capacité est en général de 0.2 à 0.5 pF pour un changement de 1 % RH, alors que la capacité de bulk est entre 100 et 500 pF à RH 50 % et 25°C. Les capteurs capacitifs sont caractérisés par un coefficient de basse température, une capacité de fonctionner à des températures élevées (jusqu'à 200°C), un plein rétablissement de condensation, et une résistance raisonnable aux vapeurs chimiques. Le temps de réponse s'étend de 30 à 60 s pour un pas de changement de 63 % RH [11]

Le capteur capacitif du sol est un dispositif utilisé pour mesurer l'humidité du sol en exploitant les variations de la capacité électrique entre deux électrodes en fonction du contenu en eau du sol. Cette technologie est largement utilisée dans l'agriculture de précision, la gestion de l'irrigation et les études environnementales.



FIGURE II.2 – Capteur d'humidité capacitif

## II.2.1 Avantages et inconvénients de capteur d'humidité capacitif

### Avantages

- Mesure sans entretien sur de longues périodes possible même aux températures négatives.
- Indépendant de la pression atmosphérique, fonctionne également sous pression
- Souplesse d'emploi du capteur.

### Inconvénients

- Stabilité de long terme limitée
- Sensible à la condensation et à certains milieux agressifs

## II.3 Capteur d'humidité de sol résistif

L'humidité du sol est un paramètre fondamental dans divers domaines tels que l'agriculture de précision, l'irrigation intelligente et les études environnementales. La mesure de cette humidité peut être réalisée à l'aide de différentes technologies, parmi lesquelles les capteurs résistifs constituent une solution simple et économique.

Un capteur d'humidité du sol de type résistif repose sur la variation de la résistance électrique du sol en fonction de sa teneur en eau. Ce capteur est généralement constitué de deux électrodes insérées dans le sol, entre lesquelles un faible courant électrique est appliqué. Lorsque le sol est humide, la conductivité électrique augmente, ce qui entraîne une diminution de la résistance mesurée. À l'inverse, un sol sec présente une conductivité plus faible et une résistance plus élevée. La relation entre l'humidité du sol et la résistance électrique peut être exploitée pour estimer la teneur en eau du sol de manière indirecte.

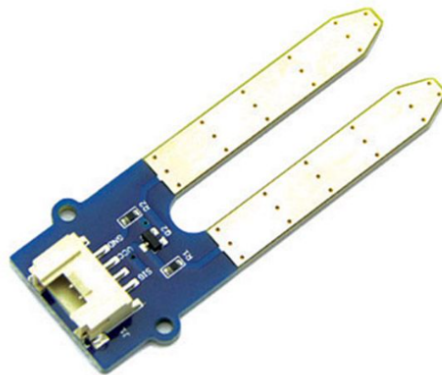


FIGURE II.3 – Capteur d'humidité résistif

## II.3.1 Avantages et inconvénients de capteur d'humidité résistif

### Avantages

- Coût faible : Ils sont généralement moins chers que les capteurs capacitifs ou TDR (Time Domain Reflectometry).
- Facilité d'utilisation : Ils sont simples à installer et à intégrer dans des systèmes de surveillance.
- Faible consommation d'énergie : Idéal pour les applications sur batterie ou les systèmes embarqués.
- Utilisation courante en arrosage automatique : Compatible avec des systèmes d'irrigation pour déclencher l'arrosage en fonction du besoin en eau du sol.

### **Inconvénients**

- Corrosion rapide des électrodes : Le contact direct avec le sol entraîne une dégradation progressive des électrodes en raison de l'oxydation et des réactions chimiques.
- Précision limitée : Les mesures peuvent être influencées par la composition du sol, la température et la salinité.
- Forte dépendance à la conductivité du sol : Un sol contenant des sels minéraux ou des engrais peut fausser la lecture.
- Durée de vie réduite : Nécessite un remplacement fréquent en raison de la corrosion et de l'usure des électrodes.
- Sensibilité aux interférences électriques : Peut être perturbé par d'autres équipements électroniques à proximité.

## **II.4 Erreurs des capteurs d'humidité du sol**

Les capteurs d'humidité du sol, qu'ils soient résistifs ou capacitifs, sont soumis à diverses erreurs pouvant affecter la précision et la fiabilité des mesures. Ces erreurs peuvent être classées en erreurs systématiques et erreurs aléatoires, chacune influençant différemment le fonctionnement des capteurs [12].

### **II.4.1 Erreurs systématiques**

Les erreurs systématiques sont prévisibles et répétables, ce qui permet leur correction par étalonnage. Elles sont principalement liées aux caractéristiques intrinsèques des capteurs et aux phénomènes physiques associés à leur principe de mesure.

- Non-linéarité : Certains capteurs, notamment capacitifs, présentent une réponse non linéaire sur toute la plage de mesure. Une correction électronique ou logicielle est souvent nécessaire.
- Influence de la température : La température affecte la conductivité électrique (capteurs résistifs) et la permittivité du sol (capteurs capacitifs), modifiant ainsi la réponse du capteur.
- Sensibilité au compactage du sol : Les capteurs capacitifs sont influencés par la répartition de l'eau et de l'air dans le sol, ce qui peut modifier la permittivité mesurée.
- Effet de polarisation : Spécifique aux capteurs résistifs, il peut entraîner des perturbations temporaires des mesures en raison des phénomènes électrochimiques au niveau des électrodes.

### **II.4.2 Erreurs aléatoires**

Les erreurs aléatoires résultent de facteurs externes difficilement maîtrisables, rendant leur correction plus complexe.

- Variabilité de la composition du sol : La présence de sels minéraux ou d'engrais modifie la conductivité du sol, ce qui fausse les mesures des capteurs résistifs.
- Contamination et usure : Les capteurs capacitifs peuvent être affectés par la présence de poussière ou de particules, tandis que les capteurs résistifs subissent une corrosion progressive des électrodes.
- Interférences électromagnétiques : Les capteurs capacitifs sont sensibles aux champs électriques environnants, pouvant perturber leurs mesures.

### **II.4.3 Différences entre capteurs résistifs et capacitifs**

Les capteurs résistifs sont sensibles à la conductivité du sol et subissent une usure rapide, tandis que les capteurs capacitifs offrent une meilleure durabilité mais restent sensibles aux variations de permittivité et aux interférences électromagnétiques. Le choix du capteur dépend donc de l'environnement d'utilisation et des exigences de précision.

TABLEAU II.1 – Comparaison entre capteurs résistifs et capacitifs

Type de capteur	Capacitif	Résistif
Conductivité du sol	Peu sensible	Très sensible aux variations de sels et d'engrais
Corrosion	Aucune corrosion	Dégradation rapide des électrodes
Température	Modéré	Oui
Interférences électromagnétiques	Sensible	Fortement affecté
Compactage du sol	Impacté	Moins impacté

## II.5 Capteur Intel-IrriS

L'optimisation de la gestion de l'eau en agriculture est un enjeu crucial pour améliorer les rendements tout en préservant les ressources hydriques. Intel-IrriS est une solution innovante conçue pour répondre à ce défi. Ce capteur intelligent, basé sur la technologie LoRa, permet de surveiller en temps réel l'humidité du sol et d'optimiser l'irrigation en fonction des besoins réels des cultures.

Grâce à ses fonctionnalités avancées, Intel-IrriS facilite la collecte et l'analyse des données agro-météorologiques, offrant ainsi aux agriculteurs un outil performant pour une gestion plus précise et efficace de l'irrigation. Son architecture ouverte et sa faible consommation énergétique en font une solution adaptée aux exploitations agricoles modernes, favorisant une agriculture durable et intelligente.



FIGURE II.4 – Kit de Intel-IrriS

Ce capteur de sol peut être soit un simple capteur capacitif (DF Robot SEN0308, figure de gauche), soit un tensiomètre (Irrometer WATERMARK 200SS).

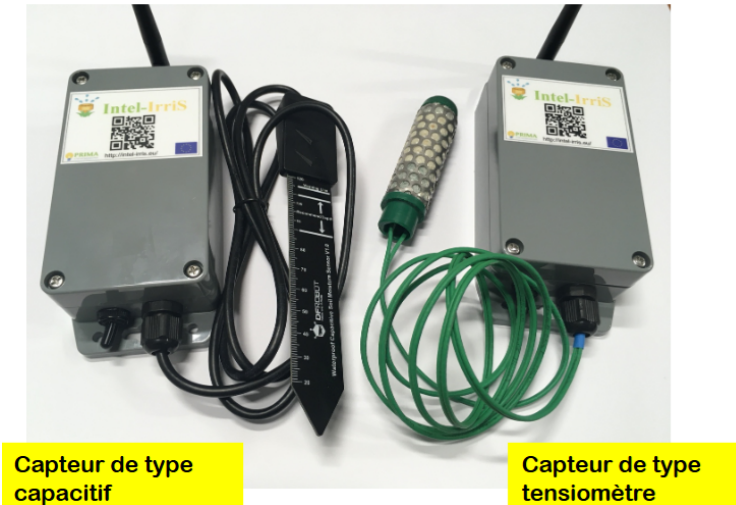


FIGURE II.5 – Capteur capacitif SEN0308 et le capteur tensiomètre 200SS

Le kit de démarrage INTEL-IRRIS propose une configuration par défaut dans laquelle deux dispositifs sont définis : un capteur capacitif et un tensiomètre.

### II.5.1 L'écrans principaux IIWA

IIWA signifie « INTEL-IRRIS Irrigation WaziApp ». Il s'agit d'une application web qui s'exécute sur le WaziGate (la passerelle IoT) afin d'ajouter un calibrage avancé ainsi que des paramètres relatifs au sol, aux plantes et aux conditions météorologiques. IIWA vise à fournir des indications précises sur l'état du sol et les besoins en irrigation. Cette application permet d'intégrer des capteurs, d'effectuer des traitements locaux et d'envoyer des données aux utilisateurs ou à des plateformes cloud. Plus précisément, WaziApp dans IIWA ajoute des fonctionnalités avancées telles que :

- Le calibrage des capteurs
- La gestion des paramètres du sol, des plantes et de la météo
- L'analyse des conditions du sol et les recommandations d'irrigation

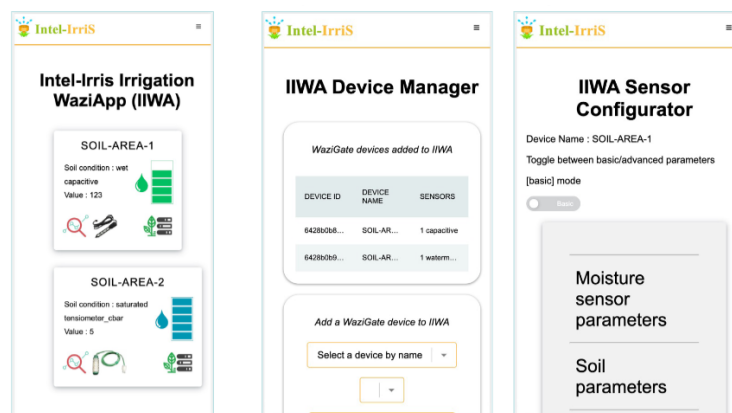


FIGURE II.6 – Interface de l'application WaziApp

L'application est encore en développement et pour le moment IIWA propose un cadre permettant d'intégrer facilement des traitements plus avancés et des fonctionnalités intelligentes.

## II.5.2 Architecture

IIWA est écrit en Python avec le framework Flask. Il comprend également des scripts JavaScript permettant d'interagir avec les pages HTML. Les fichiers principaux et les composants sont illustrés ci-dessous :

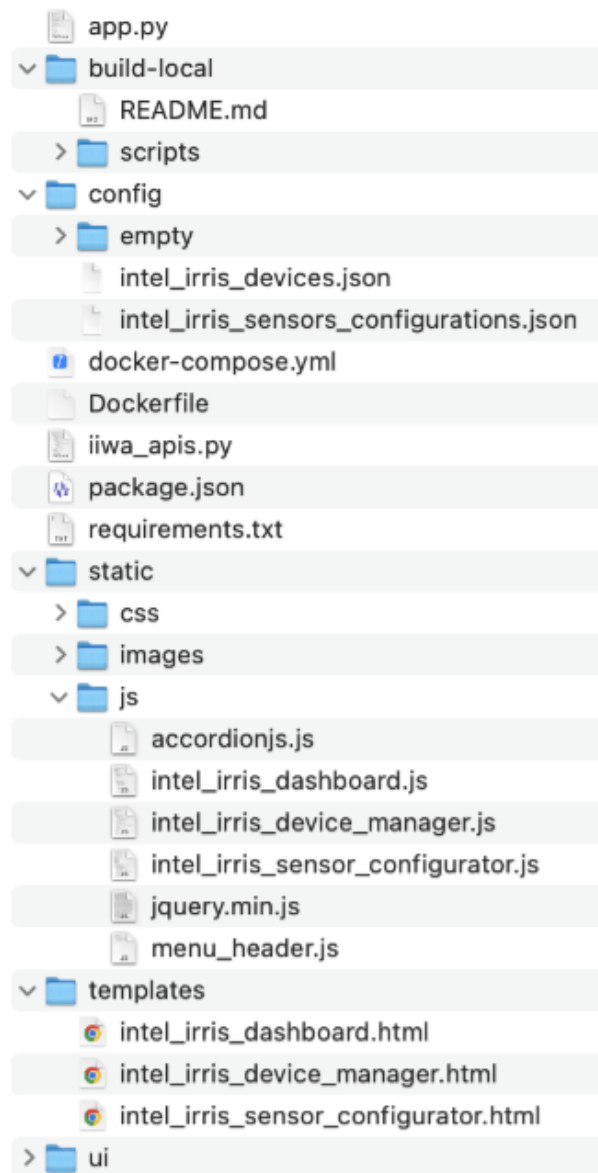


FIGURE II.7 – Les fichiers principaux et les composants de IIWA

- app.py est le programme principal en Python
- iiwa\_apis.py implémente les principales fonctions de IIWA et fournit également une API REST HTTP
- Les fichiers .js contiennent le code JavaScript permettant d'interagir avec les pages HTML
- Les fichiers modèles .html définissent les différentes interfaces (écrans) de IIWA
- Le dossier config contient les fichiers de configuration actuels ainsi que des modèles de fichiers de configuration vides
- Pour le défi de codage INTEL-IRRIS, le dossier build-local contient les instructions pour installer et exécuter IIWA sur un ordinateur hôte à des fins de développement

### II.5.3 Configuration des fichiers

Il y a 2 fichier de configurations :

#### **intel\_irris\_devices.json**

Il contient la liste des dispositifs ajoutés à IIWA. La configuration du kit de démarrage comprend 2 dispositifs par défaut : un capteur capacitif et un tensiomètre. Ci-dessous un exemple d'une telle configuration :

```
[
{
"device_id": "6444fcfd68f31909e6d04fd0",
"device_name": "SOIL-AREA-1",
"sensors_structure": "1_capacitive"
},
{
"device_id": "6444fd0068f31909e6d04fd5",
"device_name": "SOIL-AREA-2",
"sensors_structure": "1_watermark"
}
]
```

#### **intel\_irris\_sensors\_configurations.json**

Il contient les paramètres avancés de tous les capteurs d'humidité du sol provenant de tous les dispositifs ajoutés à IIWA.

La configuration du kit de démarrage comprend 2 dispositifs par défaut : un capteur capacitif et un tensiomètre.

Voici un exemple d'une telle configuration : le dispositif « 6444fcfd68f31909e6d04fd0 » avec l'identifiant logique de capteur « temperatureSensor\_0 » est un capteur capacitif, et le dispositif « 6444fd0068f31909e6d04fd5 » avec le même identifiant logique « temperatureSensor\_0 » est un capteur tensiomètre.

Dans ce dernier cas, le dispositif « 6444fd0068f31909e6d04fd5 » possède également un capteur de température du sol avec l'identifiant logique « temperatureSensor\_5 », qui fournit la valeur de la température du sol en temps réel.

```
{
"globals": {
"soil_salinity": "undefined",
"soil_bulk_density": "undefined",
"soil_field_capacity": "undefined",
"weather_region": "undefined",
"weather_weekly_evaporation": "undefined",
"weather_weekly_pluviometry": "undefined"
},
"sensors": [
{
"value": {
"sensor_type": "capacitive",
"sensor_age": "0",
"sensor_max_value": "800",
"sensor_min_value": "0",
"soil_type": "silty",
"soil_irrigation_type": "furrow",
"soil_salinity": "undefined",
```

```

"soil_bulk_density": "undefined",
"soil_field_capacity": "undefined",
"plant_category": "undefined",
"plant_variety": "undefined",
"plant_planting_date": "undefined",
"weather_region": "semi-arid",
"weather_weekly_evaporation": "undefined",
"weather_weekly_pluviometry": "undefined",
"last_value": 0
},
"soil_temperature_source": {
"soil_temperature_device_id": "undefined",
"soil_temperature_sensor_id": "undefined",
"soil_temperature_value": "undefined",
},
"device_id": "6444fcfd68f31909e6d04fd0",
"sensor_id": "temperatureSensor_0"
},
{
"value": {
"sensor_type": "tensiometer_cbar",
"sensor_age": "0",
"sensor_max_value": "124",
"sensor_min_value": "0",
"soil_type": "silty",
"soil_irrigation_type": "furrow",
"soil_salinity": "undefined",
"soil_bulk_density": "undefined",
"soil_field_capacity": "undefined",
"plant_category": "undefined",
"plant_variety": "undefined",
"plant_planting_date": "undefined",
"weather_region": "semi-arid",
"weather_weekly_evaporation": "undefined",
"weather_weekly_pluviometry": "undefined",
"last_value": 0
},
"soil_temperature_source": {
"soil_temperature_device_id": "6444fd0068f31909e6d04fd5",
"soil_temperature_sensor_id": "temperatureSensor_5",
"soil_temperature_value": "undefined"
},
"device_id": "6444fd0068f31909e6d04fd5",
"sensor_id": "temperatureSensor_0"
}
]
}

```

## II.6 Capteur d'humidimètre de sol WATERMARK

Le "Watermark Soil Moisture Meter" (ou capteur d'humidité du sol Watermark) est un capteur électronique utilisé pour mesurer l'humidité du sol, c'est-à-dire la quantité d'eau disponible pour les plantes dans la zone racinaire.



FIGURE II.8 – Kit de WATERMARK

Le capteur Watermark mesure la tension matricielle du sol (en centibars, cb), c'est-à-dire l'effort que doivent fournir les racines pour extraire l'eau du sol. Il se compose généralement :

- Un élément poreux (comme une capsule en céramique),
- Deux électrodes internes,
- Et d'un matériau granulaire qui maintient le contact entre le capteur et le sol.

Un capteur de tensiométrie mesure la tension matricielle du sol, c'est-à-dire la force avec laquelle l'eau est retenue par les particules du sol. Il ne mesure pas directement la teneur en eau, mais l'effort nécessaire pour que les racines des plantes extraient l'eau du sol.

L'interface du système affiche une valeur entre 0 et 200, qui signifie :

TABLEAU II.2 – Plage de mesure typique de WATERMARK

Valeur (cb)	État du sol	Interprétation
0 – 10	Très humide	Le sol est saturé; évitez l'irrigation. L'eau est facilement disponible pour les plantes.
10 – 30	Humide	Bonne humidité pour la majorité des cultures; pas besoin d'irriguer.
30 – 60	Moyennement humide	Zone optimale pour la croissance; surveiller l'évolution de l'humidité.
60 – 100	Sec	L'eau commence à manquer; prévoir une irrigation prochainement.
100 – 200	Très sec	Le sol est en stress hydrique; irrigation fortement recommandée.

## II.7 Comparaison des capteurs d'humidité du sol

Voici un tableau comparatif clair et synthétique des trois types de capteurs d'humidité du sol :

TABLEAU II.3 – Comparaison des capteurs d'humidité du sol

Critère	Capteur Résistif	Capteur Capacitif	Capteur Tensionométrique
Principe de fonctionnement	Mesure de la résistance électrique du sol	Mesure de la capacité diélectrique du sol	Mesure de la tension de rétention de l'eau dans le sol
Précision	Faible à moyenne	Moyenne à élevée	Élevée (surtout dans les sols argileux)
Sensibilité à la salinité	Élevée	Faible	Faible
Réactivité	Rapide	Très rapide	Lente à moyenne
Coût	Faible	Moyen à élevé	Moyen
Durée de vie	Courte (corrosion possible)	Longue	Moyenne
Applications typiques	Systèmes simples, enseignement	Agriculture de précision	Cultures sensibles, recherche
Unité de mesure	Ohms ( $\Omega$ )	Tension ou % d'humidité	Centibars (cb) ou kilopascals (kPa)

## II.8 Conclusion

L'agriculture, pilier fondamental du développement économique et de la sécurité alimentaire, est confrontée à de nombreux défis liés aux changements climatiques, à la raréfaction des ressources en eau et à l'évolution des technologies. L'un des enjeux majeurs est la gestion efficace de l'irrigation afin de réduire les pertes d'eau et d'améliorer la productivité. Toutefois, malgré l'existence de nouvelles solutions technologiques et de pratiques optimisées, de nombreux agriculteurs manifestent une réticence à adopter ces innovations. Cette méfiance, souvent alimentée par la peur de l'inconnu, constitue un frein au progrès et à la durabilité des systèmes agricoles.

La gestion des pertes d'eau en irrigation est un enjeu crucial pour assurer la durabilité des systèmes agricoles et préserver les ressources hydriques. Cependant, la réticence des agriculteurs face à l'inconnu constitue un frein majeur à l'adoption des innovations. Une approche intégrée, combinant information, incitations économiques et démonstrations concrètes, est nécessaire pour surmonter ces résistances et favoriser une transition vers des pratiques plus durables. En dépassant la peur du changement, l'agriculture pourra relever les défis du futur et assurer une gestion optimisée de l'eau, au bénéfice des générations actuelles et futures.

les capteurs résistifs sont fortement influencés par la conductivité du sol et subissent une dégradation rapide due à la corrosion des électrodes, tandis que les capteurs capacitifs offrent une meilleure durabilité mais restent sensibles aux variations de texture du sol et aux interférences électromagnétiques. Le choix du capteur dépend donc des conditions spécifiques du site de mesure et des exigences de précision. Pour des

environnements où la conductivité du sol varie fortement, un capteur capacitif est souvent plus fiable. En revanche, pour des applications nécessitant une solution économique à court terme, un capteur résistif peut être envisagé malgré sa durée de vie plus limitée.

## Chapitre III

# Partie expérimental

### III.1 Présentation du site expérimental

#### III.1.1 Localisation géographique de la ferme expérimentale

L'essai expérimental a été conduit au niveau de la ferme pilote de l'Université Abdelhamid Ben Badis de Mostaganem, située dans la région de Mezeghrane (wilaya de Mostaganem, nord-ouest de l'Algérie). Cette station expérimentale universitaire constitue un espace dédié à la recherche agronomique appliquée et à la formation pratique des étudiants dans les domaines de l'agriculture, de l'agronomie de précision et des techniques d'irrigation.



FIGURE III.1 – La ferme expérimentale (Mezeghrane – Université de Mostaganem)

Elle s'étend sur une superficie totale d'environ 1 hectare. Dans le cadre de cette étude, la parcelle a été divisée en deux zones d'expérimentation bien distinctes :

- Une première zone, équipée de capteurs d'humidité du sol Intel-IrriS, utilisée pour le pilotage intelligent de l'irrigation en temps réel.
- Une seconde zone témoin, dépourvue de capteurs, irriguée selon les méthodes classiques, servant de référence comparative.



FIGURE III.2 – Position géographique (Googla Map)

Le choix de ce site s'est basé sur sa disponibilité en infrastructure d'irrigation (notamment les systèmes d'aspersion), la facilité d'accès aux équipements modernes tels que les capteurs Intel-IrriS, ainsi que sur sa représentativité agro-climatique pour les cultures céréalières, notamment le blé tendre.

La région de Mostaganem bénéficie d'un climat méditerranéen semi-aride caractérisé par des hivers doux et humides et des étés chauds et secs. Le sol du site présente une texture argilo-limoneuse, favorable à la culture du blé, avec une bonne capacité de rétention en eau, ce qui permet une meilleure évaluation de l'efficacité de l'irrigation pilotée.

L'expérimentation s'est déroulée au cours de la campagne agricole en 2025, sur une culture de blé tendre (*Triticum aestivum* L.), semée selon les pratiques culturales locales. Deux parcelles de superficie identique ont été aménagées pour comparer deux modalités d'irrigation par aspersion : l'une assistée par des capteurs d'humidité Intel-IrriS, et l'autre irriguée manuellement selon une durée fixe.

Cette plateforme expérimentale a permis d'évaluer l'impact d'un pilotage intelligent de l'irrigation sur la consommation d'eau, dans un contexte marqué par la raréfaction des ressources hydriques et la nécessité d'optimiser chaque goutte d'eau utilisée en agriculture.

### III.1.2 Description pédoclimatique et caractéristiques du sol et du climat

La pluviométrie annuelle moyenne enregistrée dans cette région varie entre 300 et 500 mm, ce qui rend l'irrigation indispensable pour la réussite des cultures en période de déficit hydrique, notamment pendant les stades phénologiques sensibles du blé tendre. Les températures maximales peuvent dépasser les 35°C en été, tandis que les minimales hivernales restent modérées, rarement en dessous de 5°C.

Ces caractéristiques pédoclimatiques font de ce site un cadre idéal pour expérimenter de nouvelles techniques de gestion de l'irrigation, notamment celles basées sur des capteurs d'humidité du sol, dans l'optique d'optimiser les apports en eau selon les besoins réels des cultures.

La zone expérimentale de Mezeghrane, située dans la wilaya de Mostaganem, se caractérise par un climat méditerranéen semi-aride à hiver doux et été chaud. Ce type de climat est marqué par une irrégularité interannuelle des précipitations, avec une moyenne annuelle estimée entre 300 et 500 mm. La pluviométrie est essentiellement concentrée entre les mois d'octobre et avril, période durant laquelle la majorité des besoins hydriques des cultures est couverte. En revanche, la saison estivale est marquée par une sécheresse

prononcée, nécessitant un recours systématique à l'irrigation pour assurer un développement végétatif optimal.

Les températures moyennes varient entre 10°C en hiver et 30°C en été, avec des pics pouvant dépasser 35°C durant les mois les plus chauds. L'humidité relative de l'air est généralement faible pendant l'été, ce qui accentue l'évapotranspiration des cultures.

Ces caractéristiques pédoclimatiques justifient pleinement le recours à un pilotage précis de l'irrigation, notamment à travers l'utilisation de capteurs d'humidité comme les dispositifs Intel-IrriS, afin de rationaliser les apports en eau selon les besoins réels du sol et de la plante.

### III.1.3 Choix de la culture (blé tendre) et de la période expérimentale

Le choix du blé tendre (*Triticum aestivum* L.) comme culture de référence pour cette expérimentation repose sur plusieurs considérations agronomiques, économiques et environnementales. Il s'agit d'une céréale largement cultivée dans la région de Mostaganem et dans l'ensemble du territoire algérien, où elle constitue une composante essentielle de la sécurité alimentaire nationale. Le blé tendre est principalement utilisé pour la fabrication du pain et de divers produits boulangers, ce qui renforce son importance stratégique.



FIGURE III.3 – Le blé tendre (*Triticum aestivum* L.)

Sur le plan agronomique, le blé tendre présente des exigences hydriques modérées mais critiques à certains stades de développement (levée, montaison, épiaison et remplissage des grains), ce qui en fait une culture particulièrement sensible aux déficits en eau. L'utilisation d'un système de pilotage de l'irrigation à l'aide de capteurs d'humidité du sol s'avère donc pertinente pour optimiser les apports en fonction des besoins réels de la plante.

L'expérimentation a été conduite au cours de la campagne agricole 2024–2025, avec un semis réalisé en mois de novembre 2024, période optimale pour le blé dans la région, afin de bénéficier des premières précipitations automnales et de limiter l'exposition au stress hydrique en fin de cycle. L'irrigation complémentaire a été appliquée durant les phases critiques de développement, notamment en période de déficit pluviométrique.

Ce choix de culture et de calendrier expérimental a permis de mettre en œuvre un protocole réaliste, représentatif des conditions agricoles locales, tout en évaluant de manière rigoureuse l'efficacité du pilotage de l'irrigation par capteurs dans un contexte semi-aride.

## III.2 Dispositif expérimental

### III.2.1 Description des deux zones expérimentales

Dans le cadre de cette étude, une parcelles expérimentale a été aménagée au sein de la ferme universitaire de Mezeghrane, avec pour objectif d'évaluer l'impact du pilotage de l'irrigation par capteurs sur la consommation en eau et l'efficacité de l'irrigation par aspersion appliquée au blé tendre (*Triticum aestivum* L.). Les deux expériences de l'irrigation son de superficies équivalentes, soumis aux mêmes conditions pédoclimatiques et culturales, et ont été semés simultanément avec la même variété de blé et selon les mêmes pratiques agricoles.

#### Aspersion pilotée par capteurs Intel-IrriS :

Dans cette première zone d'irrigation, un système d'aspersion a été couplé à des capteurs d'humidité du sol de type Intel-IrriS et WATERMARK, installés à différentes profondeurs afin de suivre en temps réel l'évolution de la teneur en eau dans la zone racinaire. Le système d'irrigation était déclenché manuellement, mais son arrêt était conditionné par le signal des capteurs indiquant que le sol avait atteint son seuil de saturation. Ce mode de gestion vise à adapter les apports en eau aux besoins réels de la culture, en évitant à la fois le stress hydrique et les pertes par percolation.



FIGURE III.4 – L'installation de capteur Intel-IrriS sur la surface



FIGURE III.5 – L'installation de capteur Intel-Irris sur le profond

#### **Aspersion sans capteurs :**

La deuxième zone d'irrigation, servant de témoin, a été irriguée par aspersion selon une méthode classique sans recours aux capteurs. L'irrigation y a été appliquée de manière fixe pendant une durée de deux heures, sans prise en compte de l'humidité réelle du sol. Cette modalité représente les pratiques courantes observées dans certaines exploitations agricoles où les apports en eau ne sont pas systématiquement pilotés.



FIGURE III.6 – Irrigation par aspersion sans capteurs

Ce dispositif comparatif a permis de mettre en évidence les différences en termes de durée d'irrigation, de volume d'eau utilisé et d'efficacité globale entre une gestion intelligente de l'irrigation assistée par capteurs et une irrigation fixe non contrôlée.

### **III.2.2 Modalités de l'irrigation appliquée dans chaque zone :**

Les modalités d'irrigation ont été définies selon l'objectif de comparaison entre une gestion optimisée par capteurs d'humidité du sol et une méthode traditionnelle d'irrigation fixe. Les deux zones d'irrigation ont été irriguées par aspersion, à l'aide de rampes mobiles alimentées par un système sous pression.

#### **Aspersion pilotée par capteurs Intel-IrriS :**

Dans cette parcelle, les capteurs Intel-IrriS ont été positionnés à différentes profondeurs caractéristiques de la zone racinaire du blé tendre, afin de mesurer l'humidité volumique du sol en temps réel. Une fois le seuil de saturation défini (selon les courbes de rétention du sol et la capacité au champ locale) atteint à la profondeur critique, l'irrigation a été arrêtée manuellement. Lors de l'essai, l'irrigation a été stoppée après une heure de fonctionnement, les capteurs ayant indiqué une humidité suffisante dans le profil du sol. Cette approche permet de ne fournir que la quantité d'eau nécessaire, sans excès.

#### **Aspersion sans capteurs (témoin)**

Dans la deuxième zone d'irrigation, une irrigation classique a été appliquée pendant une durée fixe de deux heures, sans évaluation de l'humidité du sol. Cette méthode est représentative de pratiques agricoles encore largement utilisées, où les irrigations sont souvent programmées sur une base empirique, sans outils de mesure ou de régulation.

### III.2.3 Méthode de suivi de l'humidité du sol et déclenchement de l'irrigation

Dans la parcelle expérimentale équipée des capteurs Intel-IrriS, le suivi de l'humidité du sol a été assuré à l'aide de sondes tensiométriques électroniques insérées profondeurs 30 cm, correspondant à la zone active d'absorption racinaire du blé tendre.

Le capteur Intel-IrriS mesure en continu la teneur en eau du sol exprimée en pourcentage volumique, et transmet les données via une interface mobile (WaziGate). L'irrigation par aspersion a été déclenchée manuellement en début de cycle, puis arrêtée dès que les capteurs ont détecté que l'humidité du sol avait atteint le seuil de saturation défini au préalable. Ce seuil a été établi en fonction de la capacité au champ du sol, estimée lors d'analyses pédologiques effectuées en amont de l'expérimentation.

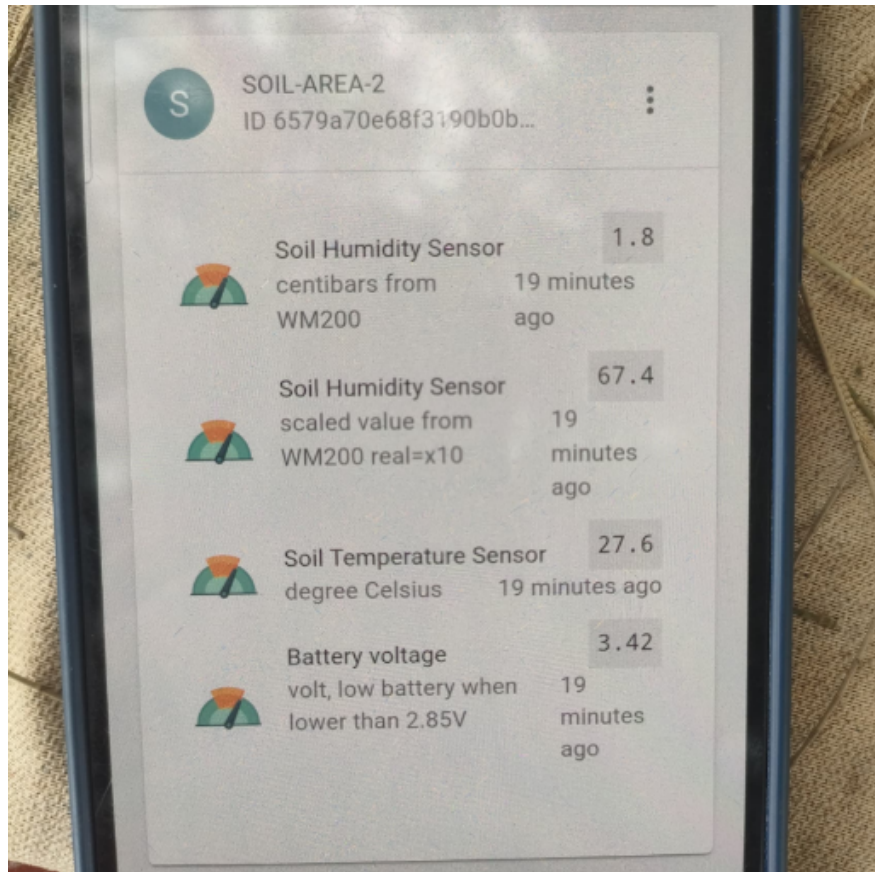


FIGURE III.7 – Interface de l'application WaziGate

Le déclenchement de l'irrigation dans la zone témoin s'est effectué sans prise en compte de l'état hydrique du sol. L'eau a été appliquée de manière uniforme pendant une heure et demi, indépendamment des besoins réels de la culture.

Cette méthode de comparaison permet de souligner les avantages d'un système d'irrigation assisté par capteurs, à travers une meilleure gestion de l'eau, une réduction des pertes par drainage et une adaptation précise aux besoins hydriques de la plante en temps réel.

### III.2.4 Calcul du débit d'eau d'irrigation

Le calcul du débit d'eau appliqué lors de l'irrigation constitue une étape essentielle pour l'évaluation des volumes consommés et des économies réalisées. Dans le cadre de cette expérimentation, le débit du système d'aspersion utilisé a été mesuré de manière directe à l'aide d'un chronomètre et d'un récipient gradué, en conditions réelles de fonctionnement. Voici le calcul appliqué :

On a  $D$  le débit volumique :

$$[D] = \frac{[l]}{[t]} \quad (\text{III.1})$$

On a un fût d'eau de 200 L

Et le temps mesuré par le chronomètre est

$$1 : 23 = 1.383 \text{ min} \quad (\text{III.2})$$

Qui veut dire :

$$D = \frac{200}{1.383} \quad (\text{III.3})$$

$$D = 144.578 \text{ l/min} \quad (\text{III.4})$$

Ou :

$$D = 144.578 \times \frac{60}{1000} \quad (\text{III.5})$$

$$D = 8.678 \text{ m}^3/\text{h} \quad (\text{III.6})$$

Les mesures effectuées ont indiqué que le débit du système d'irrigation était de 200 litres par 1 minute et 23 secondes, soit un débit horaire de 8678 litres par heure ( $9 \text{ m}^3/\text{h}$ ).



FIGURE III.8 – Méthode de calculer le débit d'eau d'irrigation

À partir de cette valeur, les volumes d'eau totaux consommés dans chaque site ont été déterminés comme suit :

**la zone piloté par capteurs :**

- Durée d'irrigation = 1 heure
- Volume consommé =  $1 \times 8000 \text{ L} = 8000 \text{ litres}$



FIGURE III.9 – Résultats obtenu par les capteurs

**la zone irrigé sans capteurs (témoin) :**

- Durée d'irrigation = 1.5 heures
- Volume consommé =  $1.5 \times 8000 \text{ L} = 13\ 012 \text{ litres}$

Cette comparaison a permis de constater une économie de 41230 litres d'eau par irrigation dans le site piloté par capteurs Intel-IrriS, soit 30 % de réduction par rapport à l'irrigation conventionnelle. Cette économie est significative, notamment dans le contexte des régions semi-arides, où la ressource en eau devient de plus en plus rare.

Ce calcul met en évidence l'intérêt de l'utilisation de capteurs pour un pilotage précis de l'irrigation, permettant non seulement d'optimiser les ressources, mais également de préserver la qualité des sols et d'améliorer la durabilité des pratiques agricoles.

### III.3 Résultats obtenus

#### III.3.1 Durée d'irrigation dans chaque site

Le tableau 3.1 suivant présente la durée d'irrigation enregistrée lors de six tours successifs dans les deux dispositifs expérimentaux : la zone première, équipée de capteurs Intel-IrriS, et la zone deuxième, irriguée selon une méthode traditionnelle sans capteurs. Cette comparaison a pour objectif de démontrer l'intérêt d'un pilotage de l'irrigation basé sur les besoins réels du sol et des cultures.

On a le débit volumique :

$$D = \frac{V}{t} \quad (\text{III.7})$$

Où :  $V$  c'est le volumique d'eau et  $t$  le temps

Puisqu'on a le même débit pour les 2 cas, alors :

$$D = \frac{V_1}{t_1} = \frac{V_2}{t_2} \quad (\text{III.8})$$

TABLEAU III.1 – Durée d'irrigation pour chaque tour avec et sans capteurs Intel-IrriS

N° Tour	Avec capteurs Intel-IrriS (min)	Sans capteurs (min)
1	62	90
2	59	90
3	64	90
4	61	90
5	60	90
6	63	90
<b>Moyenne</b>	<b>61,5 min</b>	<b>90 min</b>
<b>Écart-type</b>	<b>1,87 min</b>	<b>0,00 min</b>

Sur la zone première, la durée d'irrigation varie légèrement d'un tour à l'autre, oscillant entre 59 et 64 minutes. Cette variation, bien que faible (écart-type de 1,87 minutes), est le résultat direct du fonctionnement des capteurs Intel-IrriS. Ces derniers mesurent l'humidité du sol en temps réel et interrompent automatiquement l'irrigation dès que le seuil de saturation hydrique optimal est atteint. Ainsi, l'irrigation est déclenchée et arrêtée en fonction des besoins réels de la culture, ce qui permet d'éviter aussi bien les excès que les carences en eau.

À l'inverse, la zone deuxième présente une durée d'irrigation constante de 90 minutes à chaque tour, sans aucune adaptation. L'irrigation est déclenchée manuellement pour une durée préétablie, sans tenir compte de l'humidité effective du sol. Cette rigidité illustre une méthode empirique, fondée sur des habitudes ou des hypothèses, qui peuvent entraîner des gaspillages d'eau ou un stress hydrique inutile.

En moyenne, la durée d'irrigation sur le site première est de 61,5 minutes, soit presque moitié moins que celle de la zone deuxième. Ce résultat confirme que l'utilisation des capteurs a permis de réduire significativement le temps d'arrosage, sans compromettre l'apport hydrique nécessaire à la plante. Ce gain de temps se traduit directement par une économie en eau, une réduction de la charge de travail, et une meilleure efficacité de la ressource.

Enfin, l'écart-type mesuré sur le site 1 témoigne de la flexibilité du système : celui-ci ajuste automatiquement la durée d'irrigation en fonction des variations climatiques, de l'humidité résiduelle du sol et du stade phénologique de la culture. Cette réactivité permet de mieux accompagner la plante tout au long de son cycle de développement.

#### III.3.2 Volume d'eau utilisé dans chaque cas

Le tableau 3.2 présente les volumes d'eau appliqués lors de six tours d'irrigation réalisés sur les deux parcelles expérimentales : la première, équipée de capteurs Intel-IrriS, et la seconde, soumise à une irrigation

sans capteurs. Ces données permettent d'évaluer l'efficacité hydrique de chaque méthode d'irrigation, en lien avec la durée de fonctionnement et le débit du système d'aspersion utilisé.

$$V = \frac{D}{t} \quad (\text{III.9})$$

$$V_1 = D \times t_1 \quad (\text{III.10})$$

$$V_2 = D \times t_2 \quad (\text{III.11})$$

D'après les deux équations (III.9) et (III.10) on a :

$$V_2 - V_1 = D(t_2 - t_1) \quad (\text{III.12})$$

$$\Delta V = D \times \Delta t \quad (\text{III.13})$$

TABLEAU III.2 – Volumes d'eau utilisés pour chaque tour avec et sans capteurs Intel-IrriS

N° Tour	Avec capteurs Intel-IrriS (litres)	Sans capteurs (litres)
1	8 964	13 012
2	8 530	13 012
3	9 252	13 012
4	8 819	13 012
5	9 675	13 012
6	8 108	13 012
<b>Moyenne</b>	<b>8 891 litres</b>	<b>13 012 litres</b>
<b>Écart-type</b>	<b>270,76 litres</b>	<b>0,00 litre</b>

Dans la première zone, les volumes d'eau varient entre 8 730 et 9675 litres par tour, avec une moyenne de 8 891 litres. Ces volumes ont été automatiquement régulés par les capteurs d'humidité Intel-IrriS, qui permettent de déclencher et d'arrêter l'irrigation en fonction du taux d'humidité dans le sol. Cette régulation dynamique assure que seuls les besoins réels de la culture en eau sont satisfaits, sans excès.

Dans la deuxième zone irriguée, chaque tour d'irrigation a consommé exactement 13 012 litres, soit le tiers de la moyenne du site une. Ce volume est constant, car l'irrigation est déclenchée manuellement pour une durée prédéterminée de 90 minutes, sans considération des conditions du sol. Cela démontre clairement une absence de pilotage et une forte probabilité de gaspillage de l'eau.

La comparaison directe des moyennes montre une économie moyenne de 4 120 litres d'eau par tour d'irrigation (soit une réduction de près de 30 %), grâce à l'utilisation des capteurs. Sur une saison complète avec plusieurs cycles d'irrigation, cette réduction représente des milliers de litres économisés, ce qui est crucial dans les régions où l'eau est une ressource rare et précieuse.

L'écart-type des volumes d'eau dans la zone une est de 270.67 litres, ce qui reflète une légère variation contrôlée selon les besoins spécifiques à chaque tour (température, vent, humidité résiduelle, etc.). Cette flexibilité intelligente montre que l'eau est appliquée avec précision. En revanche, la zone deuxième ne montre aucune variation, révélant une absence totale d'adaptabilité.

### III.4 Analyse et interprétation des résultats

L'expérimentation menée sur la culture du blé tendre à la ferme de l'université Abdelhamid Ben Badis – Mostaganem a permis de comparer deux méthodes d'irrigation : l'une pilotée par capteurs d'humidité du sol (Intel-IrriS), et l'autre traditionnelle, basée sur une durée fixe sans retour d'information sur les conditions réelles du sol. Les résultats obtenus permettent de tirer plusieurs enseignements importants, tant sur le plan quantitatif que qualitatif.

**Réduction significative du temps et du volume d'irrigation :** L'un des résultats les plus marquants est la réduction significative du temps d'irrigation observé sur le site équipé de capteurs. En moyenne, la durée d'arrosage a été réduite de près de 30 %, passant de 90 minutes à environ 61,5 minutes (site piloté). Cette baisse de durée a directement entraîné une économie d'eau de 4 120 litres par tour d'irrigation, ce qui est extrêmement significatif dans le contexte d'une agriculture rationnelle en climat semi-aride.

Ces économies sont rendues possibles grâce à l'ajustement en temps réel des apports hydriques, en fonction de l'état d'humidité réel du sol.

**Amélioration de l'efficacité de l'irrigation :** L'irrigation pilotée permet une meilleure efficacité hydrique : chaque litre d'eau apporté est utilisé de manière plus utile par la plante. Contrairement à l'irrigation fixe, qui risque de provoquer une percolation en profondeur ou une évaporation excessive, le système piloté garantit que l'eau reste disponible dans la zone racinaire active, sans excès.

**Flexibilité et adaptation aux conditions climatiques :** La variation légère de la durée d'irrigation d'un tour à l'autre sur le site équipé de capteurs (écart-type = 1,8 min) montre que le système est capable de s'ajuster intelligemment aux conditions climatiques changeantes (température, vent, humidité résiduelle, etc.). Ce comportement adaptatif est un atout majeur pour les cultures en plein champ, exposées aux aléas météorologiques.

**Réduction du stress hydrique ou de l'engorgement du sol :** Grâce au déclenchement et à l'arrêt de l'irrigation en fonction du seuil de saturation optimal, les capteurs permettent d'éviter à la fois les situations de stress hydrique (sol trop sec) et d'engorgement (sol trop humide). Ces deux extrêmes nuisent au développement racinaire et au rendement. L'ajustement dynamique contribue donc au confort hydrique optimal de la culture.

**Impact environnemental positif :** L'économie d'eau obtenue, si elle est extrapolée à l'échelle d'un périmètre irrigué ou d'une exploitation agricole entière, représente un gain important en termes de préservation des ressources. De plus, en évitant les excès d'eau, on réduit également les risques de lessivage des éléments nutritifs vers les nappes phréatiques, ce qui contribue à une agriculture plus propre et plus durable.

### III.4.1 Avantages de l'irrigation pilotée par capteurs

L'expérimentation conduite sur la culture du blé tendre a permis de comparer deux approches d'irrigation : l'une pilotée à l'aide des capteurs Intel-IrriS, et l'autre réalisée sans pilotage, selon une durée fixe d'une heure et demi par tour d'eau. L'analyse des données collectées met en évidence plusieurs avantages significatifs liés à l'usage des capteurs d'humidité pour la gestion de l'irrigation.

#### Réduction de la durée d'irrigation

L'un des résultats les plus notables concerne la diminution du temps d'irrigation dans la parcelle équipée de capteurs. À chaque intervention, les capteurs ont permis de détecter en temps réel le seuil de saturation du sol, ce qui a conduit à une interruption automatique de l'irrigation après seulement une heure, contre une heure et demi dans le site témoin.

Ainsi, pour un débit d'aspersion mesuré à 200 litres toutes les 1 minute 23 secondes, la durée totale économisée représente près de 4 120 litres d'eau par tour d'irrigation. Sur l'ensemble de la campagne culturale, cette optimisation se traduit par une économie hydrique significative, ce qui est particulièrement précieux dans un contexte de stress hydrique croissant.

#### Amélioration de l'efficacité de l'eau

Le pilotage par capteurs permet une meilleure adéquation entre l'apport en eau et les besoins réels de la plante. En évitant les excès d'irrigation, on limite non seulement les pertes par infiltration profonde, mais

également le risque de lessivage des nutriments, qui peuvent appauvrir le sol et nuire au développement racinaire.

L'humidité du sol a été maintenue dans une plage optimale tout au long du cycle, ce qui favorise un développement végétatif régulier, une meilleure absorption des éléments nutritifs et une réduction du stress hydrique.

### **Réduction des coûts et de la charge de travail**

L'irrigation classique repose sur une planification approximative et nécessite une présence humaine constante pour déclencher et arrêter manuellement le système. Avec l'intégration des capteurs Intel-IrriS, les décisions d'irrigation sont basées sur des données objectives et en temps réel, ce qui réduit la marge d'erreur et diminue les interventions humaines.

Cette automatisation partielle contribue à réduire la main-d'œuvre, à rationaliser l'utilisation des équipements et à diminuer les coûts opérationnels liés à la consommation d'énergie pour le pompage.

### **Contribution à une agriculture durable**

Enfin, l'utilisation de capteurs connectés s'inscrit dans une démarche d'agriculture intelligente et durable. En optimisant les ressources, en réduisant le gaspillage d'eau et en assurant un suivi précis de l'état hydrique du sol, cette technologie contribue à la préservation des ressources naturelles et à l'adaptation des pratiques agricoles face aux changements climatiques.

## **III.4.2 Comparaison avec l'irrigation fixe**

Afin d'évaluer objectivement l'efficacité de l'irrigation pilotée par capteurs, une comparaison a été établie avec une méthode d'irrigation traditionnelle fixe, appliquée sur une deuxième parcelle témoin, où aucun capteur n'était installé. Dans cette dernière, l'irrigation s'effectuait systématiquement pendant une heure et demie, sans prise en compte de l'humidité réelle du sol ni des besoins immédiats de la plante.

### **Consommation d'eau**

L'un des écarts les plus marquants observés entre les deux dispositifs réside dans la quantité d'eau utilisée. Sur la base d'un débit d'irrigation de 8.674 m<sup>3</sup>/h, la différence d'une heure entre les deux méthodes représente une économie de 4.12 m<sup>3</sup> d'eau par tour d'irrigation dans la parcelle pilotée par capteurs.

Sur une campagne culturale complète, avec plusieurs interventions, cela se traduit par une réduction globale d'environ 30 % de la consommation en eau, sans compromettre la santé de la culture ni son rendement.

### **Gestion du stress hydrique**

L'irrigation fixe présente l'inconvénient de ne pas tenir compte de l'état hydrique réel du sol, ce qui peut conduire à deux situations problématiques :

- Sur-irrigation, provoquant une saturation du sol, le lessivage des nutriments et un gaspillage d'eau
- Sous-irrigation, si les conditions climatiques varient et que la durée fixée devient insuffisante.

Dans la méthode avec capteurs, l'humidité du sol est surveillée en temps réel, permettant une irrigation ajustée aux besoins de la plante, évitant ainsi ces deux extrêmes.

### **Efficacité agronomique**

Bien que le suivi du rendement final soit encore en cours d'analyse, les observations de terrain révèlent que la parcelle gérée par capteurs présentait une croissance plus homogène, une meilleure vigueur foliaire, et un sol mieux structuré en surface. À l'inverse, la parcelle à irrigation fixe montrait parfois des zones compactées ou gorgées d'eau.

Cela laisse penser que l'irrigation pilotée favorise un meilleur développement racinaire, grâce à des conditions d'humidité plus stables et moins agressives.

### **Charge de travail et précision**

L'irrigation fixe exige une présence humaine constante et une estimation empirique du moment opportun pour arroser. Cela engendre une dépendance à l'expérience de l'opérateur, avec un risque élevé d'erreurs. À l'opposé, l'irrigation par capteurs offre une approche scientifique, reproductible et plus précise, reposant sur des données fiables, ce qui limite les interventions humaines et optimise le pilotage.

### **III.4.3 Impact sur la gestion durable de l'eau**

L'un des objectifs majeurs de l'agriculture moderne est de concilier productivité et durabilité, en particulier dans les régions soumises à un stress hydrique croissant. Dans ce contexte, l'expérimentation menée sur la culture du blé tendre avec le système Intel-IrriS apporte des éléments concrets démontrant que le pilotage de l'irrigation par capteurs contribue activement à une gestion durable de l'eau.

#### **Réduction significative des volumes d'eau utilisés**

Grâce au pilotage basé sur l'humidité réelle du sol, les volumes d'eau apportés ont été strictement limités aux besoins réels de la plante. Cette stratégie a permis de réduire en moyenne de 30 % la quantité d'eau utilisée par rapport à l'irrigation fixe, tout en maintenant un développement végétatif satisfaisant.

#### **Limitation du gaspillage et des pertes par percolation**

L'irrigation excessive entraîne souvent des pertes par drainage profond, emportant les éléments nutritifs vers les couches inférieures du sol, inaccessibles aux racines. En stoppant l'irrigation dès que le sol atteint un seuil de saturation optimal, le système Intel-IrriS contribue à préserver la fertilité des sols, tout en limitant les infiltrations inutiles, ce qui est essentiel pour une gestion écoresponsable de la ressource en eau.

#### **Adaptation au changement climatique**

Les événements climatiques extrêmes, comme les périodes de sécheresse ou de fortes chaleurs, exigent une irrigation plus fine et plus réactive. Le système piloté par capteurs permet une adaptation en temps réel aux conditions climatiques, rendant l'agriculture plus résiliente face aux perturbations climatiques. Il s'agit donc d'un outil stratégique d'adaptation au changement climatique.

#### **Sensibilisation à une irrigation intelligente**

La mise en place de ce système a également eu un impact pédagogique au sein de la ferme expérimentale universitaire. Elle a permis de sensibiliser les étudiants, les techniciens et les agriculteurs locaux à l'importance d'une gestion rationnelle de l'eau et à l'apport des technologies numériques dans l'optimisation des pratiques agricoles.

## **III.5 Difficultés rencontrées et solutions apportées**

Au cours de la mise en œuvre de l'expérimentation sur le pilotage de l'irrigation par aspersion à l'aide des capteurs, plusieurs difficultés ont été rencontrées, tant sur le plan technique que logistique. Néanmoins, des solutions ont été apportées pour assurer le bon déroulement de l'essai et garantir la fiabilité des résultats obtenus.

### **III.5.1 Problèmes techniques et environnementaux**

Au cours de cette expérimentation, plusieurs contraintes ont été relevées, notamment en lien avec l'utilisation des capteurs d'humidité Intel-IrriS. Bien que ces capteurs constituent un outil moderne et prometteur pour l'agriculture de précision, leur mise en œuvre sur le terrain a révélé certaines limites techniques, environnementales et logistiques qu'il a fallu surmonter.

### **Fragilité des capteurs et sensibilité à l'eau**

Les capteurs Intel-IrriS se sont révélés relativement sensibles à l'humidité ambiante et aux projections d'eau lors des phases d'irrigation. L'étanchéité des boîtiers n'est pas optimale, ce qui a parfois causé des dysfonctionnements ou des arrêts temporaires de lecture. En particulier, les connecteurs et les câbles de liaison peuvent être exposés à l'eau d'aspersion, entraînant des courts-circuits ou des erreurs de signal.

**Solution :** Des protections artisanales ont été mises en place, telles que des gaines plastiques étanches et des boîtes de dérivation surélevées, afin de limiter le contact direct avec l'eau. Il est également recommandé dans les prochaines versions des modèles waterproof.

### **Installation et calibration quotidiennes fastidieuses**

Une autre difficulté réside dans la nécessité de réinstaller les capteurs quasi quotidiennement. Étant donné que les capteurs Intel-IrriS utilisés dans cette expérimentation ne sont pas conçus pour un usage longue durée en pleine terre, il a fallu les retirer après chaque utilisation pour les protéger, puis les repositionner avant chaque nouvelle session d'irrigation. Cette opération manuelle prend du temps et exige une grande précision, car un mauvais contact entre le sol et le capteur fausse les mesures d'humidité.

**Solution :** Un protocole standardisé d'installation a été mis en place : pré-humidification du sol avant insertion, stabilisation à l'aide de sable fin autour de la sonde, et vérification de la lecture sur l'interface mobile avant toute décision d'irrigation. De plus, une fiche de suivi quotidienne a été tenue pour contrôler la cohérence des données.

### **Connexion limitée au réseau local uniquement**

Les capteurs Intel-IrriS sont conçus pour se connecter exclusivement via un réseau Wi-Fi local, sans possibilité de transmission à distance par réseau mobile (3G/4G). Cela a imposé la mise en place d'un point d'accès local sur le terrain (modem ou téléphone mobile en mode hotspot) à chaque session de mesure. Ce fonctionnement restreint limite la flexibilité d'utilisation, notamment dans des zones agricoles éloignées sans couverture réseau stable.

**Solution :** Un téléphone portable configuré en point d'accès Wi-Fi a été utilisé à proximité immédiate des capteurs pour garantir la communication. L'équipe devait rester à proximité durant toute la phase de lecture des données, ce qui a augmenté la charge humaine nécessaire au suivi.

## **III.5.2 Réglage des capteurs et validation du seuil de saturation**

Le bon fonctionnement des capteurs Intel-IrriS repose sur une phase essentielle de réglage initial et de validation des seuils d'humidité, qui conditionnent le déclenchement ou l'arrêt de l'irrigation. Cette étape permet d'adapter le système aux caractéristiques spécifiques du sol, du climat local, ainsi qu'aux besoins hydriques de la culture du blé tendre.

### **Calibration initiale des capteurs**

Avant leur déploiement sur le terrain, les capteurs ont été calibrés manuellement en laboratoire et en conditions réelles, en comparant leurs lectures avec celles d'un tensiomètre de référence. Cette opération visait à s'assurer de la précision des mesures et à détecter d'éventuels écarts entre les valeurs affichées et l'humidité réelle du sol.

Chaque capteur a été testé à différents teneurs en eau, allant de l'état sec à l'état de saturation. Les valeurs obtenues ont permis de construire une courbe de calibration pour chaque capteur, assurant ainsi la fiabilité des mesures sur le terrain.

### **Détermination du seuil de saturation**

Le seuil de saturation a été défini à partir des propriétés hydriques du sol prélevé sur la parcelle expérimentale. Des analyses physiques ont permis de déterminer la capacité au champ (CC) et le point de flétrissement permanent (PFP). Pour le sol étudié, la capacité au champ se situait autour de 30 % d'humidité volumique, tandis que la saturation était atteinte au-delà de 35 %.

Ainsi, un seuil d'arrêt de l'irrigation a été fixé à 34 %, ce qui correspond à une humidité proche de la saturation, mais avant l'apparition du drainage gravitaire excessif. Cette valeur a été intégrée dans l'interface mobile de pilotage des capteurs, qui notifiait l'utilisateur dès que cette limite était atteinte.

### **Validation sur le terrain**

Une fois installés dans la première parcelle expérimentale, les capteurs ont été testés durant plusieurs cycles d'irrigation. Chaque arrêt automatique ou manuel basé sur le seuil réglé a été vérifié en parallèle par des prélèvements de sol et des observations visuelles (aspect du sol, humidité ressentie à la main, etc.).

Les résultats ont confirmé que le seuil choisi permettait d'atteindre un niveau d'humidité optimal, tout en évitant le gaspillage d'eau. Aucune stagnation ni saturation excessive n'a été observée après arrêt de l'irrigation, ce qui a validé l'efficacité du paramétrage.

## **III.6 Conclusion**

L'analyse des résultats expérimentaux démontre de façon claire les avantages multiples de l'irrigation pilotée par capteurs Intel-IrriS : économie d'eau, adaptation intelligente, meilleure efficacité d'irrigation et réduction de l'impact environnemental. Ces résultats confirment que l'intégration de capteurs dans la gestion de l'eau agricole constitue un levier technologique essentiel pour l'agriculture moderne, particulièrement dans les zones soumises au stress hydrique.

# Conclusion générale

L'objectif de ce mémoire était d'évaluer l'intérêt d'un système d'irrigation intelligent basé sur des capteurs d'humidité du sol, dans le cadre d'une culture de blé tendre conduite en climat semi-aride. L'expérimentation menée a permis de comparer deux méthodes : une irrigation traditionnelle appliquée de manière fixe, et une irrigation pilotée par capteurs à l'aide du système Intel-IrriS.

Les résultats obtenus montrent une amélioration notable de la gestion de l'eau dans la parcelle équipée de capteurs. L'irrigation y a été déclenchée uniquement lorsque le sol atteignait un seuil de sécheresse défini, ce qui a permis de réduire le volume d'eau utilisé sans compromettre le développement de la culture. Le suivi en temps réel de l'humidité du sol a également facilité l'ajustement des fréquences d'arrosage, améliorant ainsi l'efficacité du système.

Ce type de dispositif présente donc un potentiel intéressant pour optimiser les pratiques agricoles dans les régions où l'eau est rare ou coûteuse à mobiliser. Toutefois, la mise en œuvre de ces technologies suppose certains prérequis : un investissement initial, un minimum de formation pour les utilisateurs, et une maintenance adaptée.

Si ces contraintes sont prises en compte, notamment à travers des politiques d'accompagnement technique et financier, l'intégration de capteurs dans les systèmes d'irrigation pourrait contribuer à une gestion plus durable des ressources en eau. Elle permettrait également d'augmenter la résilience des systèmes agricoles face aux aléas climatiques, tout en maintenant une productivité acceptable.

En conclusion, le recours à l'irrigation pilotée par capteurs comme Intel-IrriS peut constituer une avancée technique significative dans le cadre de l'agriculture de précision. Cette approche représente une réponse concrète à la double exigence d'économie d'eau et de performance agronomique, et mérite d'être davantage diffusée et soutenue dans les zones à potentiel agricole.

# Références bibliographique

- [1] Université Mohamed Boudiaf - M'Sila. Université Mohamed Boudiaf - M'Sila, Algérie, 2024.
- [2] Ahmed Skhiri. *L'IRRIGATION DE SURFACE : Conception, fonctionnement et évaluation de performance*. ResearchGate, April 2019.
- [3] C Brouwer, K Prins, M Kay, and M Heibloem. Méthodes d'irrigation. *FAO, Italy*, 1990.
- [4] Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture. Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture, 2024.
- [5] M. T. Halilat. Irrigation en algérie. *Laboratory of Saharan Bioresources : Safeguarding and Valorization, Department of Agronomic Sciences, Ouargla University*.
- [6] Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation Agreste. *La statistique agricole : définitions et méthodes*. Ministère de l'Agriculture, 2020. <https://agreste.agriculture.gouv.fr/>.
- [7] NM White and JD Turner. Thick-film sensors : past, present and future. *Measurement Science and Technology*, 8(1) :1, 1997.
- [8] W. Qu and J. U. Meyer. A novel thick film ceramic humidity sensitive characteristics of  $\alpha$ - $Fe_2O_3$  ceramic sensor. *Journal of the American Ceramic Society*, 75 :546–551, 1992.
- [9] Julien Roux. *Conception d'un capteur distribué pour la surveillance de l'état hydrique des sols*. PhD thesis, INSA de Toulouse, 2017.
- [10] Souhil Kouda. *Conception Dâun Capteur DâHumidité Intelligent*. PhD thesis, Université de Batna 2, 2008.
- [11] Celine Laville and Claude Pellet. Comparison of three humidity sensors for a pulmonary function diagnosis microsystem. *IEEE Sensors Journal*, 2(2) :96–101, 2002.
- [12] Pascal Thiébeau and Isabelle Bertrand. Mesure de l'humidité du sol en continu en sols caillouteux à l'aide de capteurs capacitifs. *Le Cahier des Techniques de l'INRA*, 87 :17, 2016.