



## MEMOIRE DE MASTER

*Pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur d'Etat en Hydraulique*

**Option : IRRIGATION ET DRAINAGE**

**THEME :**

**ANALYSE DE LA CORRÉLATION ENTRE LES DONNÉES  
IN SITU ET SATELLAITAIRES POUR L'ESTIMATION  
DE L'HUMIDITÉ DU SOL DANS LA PLAINE DE  
LA MITIDJA**

**Présenté par :**

**DJELLAI Mounia**

**Devant les membres du jury**

<b>Nom et Prénoms</b>	<b>Grade</b>	<b>Qualité</b>
Mr.KAHLERRAS Djillali	M.C.A	Président
Mr.KHEDIMALLAH Abderrahmane	M.C.B	Examineur
Mr.BOUZIANE Omar	M.A.A	Examineur
Mr.MEDDI Mohamed	Professeur	Promoteur

**Session Novembre 2024**

## REMERCIEMENTS

Je tiens à exprimer ma sincère gratitude à toutes les personnes qui ont contribué à l'élaboration de ce mémoire.

Tout d'abord, je remercie **Mr.MEDDI Mohamed**, pour son encadrement précieux, ses conseils avisés et son soutien tout au long de ce travail. Sa disponibilité et son expertise ont été des atouts majeurs dans la réalisation de ce projet.

Je remercie également **Mme.KABLI Sarah** pour leur aide et leurs ressources qui ont facilité cette recherche.

Je souhaite également remercier l'ensemble de mes professeurs, pour leurs enseignements enrichissants et leur encouragement constant. Vos conseils et vos remarques critiques ont grandement contribué à la qualité de mon travail.

Je n'oublie pas de remercier ma famille et mes amies, pour leur encouragement inconditionnel et leur compréhension pendant cette période exigeante.

A chacun d'entre vous, je suis profondément reconnaissant pour votre contribution à la réussite de ce mémoire.

*DJELLAI Mounia*

## ***DÉDICACE***

Je dédie ce mémoire

À ma mère, pour son amour inconditionnel et son soutien constant ; à mon père, pour sa sagesse et ses encouragements ; à ma sœur, pour sa complicité et sa joie de vivre ; et à mes frères, pour leur camaraderie et leur force. Vous avez tous joué un rôle essentiel dans mon parcours, et je vous remercie du fond du cœur pour tout ce que vous faites.

À mes amies **Roumaïssa, Houda, Samah, Lara** et **Zineb** qui ont toujours été là pour m'encourager et me soutenir. Merci pour votre patience, vos conseils précieux et votre confiance. Sans vous, ce projet n'aurait pas été possible. Votre amour et votre amitié illuminent mon chemin et me motivent à donner le meilleur de moi-même. Merci d'être des piliers dans ma vie. Les souvenirs que nous avons partagés resteront gravés dans mon cœur. Vous êtes des trésors dans ma vie, et je vous en suis profondément reconnaissant.

Avec toute mon affection,

*DJELLAI Mounia*

## ملخص :

تهدف هذه الامذكرة الى تحليل العلاقة بين البيانات الميدانية والبيانات الساتلية لتقدير رطوبة التربة في سهل المتيجة. تُعتبر رطوبة التربة عاملاً حاسماً في الزراعة، وإدارة الموارد المائية، وفهم النظم البيئية.

في هذه الدراسة، تم جمع قياسات ميدانية لرطوبة التربة ومقارنتها ببيانات ساتلية من مستشعرات مختلفة. كان الهدف الرئيسي هو تقييم موثوقية ودقة البيانات الساتلية لتقدير رطوبة التربة على مقاييس زمنية ومكانية مختلفة.

**الكلمات المفتاحية:** رطوبة التربة، قياسات ميدانية، البيانات الساتلية، مقاييس زمنية ومكانية

## Résumé :

Ce mémoire explore l'analyse de la corrélation entre les données in situ et satellitaires pour estimer l'humidité du sol dans la plaine de la Mitidja. L'humidité du sol est un paramètre crucial pour l'agriculture, la gestion des ressources en eau et la compréhension des écosystèmes.

Dans cette étude, des mesures in situ d'humidité du sol ont été collectées et confrontées à des données satellitaires provenant de divers capteurs. L'objectif principal était d'évaluer la fiabilité et la précision des données satellitaires pour estimer l'humidité du sol à différentes échelles temporelles et spatiales.

**Mots - clés :** L'humidité du sol, mesures in situ, données satellitaires, échelles temporelles et spatiales.

## Abstract:

This thesis explores the analysis of the correlation between in situ and satellite data to estimate soil moisture in the Mitidja plain. Soil moisture is a crucial parameter for agriculture, water resource management, and understanding ecosystems.

In this study, in situ measurements of soil moisture were collected and compared with satellite data from various sensors. The main objective was to assess the reliability and accuracy of satellite data for estimating soil moisture at different temporal and spatial scales.

**Keywords:** Soil moisture, in situ measurements, satellite data, temporal and spatial scales.

# Sommaire

<b>Introduction générale</b> .....	2
<b>Mise en contexte</b> .....	2
<b>Objectif de la recherche</b> .....	2
<b>Problématique de la recherche</b> .....	3
<b>Plan du document</b> .....	3
<b>Chapitre I : Recherche bibliographique</b> .....	5
<b>Introduction</b> .....	5
<b>I.1.État de l'Art</b> .....	5
<b>I.1.1.Dans le monde</b> .....	5
<b>I.1.2.En Algérie</b> .....	5
<b>I.2. Concepts Fondamentaux sur l'Humidité du Sol</b> .....	6
<b>I.2.1. Importance de l'Humidité du Sol</b> .....	6
<b>I.2.2. Concepts clés relatifs à l'humidité</b> .....	7
<b>I.3. Facteurs Influant sur l'Humidité du Sol</b> .....	8
<b>I.3.1. Conditions Climatiques</b> .....	8
<b>I.3.2. Type de Sol</b> .....	8
<b>I.3.3. Gestion de l'Eau</b> .....	8
<b>I.3.4. Végétation</b> .....	8
<b>I.3.5. Topographie</b> .....	8
<b>I.4.Techniques de mesure de l'humidité du sol</b> .....	8
<b>I.4.1.Méthode thermogravimétrique</b> .....	9
<b>I.4.2. Mesure par les sondes capacitives</b> .....	9
<b>I.4.3.Tensiomètres :</b> .....	10
<b>I.4.5.Mesure par des sondes radioactives</b> .....	12
<b>I.4.6.Méthodes de réflectance temporelle (TDR)</b> .....	13
<b>I.5. Importance des mesures de l'humidité du sol in situ</b> .....	14
<b>I.6.Mesure de l'humidité du sol par satellites</b> .....	14
<b>I.6.1.Principales Missions Satellitaires</b> .....	14
<b>I.6.2.Méthodes de Mesure</b> .....	15
<b>I.7. Applications pratiques de l'humidité du sol</b> .....	15
<b>Conclusion</b> .....	16
<b>Chapitre II : Méthodologie</b> .....	18
<b>Introduction</b> .....	18
<b>II.1. Description de la Zone d'Étude : Plaine de la Mitidja</b> .....	18

<b>II.2. Collecte des données</b> .....	19
<b>II.2.1.Données in situ</b> .....	19
<b>II.2.2.Données de satellite</b> .....	30
<b>II.2.2.1. Satellite SMAP</b> .....	30
<b>II.2.2.2.Satellite SIW-ASCAT</b> .....	30
<b>II.3.Prétraitement des données</b> .....	31
<b>II.4. Analyse des données</b> .....	32
<b>II.4.1. Analyse de corrélation</b> .....	32
<b>II.4.2.Analyse de régression linéaire</b> .....	33
<b>II.4.3. Erreur quadratique moyenne(EQM)</b> .....	33
<b>II.4.4.Erreur absolue moyenne(EAM)</b> .....	33
<b>Conclusion</b> .....	34
<b>Chapitre III : Résultats et discussion</b> .....	36
<b>Introduction</b> .....	36
<b>III.1.Résultats d'analyse des données</b> .....	36
<b>III.1.1.Résultats d'analyse de corrélation</b> .....	36
<b>III.1.2.Résultats d'analyse de la régression linéaire</b> .....	39
<b>III.1.3.Résultats d'erreur quadratique moyenne</b> .....	42
<b>III.1.4.Résultats d'erreur absolue moyenne</b> .....	43
<b>III.2. Résultats finale des analyses</b> .....	43
<b>III.3.Discussions</b> .....	44
<b>III.3.1.Implications des résultats</b> .....	44
<b>III.3.2.Comparaison avec les études antérieures</b> .....	44
<b>III.3.3.Limites de l'étude</b> .....	45
<b>III.3.4. Perspectives de recherche future</b> .....	45
<b>Conclusion</b> .....	46
<b>Conclusion générale</b> .....	48
<b>Références bibliographiques</b> .....	51

# Liste des tableaux

<b>Tableau II.01:</b> Les données collectées : 19/02/2024. ....	20
<b>Tableau II.02:</b> Les données collectées : 02/03/2024. ....	21
<b>Tableau II.03:</b> Les données collectées : 10/03/2024. ....	22
<b>Tableau III.04:</b> Les données collectées : 13/03/2024. ....	24
<b>Tableau II.05:</b> Les données collectées : 23/03/2024. ....	25
<b>Tableau II.06:</b> Les données collectées : 01/05/2024. ....	26
<b>Tableau II.07:</b> Les données collectées : 02/05/2024. ....	27
<b>Tableau II.08:</b> Les données collectées : 03/05/2024. ....	28
<b>Tableau II.09:</b> Les données collectées : 04/05/2024. ....	29
<b>Tableau II.10:</b> Les données de l'humidité du sol par le satellite SMAP. ....	30
<b>Tableau II.11:</b> Les données de l'humidité du sol par le satellite SIW-ASCAT. ....	31
<b>Tableau II.12:</b> Les données de l'humidité du sol pour la zone d'El Affroun. ....	31
<b>Tableau II.13:</b> Les données de l'humidité du sol pour la zone de Mouzaia. ....	32
<b>Tableau III.01:</b> Résultats d'analyse de la régression linéaire. ....	39
<b>Tableau III.02:</b> Résultats d'analyse de la régression linéaire. ....	40
<b>Tableau III.03:</b> Résultats de calcul d'erreur quadratique moyenne. ....	42
<b>Tableau III.04:</b> Résultats de calcul d'erreur absolue moyenne. ....	43

# Liste des figures

<b>Figure I.01:</b> Schéma d'un type de la méthode thermogravimétrique .	9
<b>Figure I.02 :</b> Schéma d'une capture capacitive	10
<b>Figure I.03:</b> Schéma d'un tensiomètre.	11
<b>Figure I.04:</b> Schéma de la sonde à neutrons .	13
<b>Figure II.01:</b> Localisation de la région d'étude dans la plaine de la Mitidja.	19
<b>Figure II.02:</b> Mesure de l'humidité du sol par l'appareil TDR 150.	20
<b>Figure III.01:</b> La relation entre les mesures in situ et satellitaire (SMAP) de l'humidité du sol.	36
<b>Figure III.02:</b> La relation entre les mesures in situ et satellitaire (SIW-ASCAT) de l'humidité du sol.	37
<b>Figure III.03:</b> La relation entre les mesures in situ et satellitaire (SMAP) de l'humidité du sol.	38
<b>Figure III.04:</b> La relation entre les mesures in situ et satellitaire (SIW-ASCAT) de l'humidité du sol.	38
<b>Figure III.05:</b> Régression linéaire entre les données in situ et satellitaire (SMAP).	39
<b>Figure III.06:</b> Résidus en fonction de l'humidité du sol.	39
<b>Figure III.07:</b> Régression linéaire entre les données in situ et satellitaire (SIW-ASCAT).	40
<b>Figure III.08:</b> Résidus en fonction de l'humidité du sol.	40
<b>Figure III.09:</b> Régression linéaire entre les données in situ et satellitaire(SMAP).	41
<b>Figure III.10:</b> Résidus en fonction de l'humidité du sol.	41
<b>Figure III.11:</b> Régression linéaire entre les données in situ et satellitaire (SIW-ASCAT).	41
<b>Figure III.12:</b> Résidus en fonction de l'humidité du sol.	42



*Introduction  
générale*

## Introduction générale

### Mise en contexte

L'eau et le sol est une relation essentielle pour le cycle hydrologique et la santé des écosystèmes. Le sol agit comme un réservoir, stockant l'eau de pluie et influençant son infiltration et son ruissellement (Dancette, 1975). Il joue également un rôle crucial dans la disponibilité de l'eau pour les plantes, en fonction de sa texture et de sa structure, qui déterminent la capacité de rétention d'eau (Ambroise, 1999). De plus, l'humidité du sol affecte les propriétés chimiques et biologiques, favorisant ainsi la biodiversité en soutenant divers organismes (Balesdent et al. 2015). Cette interaction dynamique entre l'eau et le sol est fondamentale pour maintenir l'équilibre écologique.

L'humidité du sol est un paramètre clé pour la gestion de l'eau, l'agriculture et les systèmes climatiques à l'échelle locale et globale. Elle joue un rôle fondamental dans le cycle hydrologique en influençant les processus d'évaporation, de transpiration des plantes, et l'infiltration de l'eau dans les aquifères. Sa mesure précise est cruciale pour optimiser les pratiques agricoles et garantir la durabilité des écosystèmes. Selon Goutorbe et al. (2005), "l'humidité du sol influence directement la productivité des cultures et la disponibilité de l'eau dans les systèmes terrestres".

En région méditerranéenne, comme la plaine de la Mitidja, située en Algérie, est une région agricole qui joue un rôle crucial dans la sécurité alimentaire du pays. Selon Bencherif et al. (2018), "la plaine de la Mitidja est l'un des principaux bassins agricoles d'Algérie, caractérisé par une diversité de cultures et une dépendance élevée aux ressources en eau."

La disponibilité de données précises et à jour sur l'humidité du sol est cruciale pour les gestionnaires des ressources hydriques. Traditionnellement, l'humidité du sol est mesurée à l'aide de capteurs in situ, qui fournissent des informations précises, mais souvent limitées spatialement. Meyer et al. (2019) affirment que « les méthodes traditionnelles de mesure de l'humidité du sol sont souvent coûteuses et laborieuses, rendant difficile une évaluation à grande échelle ».

Cependant, l'apparition des technologies satellites a permis d'accéder à des données plus étendues, à une échelle régionale, voire globale. Ces données satellites, obtenues par des capteurs comme ceux des missions SMOS (Soil Moisture and Ocean Salinity) ou SMAP (Soil Moisture Active Passive), offrent des estimations de l'humidité du sol avec une couverture spatiale et temporelle continue. Permettant d'observer des variations qui seraient difficiles à capturer uniquement par des méthodes in situ. Comme le souligne McCabe et al. (2016), "les satellites fournissent des informations critiques qui, lorsqu'elles sont combinées avec des données in situ, peuvent améliorer considérablement les estimations d'humidité du sol".

### Objectif de la recherche

L'objectif de cette étude est d'analyser la corrélation entre les données satellites et in situ pour l'estimation de l'humidité du sol dans la plaine de la Mitidja. En comparant les deux types de données, cette recherche vise non-seulement à évaluer la précision des estimations d'humidité du sol dans cette région, mais aussi à contribuer à une gestion durable des ressources en eau.

## **Problématique de la recherche**

Dans un contexte de changement climatique et de pression sur les ressources en eau, l'estimation précise de l'humidité du sol est essentielle pour une gestion durable de l'agriculture et des écosystèmes. La plaine de la Mitidja, en tant que zone agricole stratégique, nécessite des méthodes fiables pour surveiller l'humidité du sol. Cependant, la comparaison entre les données in situ et les données satellitaires soulève des questions sur la précision, la fiabilité et la pertinence des méthodes d'estimation.

- Dans quelle mesure les données satellitaires peuvent-elles compléter ou remplacer les mesures in situ pour estimer l'humidité du sol dans la plaine de la Mitidja ?
- Quelle est la précision des données in situ par rapport aux données satellitaires pour l'estimation de l'humidité du sol dans la plaine de la Mitidja ?
- Les données satellitaires peuvent-elles fournir des estimations d'humidité du sol fiables pour des zones inaccessibles ou difficiles d'accès par des méthodes in situ ?
- Quels facteurs influencent cette corrélation et comment peut-on optimiser l'utilisation des données satellitaires dans le contexte local ?

## **Plan du document**

Cette mémoire de recherche contient 3 chapitres. La mise en contexte, l'objectif de la recherche et la problématique ont été présentés dans le présent chapitre. La recherche bibliographique est présente au chapitre 1. Le chapitre 2 présente la zone d'étude ainsi que les données utilisées dans le cadre de ce projet. L'analyse des données et les résultats sont présentés au chapitre 3. La conclusion générale tirée du processus de recherche et des résultats.

***Chapitre I  
Recherche  
bibliographique***

---

## Chapitre I : Recherche bibliographique

### Introduction

L'étude de l'humidité du sol revêt une importance capitale dans de nombreux domaines, allant de l'agriculture à la gestion des ressources en eau, en passant par la modélisation climatique. Afin de mieux appréhender cette variable complexe, il est essentiel de s'appuyer sur une revue approfondie des travaux existants et des techniques disponibles. Ce chapitre se propose de faire le point sur l'état de l'art dans le domaine, en passant en revue les concepts fondamentaux liés à l'humidité du sol, ainsi que les méthodes de mesure in situ et par satellite.

### I.1.État de l'Art

#### I.1.1.Dans le monde

Wagner et al. (1999) ont mis au point un algorithme utilisant des données de scatteromètre pour estimer l'humidité du sol, intégrant les effets de la végétation, ce qui a permis d'améliorer la précision des modèles de cycle de l'eau. Drusch et al. (2001) ont proposé des corrections végétales et atmosphériques pour optimiser la récupération de l'humidité du sol à partir de données passives micro-ondes, avec des résultats prometteurs dans les tests sur le terrain. Plus récemment, Smith et al. (2023) ont développé une méthode combinant les données satellitaires et de capteurs terrestres avec des algorithmes d'intelligence artificielle pour améliorer la précision des estimations dans les régions arides. Maman Bachar Ibrahim Oumarou et al. (2024) ont quant à eux analysé les variations d'humidité du sol en utilisant des méthodes géophysiques, mettant en évidence des différences importantes entre les saisons sèches et humides. D'autres études ont également contribué à ce domaine : Haider (2004) a étudié l'estimation de l'humidité du sol à partir de données ERS-2SAR, tandis que Maria José Escorihuela (2006) a préparé la mission SMOS pour cartographier l'humidité du sol à l'échelle mondiale via des mesures radiométriques. Garcia-Sanchez et al. (2011) ont exploré l'utilisation de capteurs capacitifs pour mesurer l'humidité dans des sols caillouteux, obtenant de bons résultats d'étalonnage sur quatre ans. Zhao et al. (2019) ont couplé des modèles hydrologiques avec des données de télédétection pour fournir des estimations en temps réel, améliorant ainsi la précision dans plusieurs bassins fluviaux. En 2020, Martínez et al. ont expérimenté une approche innovante basée sur l'interférométrie radar (InSAR) pour estimer l'humidité sur de grandes surfaces, en se concentrant particulièrement sur les zones agricoles. Gupta et al. (2021) ont étudié les ruptures des modèles traditionnels causées par le changement climatique et ajusté les prévisions pour mieux prendre en compte les conditions extrêmes. Enfin, Li et al. (2022) ont appliqué des techniques de machine learning pour prédire l'humidité à l'échelle régionale, obtenant une nette amélioration des prévisions par rapport aux modèles classiques.

#### I.1.2.En Algérie

Zerouati (2014) a étudié l'estimation de l'humidité du sol dans un périmètre irrigué à partir d'images satellites, tandis que Toumi et al. (2018) ont testé une technique d'estimation par imagerie radar, comparant les résultats obtenus avec ceux des méthodes traditionnelles. En 2019, Rahmani et al. ont combiné des données satellitaires et des capteurs au sol pour suivre l'humidité dans les sols sahéliens, mettant en évidence des tendances de réduction liées à la désertification et suggérant des actions de reforestation. Bouarfa et al. (2020) ont développé un modèle hydrologique pour évaluer l'humidité dans les plaines agricoles, ce qui a permis

d'optimiser les besoins en irrigation. Zeddour et al. (2021) ont appliqué des techniques de télédétection avec les satellites Sentinel-2 pour estimer l'humidité du sol dans les régions arides, validant leurs résultats par des mesures in situ. Khelifa et al. (2022) ont étudié l'impact du changement climatique sur l'humidité des sols dans les zones sahariennes, modélisant la diminution des réserves d'eau et proposant des solutions de gestion durable. Benali et al. (2023) ont utilisé des capteurs d'humidité en temps réel dans la région de la Mitidja pour optimiser l'irrigation, réduisant ainsi la consommation d'eau tout en améliorant les rendements agricoles. Enfin, Amokrane et al. (2023) ont analysé la sensibilité des données TerraSAR-X à l'humidité des sols de la plaine du Bas-Chélif en Algérie.

## **I.2. Concepts Fondamentaux sur l'Humidité du Sol**

### **I.2.1. Importance de l'Humidité du Sol**

L'humidité du sol est un concept fondamental en agronomie et en écologie, se référant à la quantité d'eau présente dans le sol, qui joue un rôle crucial dans le développement des plantes et la santé des écosystèmes (Musy & Soutter, 1990). Elle est déterminée par plusieurs facteurs, notamment les prélèvements, l'évapotranspiration, la texture du sol et sa capacité de rétention d'eau (Calvet, 2005). Un sol humide favorise la germination des graines, car l'eau est nécessaire pour activer les enzymes qui déclenchent le processus de croissance (Kirkham, 2014). De plus, l'humidité du sol influence la disponibilité des nutriments, car de nombreux éléments essentiels à la vie végétale sont dissous dans l'eau et absorbés par les racines (Marshall, Holmes & Rose, 2012).

Elle est également influencée de nombreux aspects de l'agriculture et des écosystèmes naturels. En effet, la quantité d'eau présente dans le sol joue un rôle crucial dans la croissance des plantes, car elle est essentielle pour la photosynthèse, la transpiration et l'absorption des nutriments. Un sol bien hydraté permet aux racines d'accéder facilement à l'eau et aux éléments nutritifs nécessaires à leur développement. De plus, l'humidité du sol contribue à la régulation de la température locale, créant un microclimat favorable à la biodiversité (Tilhac, 2023).

La gestion de l'humidité du sol est également vitale pour maintenir la santé des écosystèmes. Les micro-organismes du sol, qui dépendent d'un certain niveau d'humidité pour survivre, jouent un rôle essentiel dans la décomposition de la matière organique et le recyclage des nutriments. Ces processus sont cruciaux pour maintenir la fertilité du sol et soutenir une agriculture durable (GLOBE-SWISS, 2022). En outre, une humidité adéquate favorise la formation d'agrégats du sol, ce qui améliore sa structure et sa capacité à retenir l'eau.

Dans le contexte actuel de changement climatique, l'importance de l'humidité du sol devient encore plus évidente. Les événements climatiques extrêmes, tels que les sécheresses prolongées ou les inondations soudaines, peuvent affecter gravement la disponibilité de l'eau dans le sol. Par conséquent, il est impératif d'adopter des pratiques agricoles durables qui mettent en avant une gestion efficace de l'humidité (Gerbeaud, 2023).

Donc, l'humidité du sol est un facteur clé non seulement pour la croissance des plantes mais aussi pour la santé globale des écosystèmes terrestres et la sécurité alimentaire mondiale. Une gestion proactive et durable de cette ressource précieuse est essentielle pour faire face aux défis environnementaux actuels et futurs.

### I.2.2. Concepts clés relatifs à l'humidité

**Capacité de rétention d'eau :** La quantité maximale d'eau que le sol peut retenir après saturation. Elle dépend de la texture et de la structure du sol ce qui influence directement la disponibilité de l'eau pour les plantes.

**Teneur en eau du sol :** Mesure de la quantité d'eau présente dans le sol, généralement exprimée en pourcentage ou en volume, Cette mesure est cruciale pour évaluer la disponibilité en eau pour les plantes, influençant ainsi la croissance et la santé des cultures.

**Pores du Sol :** sont des espaces entre les particules de sol qui contiennent de l'eau et de l'air. La taille et la distribution de ces pores influencent à la fois le drainage et la rétention d'eau dans le sol, ce qui est essentiel pour la disponibilité en eau pour les plantes. Lorsque les pores sont saturés d'eau, le sol est considéré comme saturé, tandis que des pores remplis d'air indiquent un sol sec.

**Infiltration :** Processus par lequel l'eau pénètre dans le sol. Affecte la recharge des aquifères et la disponibilité en eau pour les cultures (M.Hssaisoune, 2019).

**Évapotranspiration :** définit comme la combinaison de l'évaporation de l'eau, du sol et de la transpiration des plantes. C'est un indicateur de la perte d'eau dans un écosystème, il est essentiel pour la gestion de l'irrigation (Steeve Pepin, 2012).

**Conductivité hydraulique :** Mesure de la capacité du sol à conduire l'eau, influencée par la texture, la structure et la saturation (Bear, 1987). Indique la rapidité avec laquelle l'eau peut s'infiltrer dans le sol.

**Humidité Relative du Sol :** Rapport entre la quantité d'eau présente dans le sol et la capacité de rétention d'eau maximale du sol, souvent exprimé en pourcentage (Bouréma, 2017). Permet d'évaluer la disponibilité de l'eau pour les plantes à un moment donné.

**Cycle de l'eau :** Circulation continue de l'eau entre l'atmosphère, la surface terrestre et les corps d'eau. L'humidité du sol joue un rôle clé dans ce cycle, influençant la disponibilité de l'eau dans les écosystèmes.

**Variabilité spatio-temporelle :** Les fluctuations de l'humidité du sol en fonction de l'emplacement géographique et des conditions climatiques au fil du temps (Bouréma, 2017). Comprendre cette variabilité est cruciale pour la planification de l'agriculture et la gestion des ressources en eau.

**Saturation :** Un sol est saturé lorsque tous ses pores sont remplis d'eau. Cela se produit généralement après de fortes pluies ou une irrigation.

**Capacité au Champ (CC) :** C'est le niveau d'humidité du sol après que l'excès d'eau a été drainé. À ce stade, le sol contient encore de l'eau dans ses microporosités, ce qui est optimal pour la croissance des plantes.

**Point de Flétrissement Permanent (PFP) :** C'est le niveau d'humidité en dessous duquel les plantes ne peuvent plus extraire d'eau, entraînant leur flétrissement (Bastien Combemale, 2016).

### I.3. Facteurs Influant sur l'Humidité du Sol

#### I.3.1. Conditions Climatiques

**Précipitations :** La quantité et la fréquence des pluies déterminent directement le niveau d'humidité du sol. Des pluies abondantes augmentent l'humidité, tandis que des périodes de sécheresse peuvent la réduire considérablement.

**Température :** Les températures élevées favorisent l'évaporation de l'eau du sol, ce qui peut diminuer son humidité. À l'inverse, des températures plus basses peuvent ralentir ce processus.

#### I.3.2. Type de Sol

**Texture et Structure :** Les sols argileux retiennent plus d'eau que les sols sableux en raison de leur capacité à former des agrégats qui piègent l'eau. La porosité et la compaction du sol influencent également sa capacité à retenir l'eau.

**Composition :** La présence de matières organiques et de minéraux affecte la capacité de rétention d'eau. Les sols riches en matière organique sont généralement plus humides.

#### I.3.3. Gestion de l'Eau

**Irrigation :** Les pratiques d'irrigation peuvent augmenter l'humidité du sol, mais une irrigation excessive peut également entraîner un drainage insuffisant et des problèmes d'engorgement.

**Drainage :** Un bon système de drainage permet d'évacuer l'excès d'eau, ce qui est essentiel dans les zones où les précipitations sont fréquentes ou où le niveau de la nappe phréatique est élevé.

#### I.3.4. Végétation

**Couverture Végétale :** Les plantes jouent un rôle crucial dans la régulation de l'humidité du sol. Elles absorbent l'eau par leurs racines et réduisent l'évaporation grâce à leur ombre. De plus, les racines aident à maintenir la structure du sol, ce qui améliore sa capacité à retenir l'eau.

**Type de Végétation :** Certaines espèces végétales sont plus efficaces que d'autres pour conserver l'humidité du sol, en fonction de leurs besoins en eau et de leur système racinaire.

#### I.3.5. Topographie

**Pente et Orientation :** Les terrains inclinés drainent plus rapidement que les terrains plats, ce qui peut affecter la distribution de l'humidité dans le sol. De plus, les zones ombragées peuvent conserver plus d'humidité que celles exposées directement au soleil.

### I.4. Techniques de mesure de l'humidité du sol

Les techniques de mesure in situ permettent d'obtenir des données précises sur l'humidité du sol dans des conditions naturelles.

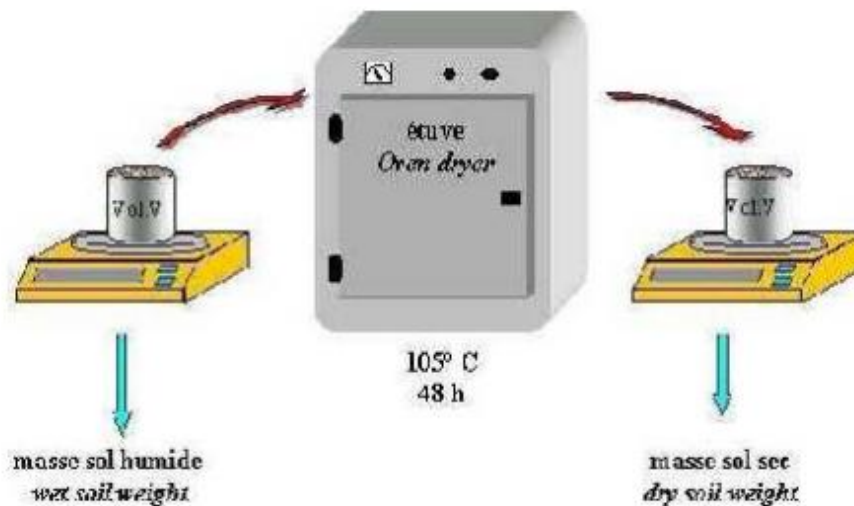


### I.4.1.Méthode thermogravimétrique

Les méthodes thermogravimétriques, notamment l'analyse thermogravimétrique (TGA), sont des techniques d'analyse thermique qui mesurent la variation de masse d'un échantillon en fonction de la température et du temps dans une atmosphère contrôlée. Elles permettent d'évaluer des paramètres comme l'humidité, les matières volatiles et les cendres.

L'échantillon est chauffé à une température définie, généralement entre 40 °C et 1000 °C. À mesure que la température augmente, les composants volatils s'évaporent, entraînant une perte de masse. Cette perte est enregistrée, permettant ainsi de quantifier l'humidité ou d'autres substances volatiles présentes dans l'échantillon (Mettler Toledo, 2023).

Les principales forces de ces méthodes incluent leur rapidité et leur capacité à traiter de grandes quantités d'échantillons. Cependant, elles ne permettent pas de distinguer l'eau des autres composants volatils, ce qui peut limiter leur précision dans certaines applications (Mettler Toledo, 2023).



**Figure I.01:** Schéma d'un type de la méthode thermogravimétrique (Adapté de ZEROUATI. F, ENSH, 2015).

### I.4.2. Mesure par les sondes capacitatives

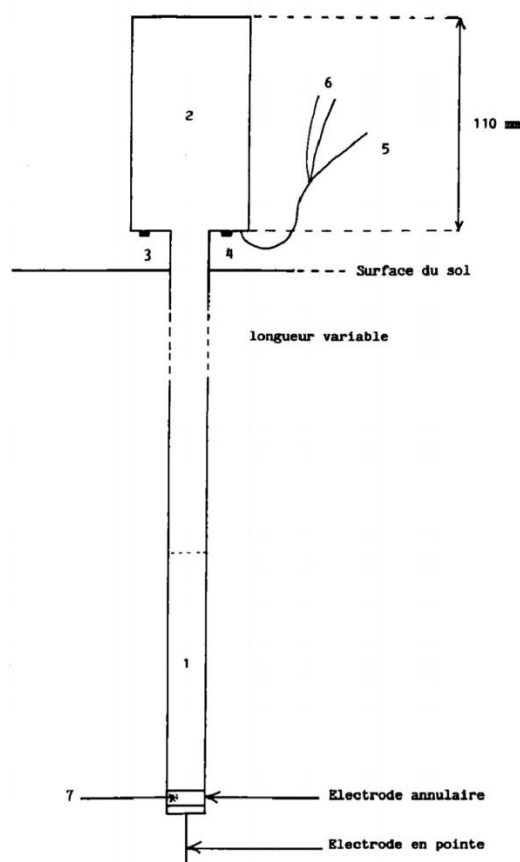
Les sondes capacitatives sont des instruments de mesure largement utilisés pour évaluer l'humidité du sol. Elles offrent une méthode efficace et précise pour surveiller l'eau disponible dans le sol, ce qui est crucial pour l'agriculture et la gestion des ressources en eau.

Les sondes capacitatives mesurent la permittivité diélectrique du sol, qui varie en fonction de la teneur en eau. Lorsque la sonde est insérée dans le sol, elle génère un champ électrique entre ses électrodes. La présence d'eau dans le sol modifie la permittivité diélectrique, permettant ainsi d'estimer l'humidité volumique du sol. : Les sondes capacitatives aident les agriculteurs à optimiser l'irrigation en fournissant des informations précises sur les besoins en eau des cultures. Cela permet d'éviter le stress hydrique et d'améliorer les rendements. Elles sont utilisées pour surveiller les niveaux d'humidité dans les sols afin de planifier efficacement l'utilisation de l'eau et prévenir les inondations ou le lessivage. Les chercheurs utilisent ces sondes pour étudier les interactions entre les sols et l'eau, notamment dans le cadre de projets liés à la durabilité environnementale.

Les sondes capacitatives fournissent des données en temps réel sur l'humidité du sol, permettant une gestion proactive de l'irrigation. Contrairement à certaines méthodes gravimétriques, ces sondes n'endommagent pas le sol lors de la mesure. Elles peuvent être utilisées à différentes profondeurs, ce qui est essentiel pour les systèmes racinaires variés des plantes cultivées. Les sondes capacitatives peuvent être calibrées pour différents types de sols et structures, ce qui améliore la précision des mesures.

Bien que très efficaces, les sondes capacitatives présentent certaines limitations :

- Les mesures peuvent varier en fonction de la texture et de la structure du sol, nécessitant une calibration spécifique pour chaque type de sol.
- La température peut affecter les lectures, tout comme la salinité du sol, ce qui doit être pris en compte lors des interprétations.



**Figure I.02 :** Schéma d'une capture capacitative (Adapté de Gaudu et al, HAL, 2020).

1) Oscillateur ;2) Convertisseur alimentation, convertisseur courant, programme ;3) Roue codeuse 16 position ;4) Roue codeuse 3 position ;5) Sortie courant 4-20 mA ;6) Alimentation 10-30 V ;7) Capture de température.

### I.4.3. Tensiomètres :

Les tensiomètres sont des instruments essentiels utilisés pour mesurer l'humidité du sol, en particulier dans le domaine de l'agriculture. Ils permettent d'évaluer la tension de l'eau dans le

sol, ce qui est crucial pour déterminer la disponibilité de l'eau pour les racines des plantes. Cette méthode est particulièrement utile dans les sols non saturés.

Un tensiomètre est composé de trois éléments principaux :

Cylindre Creux : Rempli d'eau, il est inséré dans le sol.

Capsule Poreuse : Située à l'extrémité du cylindre, elle permet à l'eau de s'échanger avec le sol.

Jauge à Vide : Mesure la pression à l'intérieur du cylindre, indiquant ainsi la tension que les racines doivent surmonter pour extraire l'eau.

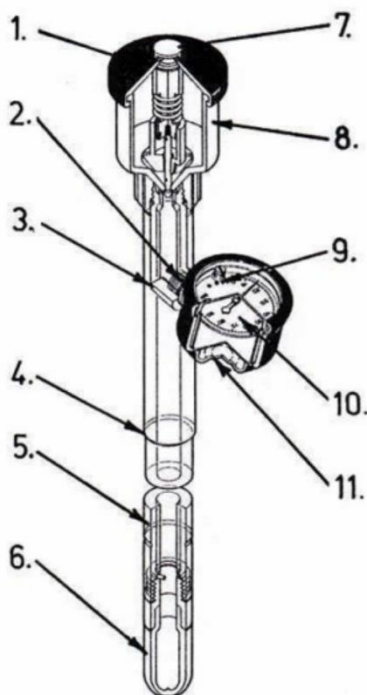
Lorsque le sol est humide, l'eau peut facilement s'échapper de la capsule poreuse, maintenant une pression faible. À mesure que le sol se dessèche, la tension augmente, ce qui est mesuré par la jauge. Les tensiomètres sont couramment utilisés pour gérer l'irrigation dans les cultures telles que les fruits rouges, les légumes et les arbres fruitiers. Ils aident à déterminer quand irriguer en fonction des besoins réels des plantes. Utilisés dans les serres et les pépinières pour optimiser les conditions de croissance. Employés pour étudier les interactions sol-eau et améliorer les pratiques agricoles durables.

Les tensiomètres fournissent des mesures très précises même à des niveaux d'humidité bas. Les résultats sont faciles à interpréter grâce à un code couleur ou un affichage numérique. Ils peuvent être utilisés pour tous types de sols et sont efficaces dans diverses conditions climatiques. En permettant une irrigation ciblée, ils contribuent à réduire le gaspillage d'eau.

Pour une utilisation efficace, il est essentiel d'installer les tensiomètres correctement :

-Installer à des endroits qui reflètent bien les conditions générales du champ ou du jardin.

-Pour la plupart des cultures, il est recommandé d'installer un tensiomètre à environ 30 cm et un autre à 60 cm de profondeur pour surveiller différentes couches du sol.



**Figure I.03:** Schéma d'un tensiomètre (<http://hydropedologie.agrobiologie.cz/en-tenzometr.html>).

- 1) Couvercle de réservoir ;2) Joints toriques ;3) Port moulé en angle sur la paroi latérale ;4) Tube ;5) Tube en plastique à parois épaisses ;6) Entrée d'air élevée à haut débit de 1 bar, coupelle en céramique ;7) Bouton poussoir pour action de remplissage par jet ;8)

Réservoir d'eau ;9) Ajusteur de point zéro ; 10) Manomètre à vide (0 à 100 KPa) ;11)  
Une gaine extérieure flexible à réglage de température.

#### **I.4.5. Mesure par des sondes radioactives**

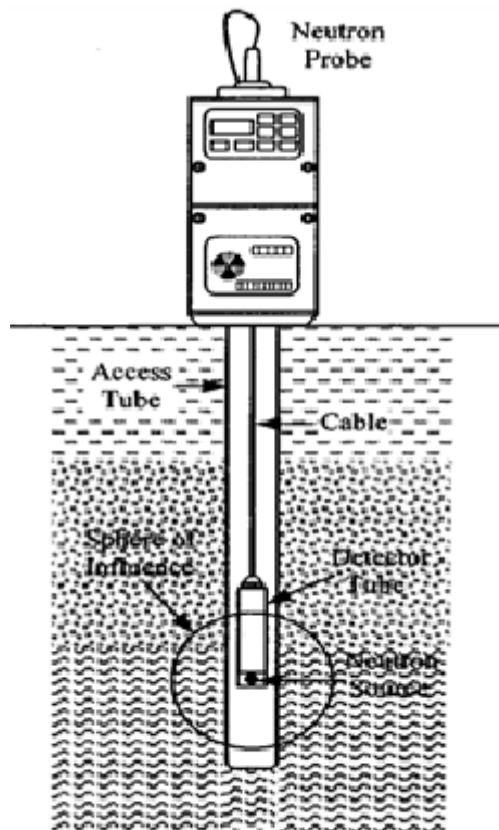
Les sondes radioactives, souvent appelées sondes à neutrons, sont des instruments utilisés pour mesurer l'humidité du sol. Elles fonctionnent sur le principe de la détection de neutrons, ce qui permet d'évaluer la teneur en eau dans le sol de manière précise.

Les sondes à neutrons émettent des neutrons dans le sol à partir d'une source radioactive. Lorsque ces neutrons interagissent avec les noyaux d'hydrogène présents dans l'eau, ils sont ralentis et retournent vers le détecteur. La quantité de neutrons retournés est proportionnelle à la quantité d'eau dans le sol, permettant ainsi de calculer l'humidité volumique. Utilisées pour optimiser l'irrigation en fournissant des informations précises sur la disponibilité de l'eau pour les cultures. Aident à étudier les interactions entre l'eau et le sol dans divers écosystèmes. Utilisées pour surveiller les niveaux d'humidité dans les sols afin de planifier efficacement l'utilisation de l'eau.

Les sondes à neutrons fournissent des mesures très précises de l'humidité du sol, même à des profondeurs significatives. Elles permettent d'obtenir des données sans endommager le sol, ce qui est crucial pour les études environnementales et agricoles. Ces sondes peuvent être utilisées pour mesurer l'humidité à différentes profondeurs, fournissant ainsi un profil hydrique du sol.

Les sondes radioactives présentent certaines limitations :

- L'utilisation de sondes à neutrons est soumise à une réglementation stricte en raison de leur caractère radioactif. Cela peut limiter leur accessibilité et nécessiter une formation spécialisée pour les opérateurs.
- Ces dispositifs sont généralement coûteux, ce qui peut être un obstacle pour certaines applications.
- Les sondes doivent être calibrées pour chaque type de sol afin d'assurer la précision des mesures.



**Figure I.04:** Schéma de la sonde à neutrons (Adapté de Jayantha et al., ResearchGate, 2014).

#### I.4.6. Méthodes de réflectance temporelle (TDR)

La méthode de réflectométrie dans le domaine temporel (TDR) est une technique avancée utilisée pour mesurer l'humidité volumique du sol. Cette méthode repose sur des principes électromagnétiques et est largement utilisée dans l'agriculture, la gestion des ressources en eau et la recherche environnementale.

La technologie TDR utilise des impulsions d'ondes électromagnétiques envoyées à travers le sol par des sondes. Le temps nécessaire pour que ces impulsions se propagent et reviennent au capteur est mesuré. La vitesse de propagation des impulsions est influencée par la teneur en eau du sol, car l'eau a une permittivité diélectrique différente des autres composants du sol (comme les minéraux et l'air).

La relation entre le temps de retour des impulsions et la teneur en eau permet de calculer l'humidité volumique du sol avec une grande précision. Les sondes TDR sont largement utilisées pour optimiser l'irrigation en fournissant des données précises sur la disponibilité d'eau pour les cultures. Elles aident à surveiller les niveaux d'humidité dans le sol, permettant une gestion efficace et durable des ressources hydriques. Utilisées pour étudier les interactions entre l'eau et le sol dans divers écosystèmes, contribuant à la compréhension des cycles hydrologiques (Topp et al. 1980).

Les sondes TDR offrent une précision exceptionnelle, souvent avec une résolution allant jusqu'à 3 picosecondes, ce qui permet des mesures très fiables. Contrairement à certaines méthodes traditionnelles, les sondes TDR ne nécessitent pas de prélèvements destructifs du sol. Les mesures peuvent être effectuées en quelques secondes, ce qui est idéal pour les études nécessitant des données en temps réel. Les sondes peuvent être utilisées dans divers types de sols et matériaux, y compris les sols agricoles, les substrats de construction et même les matériaux minéraux.

## **I.5. Importance des mesures de l'humidité du sol in situ**

La mesure de l'humidité du sol in situ est cruciale pour plusieurs raisons, notamment en agronomie, en hydrologie et dans la gestion des ressources naturelles.

La mesure de l'humidité du sol est essentielle pour le suivi de la croissance des cultures. Elle permet d'optimiser l'irrigation et d'assurer que les plantes reçoivent la quantité d'eau nécessaire à leur développement (Dupont, 2020). En agriculture de précision, ces mesures aident à ajuster les pratiques culturales en fonction des besoins spécifiques des cultures, ce qui peut améliorer le rendement et réduire les gaspillages d'eau (Martin & Lefebvre, 2019).

Les données sur l'humidité du sol sont indispensables pour les modèles hydrologiques. Ces modèles simulent la dynamique de l'eau dans le sol, facilitant ainsi la prévision des crues et la gestion des ressources en eau (Bernard, 2021). La connaissance précise de l'humidité du sol aide également à évaluer les impacts des changements climatiques sur les cycles hydrologiques (Giraud et Moreau, 2018).

Mesurer l'humidité in situ permet d'évaluer la qualité du sol, y compris sa capacité à retenir l'eau et à soutenir la vie végétale (Lemoine, 2022). Cela est particulièrement pertinent dans les sols caillouteux ou dégradés, où les méthodes traditionnelles peuvent ne pas être efficaces. Les capteurs modernes permettent une surveillance continue et précise, ce qui est crucial pour la gestion durable des terres (Roux et Simon, 2023).

L'humidité du sol influence également le cycle des nutriments, affectant ainsi la disponibilité des éléments nutritifs pour les plantes (Boucher, 2020). Des mesures précises permettent d'ajuster les apports en fertilisants, contribuant à une agriculture plus durable en minimisant les pertes par lessivage et en améliorant l'efficacité des intrants (Fournier & Petit, 2021).

## **I.6. Mesure de l'humidité du sol par satellites**

La mesure de l'humidité du sol par satellites est une méthode innovante et efficace qui permet de surveiller les conditions hydrologiques sur de vastes territoires. Grâce à la télédétection, il est possible d'obtenir des données précises et en temps réel, essentielles pour l'agriculture, la gestion des ressources en eau et la prévision des risques environnementaux.

### **I.6.1. Principales Missions Satellitaires**

#### **SMOS (Soil Moisture and Ocean Salinity)**

La mission SMOS de l'Agence spatiale européenne est conçue spécifiquement pour mesurer l'humidité du sol et la salinité des océans. Elle utilise des capteurs à micro-ondes passifs pour détecter les signaux émis par la surface terrestre. Les différences entre les signaux des sols secs

et humides permettent de calculer l'humidité du sol de surface (Agriculture et Agroalimentaire Canada, 2024).

### **SMAP (Soil Moisture Active Passive)**

Ce satellite de la NASA, lancé en 2015, combine des techniques actives et passives pour fournir des mesures précises de l'humidité du sol. SMAP recueille des données tous les deux à trois jours, ce qui est particulièrement utile pour surveiller les changements d'humidité (Agriculture et Agroalimentaire Canada, 2024).

### **ASCAT (Advanced Scatterometer)**

Embarqué sur les satellites MetOp, ASCAT utilise des radars pour mesurer l'humidité du sol en analysant la rétrodiffusion des ondes radar. Cette technique est sensible aux variations d'humidité, permettant ainsi d'obtenir des données quantitatives sur l'état du sol (EUMETSAT, 2023).

### **Sentinel-1**

La mission Sentinel-1, partie du programme Copernicus de l'ESA, a débuté en 2014. Sentinel-1 utilise des radars à synthèse d'ouverture (SAR) pour fournir des données sur l'humidité du sol avec une résolution spatiale élevée (10 m) et un temps de revisite rapide (six jours en Europe). Ces données sont particulièrement utiles pour cartographier l'humidité du sol dans les zones agricoles et surveiller les inondations.

## **I.6.2. Méthodes de Mesure**

### **Téledétection Radar**

Les capteurs radar, tels que ceux utilisés par ASCAT et SMAP, mesurent la rétrodiffusion des ondes électromagnétiques. La quantité d'énergie réfléchie dépend de l'humidité du sol, ce qui permet d'obtenir des estimations précises (GET, 2012).

### **Imagerie Optique**

Bien que moins efficace pour mesurer directement l'humidité, les capteurs optiques fournissent des informations complémentaires sur la couverture végétale et les conditions de surface. Ces données peuvent être intégrées avec celles provenant des radars pour une analyse plus complète (EOSDA, 2023).

## **I.7. Applications pratiques de l'humidité du sol**

La mesure de l'humidité du sol est essentielle dans divers domaines, notamment l'agriculture, la gestion des ressources en eau et la recherche environnementale.

L'humidité du sol joue un rôle crucial dans l'agriculture de précision. Les capteurs d'humidité permettent aux agriculteurs de gérer efficacement leurs systèmes d'irrigation, réduisant ainsi la consommation d'eau tout en améliorant les rendements des cultures. En connaissant les

conditions exactes d'humidité, les agriculteurs peuvent irriguer au moment opportun, ce qui est particulièrement important pendant les stades critiques de croissance des plantes.

Les capteurs d'humidité sont intégrés dans les systèmes d'irrigation pour optimiser l'utilisation de l'eau. Par exemple, dans les jardins et les pelouses, ces capteurs peuvent empêcher l'irrigation lorsque le sol est déjà humide, ce qui économise de l'eau et réduit les coûts. De même, sur les terrains de golf, ils aident à éviter le sur-arrosage et le lessivage des engrais.

Des technologies avancées comme l'analyse par satellite permettent de surveiller l'humidité du sol à grande échelle. Ces données aident à planifier les activités d'irrigation et à évaluer le potentiel de rendement des cultures. Les cartes d'humidité fournissent des informations précieuses sur les zones où la plantation est viable ou non (EOSDA, 2023).

L'humidité du sol est un facteur clé dans la prédiction des inondations. Un sol saturé ne peut pas absorber davantage d'eau, ce qui augmente le risque d'inondation lors de fortes pluies. En surveillant l'humidité du sol, il est possible de détecter rapidement des conditions d'assèchement ou de saturation, permettant ainsi une meilleure planification et réponse aux événements climatiques extrêmes.

Les capteurs d'humidité sont également utilisés dans la recherche pour étudier la dynamique du sol et son interaction avec le climat. Ils fournissent des données essentielles pour modéliser la décomposition de la matière organique et suivre les stocks d'eau dans le sol (Thiébeau & Bertrand, 2016). Ces informations sont cruciales pour comprendre les impacts environnementaux liés à l'agriculture et aux changements climatiques.

## **Conclusion**

L'humidité du sol constitue un indicateur essentiel pour la santé des plantes, la durabilité des pratiques agricoles et la protection des écosystèmes. Il est donc impératif que les agriculteurs surveillent ce paramètre de près afin d'optimiser leur production tout en préservant les ressources en eau. À ce titre, la mesure in situ de l'humidité du sol est primordiale pour une gestion efficace de l'eau et pour comprendre les interactions complexes entre le sol, l'eau et le climat.

Dans ce contexte, l'utilisation de satellites pour mesurer l'humidité du sol représente une avancée significative. Des missions telles que SMOS, SMAP et ASCAT fournissent des données précises sur l'état du sol à des échelles régionales et mondiales. Ces informations sont cruciales pour promouvoir une agriculture durable, gérer les ressources en eau de manière optimale et relever les défis liés au changement climatique.



*Chapitre II*  
*Méthodologie*

---

## Chapitre II : Méthodologie

### Introduction

Ce chapitre décrit la méthodologie adoptée pour l'analyse de l'humidité du sol dans la plaine de la Mitidja. La première section présente une description de la zone d'étude, permettant de mieux comprendre les caractéristiques géographiques et climatiques. La deuxième section est consacrée à la collecte des données, qui combine des mesures in situ avec des données satellitaire. Cette combinaison permet une approche comparative pour mieux comprendre les dynamiques d'humidité du sol. Enfin, les méthodes d'analyse utilisées sont exposées, incluant des analyses statistiques pour évaluer les relations entre les données in situ et satellite.

### II.1. Description de la Zone d'Étude : Plaine de la Mitidja

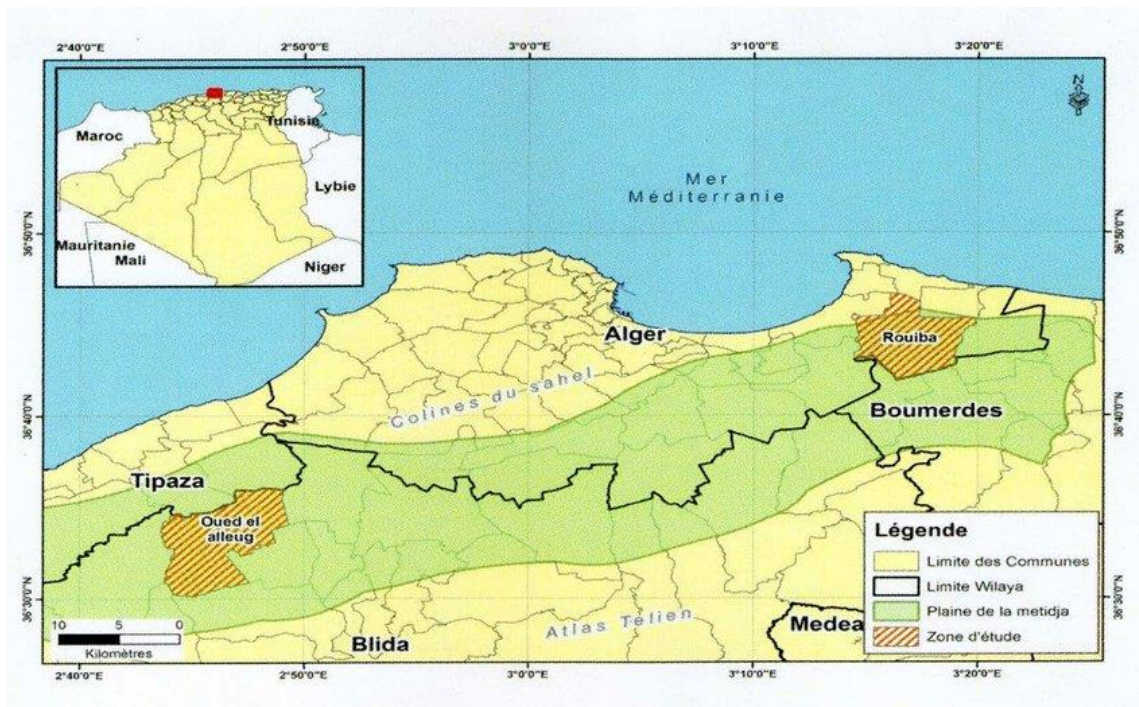
La plaine de la Mitidja est une région géographique située dans le nord de l'Algérie, principalement dans les wilayas d'Alger, Blida, Tipaza, Boumerdès et Médéa.

La plaine s'étend sur environ 100 km de longueur et entre 5 et 25 km de largeur, avec une superficie approximative de 1 400 km<sup>2</sup>.

Elle est bordée au nord par les collines du Sahel algérois et au sud par l'Atlas blidéen. La plaine est orientée est-nord-est vers ouest-sud-ouest, avec une altitude moyenne d'environ 50 m. Est traversée par plusieurs oueds, dont l'oued Boudouaou à l'est et l'oued Nador à l'ouest, qui jouent un rôle crucial dans le drainage des eaux.

La plaine bénéficie d'un climat méditerranéen, favorable à l'agriculture, notamment pour la culture des agrumes, des vignes et des céréales. La région présente une biodiversité riche, bien qu'elle ait été affectée par des incendies de forêt récents, impactant la faune et la flore locales. (ASAL, 2015).

La plaine est principalement dédiée à l'agriculture intensive. Les cultures principales incluent les agrumes, les vignes et divers arbres fruitiers. Des ressources en eau souterraine sont également exploitées pour soutenir ces activités.



**Figure II.01** : Localisation de la région d'étude dans la plaine de la Mitidja (Adapté d'Aroua et al, ResearchGate, 2019).

Pour cette étude, des mesures d'humidité du sol ont été réalisées dans deux localités distinctes :

- 1/ Mouzaia : N 36°28'27.2064''      E 2°41'24.2196''  
 2/El Affroun : N 36°28'58.44''      E 2°37'27.5592''

El Afroun et Mouzaia partagent des caractéristiques similaires en tant que communes agricoles de la plaine de la Mitidja. Leur développement économique repose sur l'agriculture, soutenue par un environnement naturel favorable.

## II.2. Collecte des données

### II.2.1. Données in situ

Dans le cadre de notre étude, nous avons effectué deux essais dans des champs situés respectivement dans les communes de Mouzaïa et d'El Affroun. Pour chaque essai, 5 à 7 points de mesure d'humidité du sol ont été réalisés. À chaque point, nous avons mesuré l'humidité à différentes profondeurs : 3.8 cm, 7.6 cm, 12 cm et 20 cm à l'aide d'un appareil TDR 150 (Time Domain Reflectometry). Les points de mesure étaient espacés de 10 mètres les uns des autres pour garantir une couverture représentative des champs étudiés. Ces mesures visent à évaluer la variabilité de l'humidité du sol.



**Figure II.02 :** Mesure de l'humidité du sol par l'appareil TDR 150 (Mouzaïa : Le 10/03/2024 à 12 :06).

**Tableau II.01:** Les données collectées : 19/02/2024.

Localisation	N° de point	Profondeur	1,5'' (3,8cm)	3''(7,6cm)	4,8''(12cm)	8''(20cm)
Mouzaïa	1	VWC (%)	46,2	37,2	39,5	33,1
		CE (SI)	0,62	0,57	0,57	0,67
		T (°C)	18,9	18,8	18,8	18,7
	2	VWC (%)	41,1	38,9	36,5	32,7
		CE (SI)	0,45	0,37	0,25	0,27
		T (°C)	18,5	18,4	18,4	18,2
	3	VWC (%)	45	38,7	40,8	35,2
		CE (SI)	0,49	0,43	0,35	0,35
		T (°C)	18,3	18,3	18,3	18,2
	4	VWC (%)	30,3	37,2	41,7	34,9
		CE (SI)	0,42	0,46	0,39	0,39
		T (°C)	18,1	18	18	17,7
	5	VWC (%)	31,4	36,2	38,5	36,7
		CE (SI)	30	0,28	0,25	0,2
		T (°C)	17,7	17,7	17,7	17,2
1	VWC (%)	44,2	36,9	38	32,2	
	CE (SI)	0,55	0,44	0,36	0,4	
	T (°C)	20,5	20,5	20,4	20,4	

El Affroun	2	VWC (%)	29,5	34,6	37,3	28,8
		CE (SI)	0,45	0,51	0,44	0,54
		T (°C)	20,1	20,2	20,2	20,2
	3	VWC (%)	28,2	32,5	34,3	31
		CE (SI)	0,36	0,31	0,27	0,45
		T (°C)	19,8	19,8	19,8	20,1
	4	VWC (%)	28,4	35,1	35,9	31,6
		CE (SI)	0,34	0,29	0,27	0,41
		T (°C)	19,8	19,7	19,7	19,7
	5	VWC (%)	42	37,5	39,9	28,2
		CE (SI)	0,51	0,45	0,39	0,5
		T (°C)	19,4	19,4	19,4	19,1

**Tableau II.02:** Les données collectées : 02/03/2024.

Localisation	N° de point	Profondeur	1,5" (3,8cm)	3"(7,6cm)	4,8"(12cm)	8"(20cm)
Mouzaïa	1	VWC (%)	46,9	36,2	38,5	33,2
		CE (SI)	0,58	0,44	0,37	0,39
		T (°C)	19,4	19,9	19,5	19,5
	2	VWC (%)	35	38,7	38	34,3
		CE (SI)	0,23	0,25	0,27	0,29
		T (°C)	19,8	19,7	19,8	20
	3	VWC (%)	33,5	34,8	36,3	34,1
		CE (SI)	0,38	0,29	0,28	0,36
		T (°C)	20,3	20,4	20,6	20,5
	4	VWC (%)	38,5	36,2	37,8	35,2
		CE (SI)	0,37	0,37	0,3	0,32
		T (°C)	20,7	20,7	20,8	20,5
	5	VWC (%)	40,5	42,4	41	35,6
		CE (SI)	0,47	0,24	0,29	0,29
		T (°C)	21	20,6	20,3	19,7
El Affroun	1	VWC (%)	24,8	29,4	32,9	32,1
		CE (SI)	0,36	0,57	0,63	0,73
		T (°C)	22,1	21,3	21,2	20,7
	2	VWC (%)	37,8	34,6	37,1	28,5
		CE (SI)	0,45	0,37	0,34	0,5
		T (°C)	22,1	21,8	21,5	20,8
	3	VWC (%)	27,2	34,4	38,4	33
		CE (SI)	0,22	0,24	0,29	0,4
		T (°C)	20,5	20,5	20,4	19,9
	4	VWC (%)	25,7	31,2	31,2	33,3
		CE (SI)	0,16	0,2	0,21	0,3
		T (°C)	20,1	20	19,9	19,8
	5	VWC (%)	33,3	37,3	37,7	34,5
		CE (SI)	0,3	0,3	0,28	0,38
		T (°C)	20,1	19,9	19,8	19,7

Tableau II.03: Les données collectées : 10/03/2024.

Localisation	N° de point	Profondeur	1,5" (3,8cm)	3"(7,6cm)	4,8"(12cm)	8"(20cm)
Mouzaïa	1	VWC (%)	38,5	32,6	38	29,9
		CE (SI)	0,51	0,43	0,36	0,47
		T (°C)	26,4	26,3	26,1	24,4
	2	VWC (%)	58,6	39,4	45,6	35,1
		CE (SI)	0,46	0,5	0,39	0,42
		T (°C)	25	25	24,9	24,4
	3	VWC (%)	51,5	39,8	41,7	33,8
		CE (SI)	0,43	0,36	0,34	0,34
		T (°C)	24,8	24,6	24,6	24,4
	4	VWC (%)	32,4	29,8	31,9	29,6
		CE (SI)	0,33	0,25	0,19	0,26
		T (°C)	24,3	24,3	24,4	24,4
	5	VWC (%)	25	25,3	29,1	25,9
		CE (SI)	0,17	0,2	0,18	0,19
		T (°C)	24,3	24,1	24,2	24,1
	6	VWC (%)	41,2	38,5	33,7	32,2
		CE (SI)	0,36	0,3	0,23	0,23
		T (°C)	23,9	23,9	23,6	23
	7	VWC (%)	46,5	37,3	37,7	34,1
		CE (SI)	0,47	0,26	0,27	0,33
		T (°C)	23,3	23,4	23,3	23,3
	8	VWC (%)	26,5	29,3	31,6	27,4
		CE (SI)	0,22	0,22	0,21	0,23
		T (°C)	23,2	23,2	23,2	23,2
	9	VWC (%)	43	35,3	40,4	35,1
		CE (SI)	0,58	0,44	0,35	0,36
		T (°C)	23	22,9	22,8	22,5
	10	VWC (%)	48,8	35,3	38,6	31,9
		CE (SI)	0,45	0,42	0,39	0,42
		T (°C)	22,3	22,2	22,1	21,7
1	VWC (%)	34,6	29,5	31,3	29,8	
	CE (SI)	0,81	0,71	0,54	0,59	
	T (°C)	23,1	22,9	22,8	20,9	
2	VWC (%)	25,8	22,1	24,2	29,5	
	CE (SI)	0,23	0,22	0,21	0,35	
	T (°C)	21,8	21,8	21,6	20,7	
3	VWC (%)	49,2	35,3	37,8	28,7	
	CE (SI)	0,62	0,56	0,49	0,49	
	T (°C)	20,8	20,8	20,9	20	
		VWC (%)	38,7	38,3	38	31,7

	4	CE (SI)	0,98	0,69	0,55	0,6
		T (°C)	20,4	20,4	20,5	20,4
El Affroun	5	VWC (%)	45,6	33,2	38	28,2
		CE (SI)	0,65	0,53	0,42	0,5
		T (°C)	20,4	20,3	20,2	18,8
	6	VWC (%)	51,8	37,1	40,6	29,7
		CE (SI)	0,54	0,45	0,36	0,5
		T (°C)	19,5	19,6	19,7	18,6
	7	VWC (%)	43,6	34,6	39,1	28,5
		CE (SI)	0,57	0,54	0,52	0,53
		T (°C)	19,8	19,8	19,7	18,8
	8	VWC (%)	30,5	30,1	31,2	30,6
		CE (SI)	0,31	0,28	0,24	0,37
		T (°C)	19,2	19,3	19,4	19,4
	9	VWC (%)	24,3	23,4	24	32,5
		CE (SI)	0,2	0,2	0,16	0,31
		T (°C)	19,6	19,6	19,6	19,5
	10	VWC (%)	36,3	35	41,7	31,8
		CE (SI)	0,35	0,33	0,4	0,46
		T (°C)	19,4	19,4	19,4	19,2

**Tableau III.04:** Les données collectées : 13/03/2024.

Localisation	N° de point	Profondeur	1,5'' (3,8cm)	3''(7,6cm)	4,8''(12cm)	8''(20cm)
Mouzaïa	1	VWC (%)	42,9	32,4	38,7	32,3
		CE (SI)	0,42	0,33	0,32	0,35
		T (°C)	24,5	24,2	24,2	24,4
	2	VWC (%)	26,8	28	40,4	34,9
		CE (SI)	0,19	0,27	0,31	0,35
		T (°C)	24,4	24,5	24,6	24,9
	3	VWC (%)	22,7	17,7	30,1	23,9
		CE (SI)	0,11	0,14	0,18	0,17
		T (°C)	24,8	25	25,2	25,2
	4	VWC (%)	35,9	31,6	24	35,2
		CE (SI)	0,22	0,24	0,33	0,36
		T (°C)	25,3	25,6	26,7	26,3
	5	VWC (%)	41,9	36,6	37,6	32,7
		CE (SI)	0,27	0,32	0,26	0,26
		T (°C)	26,1	25,9	25,9	26,1
	6	VWC (%)	40,8	39,2	41	33,2
		CE (SI)	0,22	0,33	0,43	0,37
		T (°C)	25,9	26,1	27,6	27,1
	7	VWC (%)	36,3	36,4	37,2	30
		CE (SI)	0,35	0,31	0,27	0,25
		T (°C)	26,8	26,9	26,8	26,8
El Affroun	1	VWC (%)	34,6	28,9	34	30,2
		CE (SI)	0,61	0,56	0,48	0,62
		T (°C)	23,1	22,9	22,8	22,6
	2	VWC (%)	40,9	31,9	36,2	29,8
		CE (SI)	0,48	0,51	0,5	0,58
		T (°C)	22,6	22,6	22,6	22,8
	3	VWC (%)	44,4	36,5	38,2	28,2
		CE (SI)	0,77	0,63	0,54	0,49
		T (°C)	22,9	22,9	22,8	22,2
	4	VWC (%)	45,3	31,5	35,9	28
		CE (SI)	0,62	0,46	0,39	0,47
		T (°C)	22,8	22,7	22,8	22,9
	5	VWC (%)	40,4	32,5	37,7	28,9
		CE (SI)	0,48	0,41	0,43	0,47
		T (°C)	23	23	23	23,1
	6	VWC (%)	28,3	19	22,3	31,4
		CE (SI)	0,29	0,2	0,17	0,32
		T (°C)	23,4	23,3	23,3	23,1
	7	VWC (%)	47,6	34,3	38,7	32
		CE (SI)	0,73	0,54	0,42	0,43
		T (°C)	23,7	23,6	23,5	22,9



**Tableau II.05:** Les données collectées : 23/03/2024.

Localisation	N° de point	Profondeur	1,5'' (3,8cm)	3''(7,6cm)	4,8''(12cm)	8''(20cm)
Mouzaïa	1	VWC (%)	19,8	39,9	40,4	32,3
		CE (SI)	0,06	0,38	0,33	0,29
		T (°C)	31,1	31,2	31,3	31,3
	2	VWC (%)	5,8	25,2	26,1	22,8
		CE (SI)	0,09	0,21	0,16	0,17
		T (°C)	31,3	31,3	31,5	31,5
	3	VWC (%)	10,1	21	19,3	16,9
		CE (SI)	0,01	0,09	0,12	0,08
		T (°C)	31,9	32	32,1	32,1
	4	VWC (%)	20,3	25,3	18,2	16,2
		CE (SI)	0,25	0,18	0,09	0,05
		T (°C)	32,3	32,2	32,2	31,9
	5	VWC (%)	13,7	24,1	26,1	20,9
		CE (SI)	0,04	0,07	0,1	0,09
		T (°C)	32,7	32,5	32,4	32,4
	6	VWC (%)	16,6	24,5	33,2	30,8
		CE (SI)	0,3	0,25	0,22	0,27
		T (°C)	32,6	32,6	32,8	32,7
	7	VWC (%)	27,1	32,1	36,6	31,6
		CE (SI)	0,99	0,62	0,5	0,43
		T (°C)	32,9	32,5	32,7	32,4
El Affroun	1	VWC (%)	15,5	24,7	22,5	25,6
		CE (SI)	0,02	0,1	0,13	0,17
		T (°C)	31,5	31,4	31,4	31
	2	VWC (%)	14,9	20,8	18,1	18,7
		CE (SI)	0,01	0,11	0,11	0,12
		T (°C)	31,1	31,3	31,2	31,1
	3	VWC (%)	29	33,7	35,1	27,4
		CE (SI)	0,37	0,48	0,49	0,49
		T (°C)	31,9	31,7	31,7	31,8
	4	VWC (%)	18,3	29,1	25,5	22,1
		CE (SI)	0,14	0,19	0,18	0,12
		T (°C)	31,9	31,6	31,6	31,6
	5	VWC (%)	4,6	25,3	24,4	24,4
		CE (SI)	0,08	0,13	0,13	0,13
		T (°C)	31,5	31,6	31,5	30,3
	6	VWC (%)	2,2	24,1	23,3	20,8
		CE (SI)	0,1	0,1	0,12	0,13
		T (°C)	30,7	31,1	31,2	31,2
	7	VWC (%)	13,8	29	29,1	25,4
		CE (SI)	0,05	0,21	0,19	0,15
		T (°C)	31,5	31,5	31,6	31,7

**Tableau II.06:** Les données collectées : 01/05/2024.

Localisation	N° de point	Profondeur	1,5" (3,8cm)	3"(7,6cm)	4,8"(12cm)	8"(20cm)
Mouzaïa	1	VWC (%)	26,8	25,6	31,6	23,2
		CE (SI)	0,36	0,35	0,23	0,18
		T (°C)	27,3	27,2	27	27,2
	2	VWC (%)	30,3	22	26,8	24,5
		CE (SI)	0,47	0,32	0,21	0,19
		T (°C)	26,9	27	26,8	26
	3	VWC (%)	26	15,6	21,9	16,7
		CE (SI)	0,5	0,28	0,17	0,12
		T (°C)	25,4	25,3	25,2	25,2
	4	VWC (%)	16,4	15,8	25,7	20,8
		CE (SI)	0,22	0,18	0,15	0,14
		T (°C)	25,2	25,1	25,1	25
	5	VWC (%)	25,9	21,9	31,3	21,8
		CE (SI)	0,32	0,21	0,2	0,14
		T (°C)	24,9	25,2	25,1	25,3
	6	VWC (%)	9,5	15,6	26,2	26,9
		CE (SI)	0,15	0,15	0,17	0,2
		T (°C)	25,4	25,3	25,3	25,3
	7	VWC (%)	20,6	16,7	24,6	26,5
		CE (SI)	0,23	0,21	0,17	0,2
		T (°C)	25,4	25,4	25,5	25,6
	8	VWC (%)	27,5	29	35,9	30,5
		CE (SI)	0,46	0,39	0,35	0,28
		T (°C)	25,6	25,8	26,6	26,4
	9	VWC (%)	30,1	23,1	30,7	29,6
		CE (SI)	0,44	0,26	0,25	0,25
		T (°C)	26,9	26,7	26,7	26,6
El Affroun	1	VWC (%)	26,5	30,4	31,5	26,2
		CE (SI)	1,14	0,76	0,56	0,33
		T (°C)	28,4	28,6	28,6	28,6
	2	VWC (%)	15,1	22	20,5	16,7
		CE (SI)	1,16	0,45	0,15	0,17
		T (°C)	28,9	28,9	29	29,1
	3	VWC (%)	19,5	13,3	17,1	
		CE (SI)	0,42	0,22	0,14	
		T (°C)	29,2	29,1	29,2	
	4	VWC (%)	17,5	10,5	15,1	13,1
		CE (SI)	0,35	0,17	0,11	0,11
		T (°C)	29,1	28	27,9	27,8
	5	VWC (%)	25,8	19		
		CE (SI)	0,95	0,45		
		T (°C)	28,3	27,9		

**Tableau II.07:** Les données collectées : 02/05/2024.

Localisation	N° de point	Profondeur	1,5'' (3,8cm)	3''(7,6cm)	4,8''(12cm)	8''(20cm)
Mouzaïa	1	VWC (%)	18,3	22,8	25,8	24,8
		CE (SI)	0,41	0,34	0,25	0,2
		T (°C)	25,8	25,9	25,6	25,5
	2	VWC (%)	44,3	32,2	35,1	
		CE (SI)	0,62	0,49	0,41	
		T (°C)	25,6	25,6	25,6	
	3	VWC (%)	35,4	21,2	16,2	19,2
		CE (SI)	0,34	0,22	0,14	0,13
		T (°C)	25,7	25,5	25,4	25,2
	4	VWC (%)	8,3	12,7	18,9	21,4
		CE (SI)	0,18	0,21	0,16	0,14
		T (°C)	25	24,9	23,9	24,8
	5	VWC (%)	15,3	16,7	16,7	21,4
		CE (SI)	0,15	0,17	0,15	0,1
		T (°C)	24,9	24,9	24,8	24,8
	6	VWC (%)	21,9	24,5	29,1	27,5
		CE (SI)	0,31	0,31	0,29	0,2
		T (°C)	25,1	25	24,9	24,9
	7	VWC (%)	7,4	10,4	25	
		CE (SI)	0,16	0,19	0,2	
		T (°C)	25,2	24,9	24,9	
El Affroun	1	VWC (%)	4,8	15	18	13,8
		CE (SI)	0,1	0,19	0,28	0,08
		T (°C)	27,9	27,4	26,6	26,4
	2	VWC (%)	28	19,9	19,2	
		CE (SI)	0,95	0,37	0,2	
		T (°C)	26,2	26	25,9	
	3	VWC (%)	41,6	30,3	29,1	27,1
		CE (SI)	0,68	0,56	0,38	0,26
		T (°C)	25,5	25,3	25,3	25,2
	4	VWC (%)	34,7	25,3	24,8	19,7
		CE (SI)	0,72	0,59	0,3	0,13
		T (°C)	25,6	25,4	25,3	25,2
	5	VWC (%)	26,4	5,8	10,9	15,2
		CE (SI)	0,33	0,04	0,1	0,14
		T (°C)	25,7	25,4	25,1	24,8
	6	VWC (%)	36,8	28,9	29,5	
		CE (SI)	0,44	0,49	0,2	
		T (°C)	24,9	24,8	24,7	
	7	VWC (%)	25,9	35,5	25	
		CE (SI)	1,21	0,93	0,27	
		T (°C)	25,5	24,9	24,6	

**Tableau II.08:** Les données collectées : 03/05/2024.

Localisation	N° de point	Profondeur	1,5'' (3,8cm)	3''(7,6cm)	4,8''(12cm)	8''(20cm)
Mouzaïa	1	VWC (%)	25,5	22,3	13,2	10
		CE (SI)	0,45	0,29	0,19	0,08
		T (°C)	26,6	26,6	26,6	25,4
	2	VWC (%)	28,3	28,3	22,5	13,2
		CE (SI)	0,35	0,36	0,22	0,17
		T (°C)	26,1	25,9	25,8	25,4
	3	VWC (%)	8,9	13,6	11,3	11,2
		CE (SI)	0,07	0,21	0,12	0,14
		T (°C)	26,1	26,1	26,7	26,4
	4	VWC (%)	3,1	17,3	15,5	16,7
		CE (SI)	0,1	0,23	0,19	0,2
		T (°C)	26,9	26,7	26,7	26,6
	5	VWC (%)	16,5	15,5	13,3	12,4
		CE (SI)	0,23	0,26	0,21	0,18
		T (°C)	26,8	26,8	26,7	26,7
	6	VWC (%)	7,8	10,9	9,4	10,3
		CE (SI)	0,11	0,14	0,1	0,11
		T (°C)	27	27	27	27
	7	VWC (%)	17,1	16,8	15	11,6
		CE (SI)	0,22	0,23	0,18	0,13
		T (°C)	27,4	27,2	27,1	27,1
El Affroun	1	VWC (%)	29	18,5	21,7	26,7
		CE (SI)	0,55	0,36	0,24	0,26
		T (°C)	26,3	26,4	26,3	26,3
	2	VWC (%)	26	26,8	30,3	21,7
		CE (SI)	1,23	0,67	0,45	0,14
		T (°C)	26,7	26,9	27,5	27,6
	3	VWC (%)	17,6	13,1	16,5	24
		CE (SI)	0,35	0,17	0,14	0,11
		T (°C)	27,8	27,7	27,3	26,2
	4	VWC (%)	38,5	32,2	32,3	31,9
		CE (SI)	0,54	0,45	0,3	0,35
		T (°C)	27,7	27,5	27,4	27,4
	5	VWC (%)	14,8	18,7	17,9	12,1
		CE (SI)	0,27	0,28	0,31	0,19
		T (°C)	27,7	26,7	27,6	27,7
	6	VWC (%)	31,1	22,4	15,3	10,7
		CE (SI)	0,89	0,43	0,23	0,1
		T (°C)	28	27,9	27,7	27,8
	7	VWC (%)	16,2	12,9	6,7	6,3
		CE (SI)	0,35	0,16	0,04	0,04
		T (°C)	28	27,9	27,9	27,9

**Tableau II.09:** Les données collectées : 04/05/2024.

Localisation	N° de point	Profondeur	1,5'' (3,8cm)	3''(7,6cm)	4,8''(12cm)	8''(20cm)
Mouzaïa	1	VWC (%)	19,3	14,2	9,3	11
		CE (SI)	0,25	0,21	0,15	0,14
		T (°C)	26,3	26,1	26,1	25,9
	2	VWC (%)	19,4	15,9	10,8	11,9
		CE (SI)	0,06	0,14	0,11	0,16
		T (°C)	26,6	26,1	26	26
	3	VWC (%)	18,7	13,4	12,1	10,6
		CE (SI)	0,21	0,15	0,11	0,12
		T (°C)	26,6	26,4	26,3	26,1
	4	VWC (%)	15,3	15	14,2	12
		CE (SI)	0,13	0,18	0,18	0,13
		T (°C)	26,9	26,6	26,4	26,3
	5	VWC (%)	12,5	5	4,9	7,4
		CE (SI)	0,29	0,16	0,1	0,1
		T (°C)	26,8	26,6	26,6	26,6
	6	VWC (%)	13	11,6	12,7	12,8
		CE (SI)	0,16	0,16	0,16	0,14
		T (°C)	27,1	26,8	26,8	25,7
	7	VWC (%)	13,8	10,3	9,6	8,6
		CE (SI)	0,05	0,09	0,08	0,06
		T (°C)	26,8	26,8	26,7	26,7
El Afroun	1	VWC (%)	25	8,4	5,7	5,2
		CE (SI)	0,54	0,23	0,03	0,08
		T (°C)	24,4	25,3	25,3	25,4
	2	VWC (%)	24,2	19,3	11,6	9,5
		CE (SI)	0,4	0,28	0,15	0,11
		T (°C)	25,5	25,4	25,4	25,4
	3	VWC (%)	29,1	22	23,9	20,5
		CE (SI)	0,55	0,33	0,27	0,29
		T (°C)	26	25,9	25,8	25,7
	4	VWC (%)	25,6	22,6	15,9	12,8
		CE (SI)	0,42	0,38	0,27	0,21
		T (°C)	26	26,1	26,1	26,3
	5	VWC (%)	12,6	6,1	3,8	6,3
		CE (SI)	0,26	0,14	0,11	0,07
		T (°C)	27	26,6	26,5	26,3
	6	VWC (%)	27,3	18,2	15,8	15,6
		CE (SI)	0,75	0,19	0,21	0,2
		T (°C)	26,9	26,6	26,5	26,5
	7	VWC (%)	15,7	10,8	6	5,8
		CE (SI)	0,23	0,18	0,11	0,09
		T (°C)	26,8	26,7	26,6	26,5

## II.2.2. Données de satellite

### II.2.2.1. Satellite SMAP

Le satellite SMAP (Soil Moisture Active Passive) est une mission de la NASA lancée en 2015 pour mesurer l'humidité du sol et le gel/dégel à l'échelle globale. SMAP est conçu pour fournir des données essentielles pour la gestion de l'eau, l'agriculture, la météorologie et les études climatiques. Il utilise une combinaison de technologies de télédétection active (radar) et passive (radiomètre) pour capturer des données précises sur l'humidité des sols à la surface terrestre.

Objectifs et caractéristiques de la mission SMAP :

Mesure de l'humidité du sol : SMAP mesure l'humidité dans les 5 premiers centimètres du sol avec une résolution spatiale allant de 9 à 36 km et une récurrence de 2 à 3 jours. Ces données sont cruciales pour le suivi des conditions de sécheresse, l'efficacité de l'irrigation, et la prédiction des inondations.

Observation du gel et du dégel : Le satellite suit également le gel et le dégel des sols dans les régions froides, fournissant des informations utiles pour les prévisions météorologiques et les études sur le changement climatique.

**Tableau II.10:** Les données de l'humidité du sol par le satellite SMAP.

Date	El Affroun		Mouzaïa	
	sm_SMAP%	sm_SMAP	sm_SMAP%	sm_SMAP
19/02/2024	21,6	0,216	26,7	0,267
02/03/2024	20,5	0,205	22,2	0,222
10/03/2024	24,4	0,244	23,3	0,233
13/03/2024	16,1	0,161	-	-
23/03/2024	13,2	0,132	11,1	0,111
01/05/2024	14,5	0,145	10,9	0,109
02/05/2024	11,1	0,111	17,2	0,172
03/05/2024	20,8	0,208	15,8	0,158
04/05/2024	2,4	0,024	9,7	0,097

### II.2.2.2. Satellite SIW-ASCAT

Le satellite SIW-SACAT (Satellite Imaging with Water and Soil Airborne Capability Assessment Technology) est conçu pour observer la Terre, en particulier pour mesurer l'humidité du sol et gérer les ressources en eau. Grâce à des technologies d'imagerie avancées, il fournit des données haute résolution sur l'état des sols et des surfaces d'eau, ce qui permet d'améliorer la gestion des ressources agricoles et hydriques, notamment dans les régions soumises à la sécheresse. Ses mesures contribuent également à des applications

environnementales comme la prévision des inondations et l'évaluation des changements climatiques.

ASCAT utilise un radar à rétro-diffusion pour mesurer l'humidité, offrant une résolution spatiale de 50 km, avec un produit expérimental à 25 km. SCAT fournit une couverture quasi globale quotidienne grâce à sa conception.

**Tableau II.11:** Les données de l'humidité du sol par le satellite SIW-ASCAT.

Date	El Affroun		Mouzaïa	
	SIW-ASCAT%	SIW-ASCAT	SIW-ASCAT%	SIW-ASCAT
19/02/2024	74	0,74	74	0,74
02/03/2024	75	0,75	75	0,75
10/03/2024	64,5	0,645	64,5	0,645
13/03/2024	56	0,56	56	0,56
23/03/2024	48	0,48	48	0,48
01/05/2024	42,5	0,425	42,5	0,425
02/05/2024	42,5	0,425	42,5	0,425
03/05/2024	40,5	0,405	40,5	0,405
04/05/2024	39,5	0,395	39,5	0,395

### II.3.Prétraitement des données

Le prétraitement des données est une étape cruciale qui prépare les ensembles de données pour des analyses plus approfondies. Avant d'exploiter les relations entre ces données, il est essentiel de s'assurer que les informations utilisées sont de haute qualité et cohérentes.

**Tableau II.12:** Les données de l'humidité du sol pour la zone d'El Affroun.

Date	SM_ (in situ) %	SM_SWI-ASCAT %	SM_SMAP %
19/02/2024	35,32	74	21.6
02/03/2024	33,38	75	20.5
10/03/2024	31,86	64,5	24.4
13/03/2024	30,66	56	16.1
23/03/2024	26,67	48	13.2
01/05/2024	19,04	42,5	14.5
02/05/2024	22,95	42,5	11.1
03/05/2024	20,66	40,5	20.8
04/05/2024	15,34	39,5	2.4

**Tableau II.13:** Les données de l'humidité du sol pour la zone de Mouzaia.

Date	SM_ (in situ) %	SM_SMAP %	SM_SWI-ASCAT %
19/02/2024	37,64	26,7	74
02/03/2024	37,66	22,2	75
10/03/2024	34,26	23,3	64.5
23/03/2024	27,44	11,1	48
01/05/2024	20,59	10,9	42.5
02/05/2024	20,07	17,2	42.5
03/05/2024	17,81	15,8	40.5
04/05/2024	12,2	9,7	39.5

## II.4. Analyse des données

Pour analyser les données, plusieurs méthodes statistiques peuvent être utilisées.

### II.4.1. Analyse de corrélation

L'analyse de corrélation est une méthode statistique essentielle pour évaluer la relation entre deux variables. Elle permet de déterminer non seulement si une relation existe, mais aussi la force et la direction de cette relation.

L'analyse de corrélation calcule le degré de changement d'une variable en fonction du changement d'une autre. Elle est particulièrement utile dans divers domaines, tels que la recherche scientifique, le marketing et les sciences sociales, pour identifier des tendances et des associations significatives entre les données.

Le coefficient de corrélation, noté  $r$ , est l'indicateur principal utilisé pour quantifier la force et la direction de la relation linéaire entre deux variables. Ce coefficient varie entre -1 et +1.

L'une des méthodes les plus courantes pour calculer le coefficient de corrélation est la corrélation de Pearson, qui se concentre sur les relations linéaires entre des variables continues. D'autres méthodes incluent les corrélations de Spearman et Kendall, qui peuvent être utilisées pour des données ordinales ou non paramétriques.

- **Calcul du Coefficient de Corrélation**

On utilise la formule du coefficient de corrélation de Pearson :

$$r = \frac{n(\sum xy) - (\sum x)(\sum y)}{\sqrt{[n\sum x^2 - (\sum x)^2][n\sum y^2 - (\sum y)^2]}} \dots \dots \dots III. 1$$

D'où :

**n** : Est le nombre de paires de données,

**x** : Représente les valeurs d'humidité du sol in situ,

**y** : Représente les valeurs d'humidité du sol satellitaire.



### II.4.2. Analyse de régression linéaire

La régression linéaire est une méthode statistique qui cherche à établir une relation linéaire entre une variable dépendante (Y) et une ou plusieurs variables indépendantes (X). L'objectif principal est prédire la valeur de Y en fonction des valeurs de X, en minimisant la somme des carrés des erreurs entre les valeurs observées et les valeurs prédites.

La formule générale de la régression linéaire est :  $Y = a + bX + \epsilon$  ... .. III. 2

Avec ;

**Y** : Variable dépendante.

**a** : Ordonnée à l'origine (intercept).

**b** : Coefficient de régression (pente).

**X** : Variable indépendante.

**$\epsilon$**  : Erreur aléatoire.

### II.4.3. Erreur quadratique moyenne (EQM)

L'erreur quadratique moyenne (EQM) est une mesure de la précision d'un modèle statistique, représentant la moyenne des carrés des écarts entre les valeurs observées et les valeurs prédites. Elle se calcule avec la formule :

$$EQM = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \dots \dots \dots III. 3$$

Avec ;

**$y_i$**  : Les valeurs observées.

**$\hat{y}_i$**  : Les valeurs prédites.

**n** : Le nombre total d'observations.

L'EQM est toujours positive et plus elle est proche de zéro, meilleure est la précision du modèle.

### II.4.4. Erreur absolue moyenne (EAM)

L'erreur absolue moyenne est une mesure de la précision des prévisions, calculée en prenant la moyenne des différences absolues entre les valeurs réelles et prédites. Elle est exprimée par la formule :

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{je=1}^n |y_{je} - \tilde{y}_{je}| \dots \dots \dots III. 4$$

D'où ;

**$y_{je}$**  : Les valeurs réelles.

**$\tilde{y}_{je}$**  : Les valeurs prédites.

**n** : Le nombre total d'observations.

Le MAE est utile pour évaluer les performances des modèles de prévision, car il fournit une indication claire de l'erreur moyenne commise.

## Conclusion

La plaine de la Mitidja en Algérie, grâce à ses caractéristiques géographiques favorables et à son climat méditerranéen, constitue une région agricole essentielle. Sa diversité de sols et son accès à l'eau en font un espace idéal pour l'agriculture.

Pour obtenir une compréhension approfondie des dynamiques d'humidité du sol, il est crucial de combiner des données issues de mesures in situ et satellitaires. Les méthodes d'analyse statistique, comme l'analyse de corrélation et la régression linéaire, sont essentielles pour évaluer les relations entre ces deux types de données. L'analyse de corrélation permet d'examiner la force et la direction de ces relations, tandis que la régression linéaire aide à modéliser et à prévoir les niveaux d'humidité du sol. De plus, des mesures d'erreur, telles que l'erreur quadratique moyenne et l'erreur absolue moyenne, permettent de quantifier la précision des prévisions, offrant ainsi des outils pour évaluer l'efficacité des modèles.

***Chapitre III***  
***Résultats et discussion***

## Chapitre III : Résultats et discussion

### Introduction

Ce chapitre présente une analyse comparative des données in situ et satellitaire pour l'estimation de l'humidité du sol. En utilisant des méthodes d'analyse statistique, nous avons évalué les performances des deux types de données pour les zones d'El Afroune et Mouzaia.

### III.1. Résultats d'analyse des données

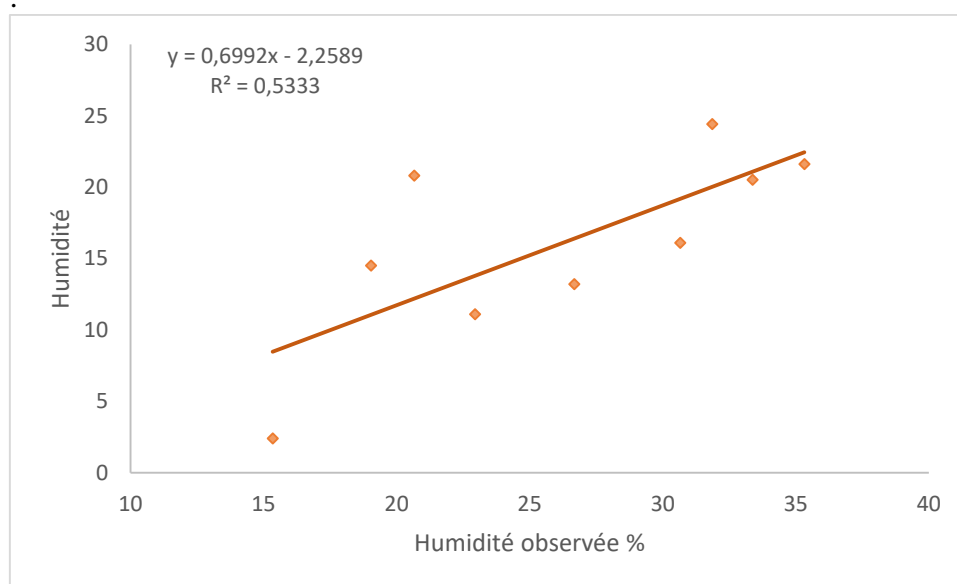
#### III.1.1. Résultats d'analyse de corrélation

##### ➤ Zone d'El Affroun

D'après la formule du coefficient de corrélation de Pearson :

$$r = \frac{n(\sum xy) - (\sum x)(\sum y)}{\sqrt{[n\sum x^2 - (\sum x)^2][n\sum y^2 - (\sum y)^2]}}$$

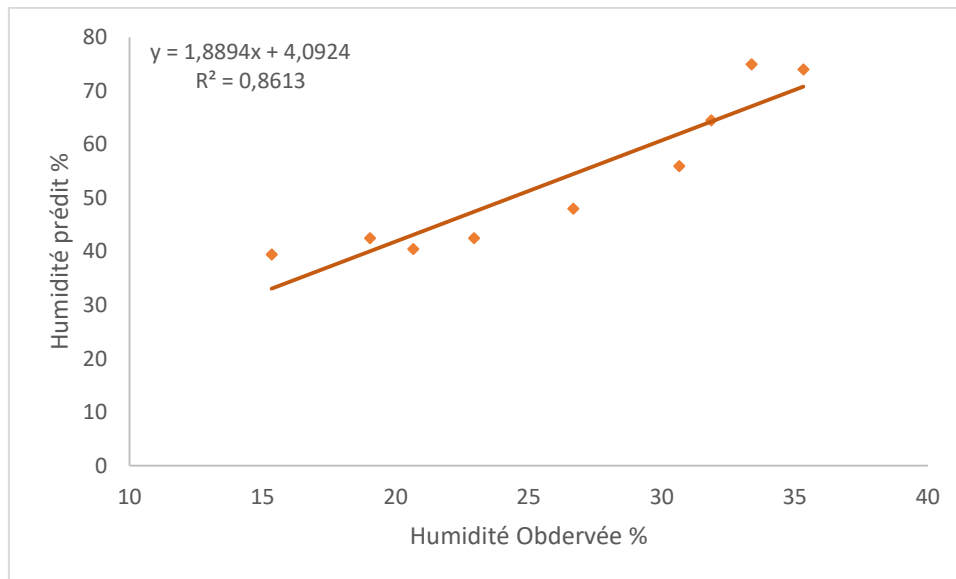
SMAP	SIW-ASCAT
$r = 0,730134001$	$r = 0,928036484$



**Figure III.01 :** La relation entre les mesures in situ et satellitaire (SMAP) de l'humidité du sol.

Le coefficient de détermination ( $R^2$ ) de 0.5333 indique que seulement 53,33 % de la variance dans les données d'humidité du sol in situ peut être expliquée par les données SMAP, ce qui suggère une relation modérée.

Un coefficient de corrélation de 0,730134001 indique une corrélation positive significative.



**Figure III.02 :** La relation entre les mesures in situ et satellitaire (SIW-ASCAT) de l'humidité du sol.

Avec un  $R^2$  de 0.8613, il est évident que les données ASCAT expliquent une grande partie de la variance dans les mesures in situ, indiquant une bonne adéquation.

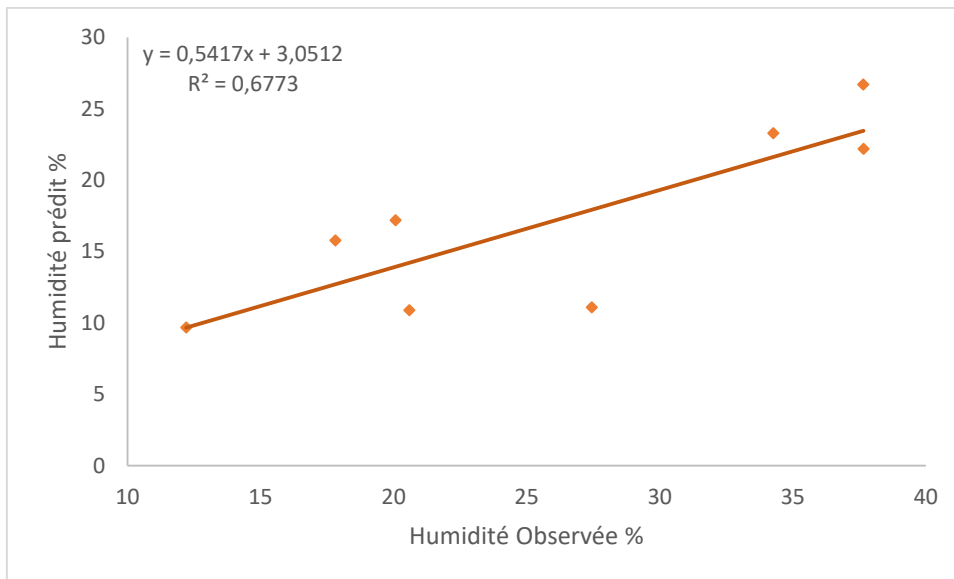
Un coefficient de corrélation élevé de 0,928036484 montre une forte relation entre les données ASCAT et les mesures in situ, ce qui suggère que les données ASCAT sont plus fiables pour estimer l'humidité du sol dans cette région.

➤ **Zone de Mouzaïa**

D'après la formule du coefficient de corrélation de Pearson :

$$r = \frac{n(\sum xy) - (\sum x)(\sum y)}{\sqrt{[n\sum x^2 - (\sum x)^2][n\sum y^2 - (\sum y)^2]}}$$

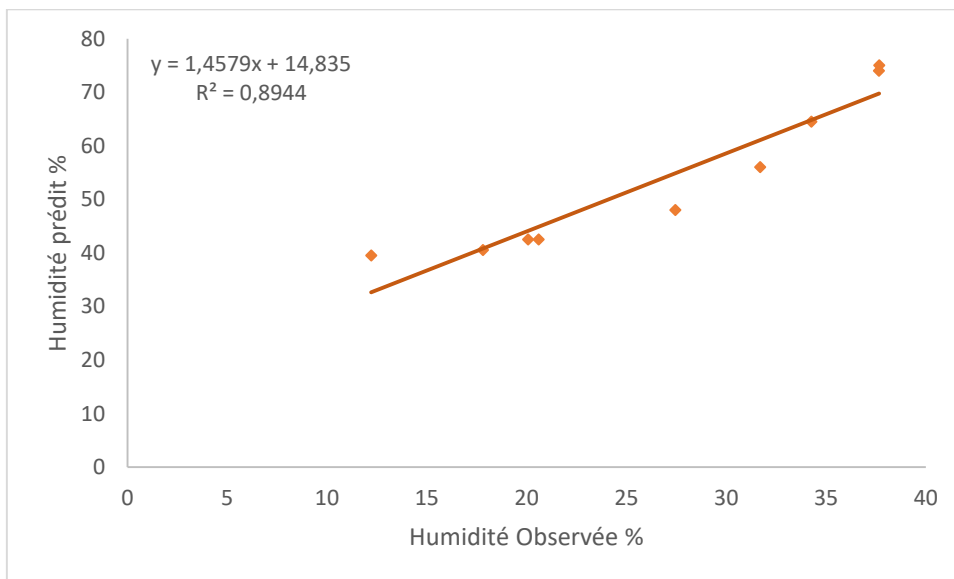
SMAP	SIW-ASCAT
$r = 0,822997595$	$r = 0,955093172$



**Figure III.03 :** La relation entre les mesures in situ et satellitaire (SMAP) de l'humidité du sol.

Le coefficient de détermination ( $R^2$ ) de 0.6733 indique que 67,33 % de la variance des données in situ est expliquée par les données SMAP, ce qui montre une relation modérée à forte.

Un coefficient de corrélation de 0,822997595 indique une bonne corrélation positive, suggérant que les données SMAP sont raisonnablement fiables pour estimer l'humidité du sol.



**Figure III.04 :** La relation entre les mesures in situ et satellitaire (SIW-ASCAT) de l'humidité du sol.

Avec un  $R^2$  de 0.8944, les données ASCAT expliquent une grande partie de la variance dans les mesures in situ, indiquant une très bonne adéquation.

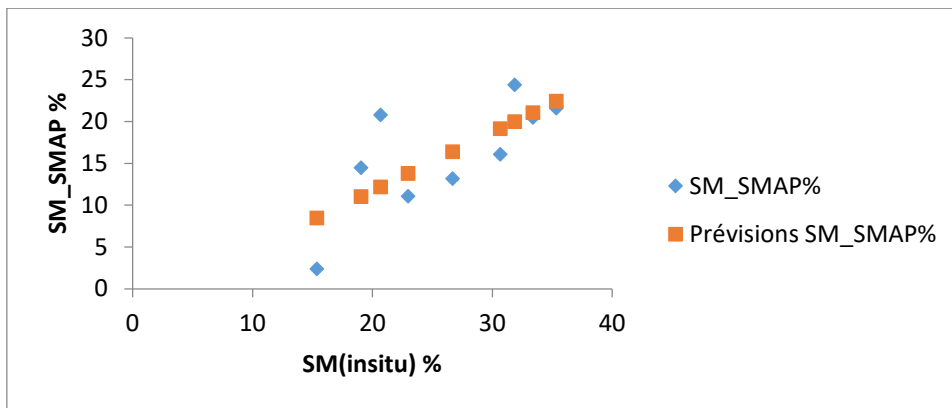
Un coefficient de corrélation élevé de 0,955093172 démontre une forte relation linéaire positive entre les données ASCAT et les mesures in situ, ce qui en fait un outil très fiable pour cette analyse.

### III.1.2. Résultats d'analyse de la régression linéaire

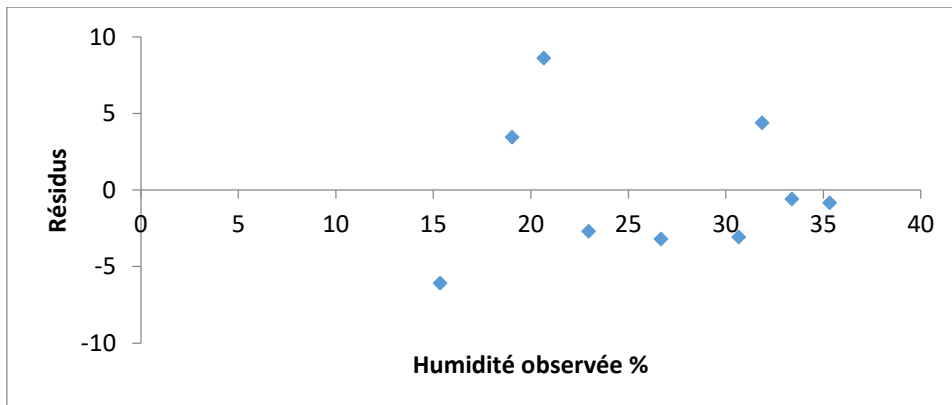
#### ➤ Zone d'El Affroun

**Tableau III.01** : Résultats d'analyse de la régression linéaire.

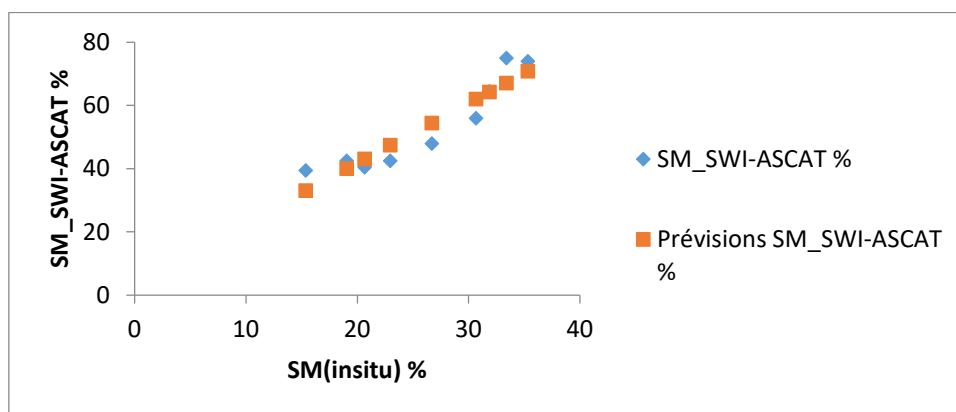
	SMAP	SIW-ASCAT
coefficient de détermination $R^2$	0,53309566	0,86125172
valeur de critique de F (la pente)	0,02551292	0,00030665



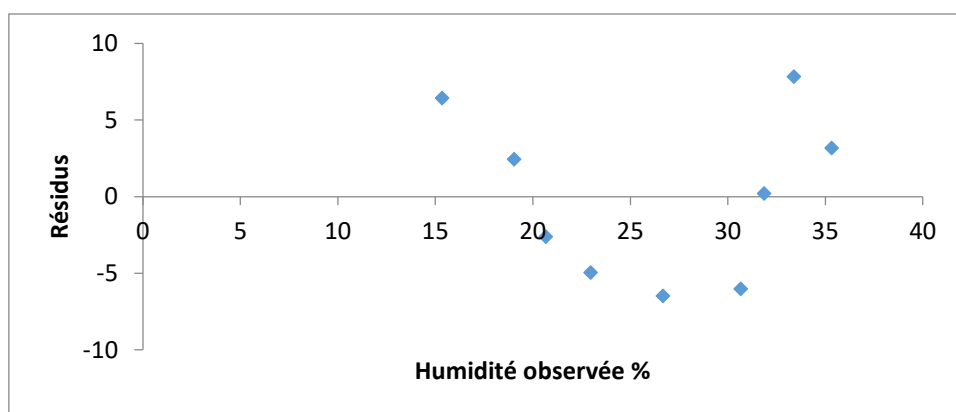
**Figure III.05** : Régression linéaire entre les données in situ et satellitaire (SMAP).



**Figure III.06** : Résidus en fonction de l'humidité du sol.



**Figure III.07 :** Régression linéaire entre les données in situ et satellitaire (SIW-ASCAT).



**Figure III.08 :** Résidus en fonction de l'humidité du sol.

Pour le satellite SMAP, le coefficient  $R^2$  indique que 53,3 % de la variance des données d'humidité du sol est expliquée par le modèle. La valeur critique de F étant significative (inférieure à 0,05), cela suggère que le modèle est pertinent.

Pour le satellite ASCAT, un  $R^2$  élevé (86,1 %) indique une forte capacité explicative du modèle. La valeur critique de F très faible renforce la signification statistique.

➤ **Zone de Mouzaïa**

**Tableau III.02 :** Résultats d'analyse de la régression linéaire.

	SMAP	SIW-ASCAT
coefficient de détermination $R^2$	0,67732504	0,91220297
valeur de critique de F (la pente)	0,01208838	0,00021884



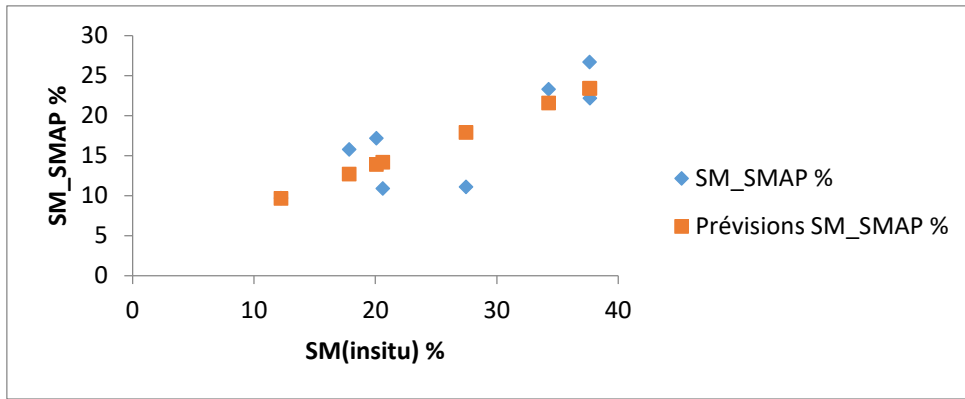


Figure III.09 : Régression linéaire entre les données in situ et satellitaire(SMAP).

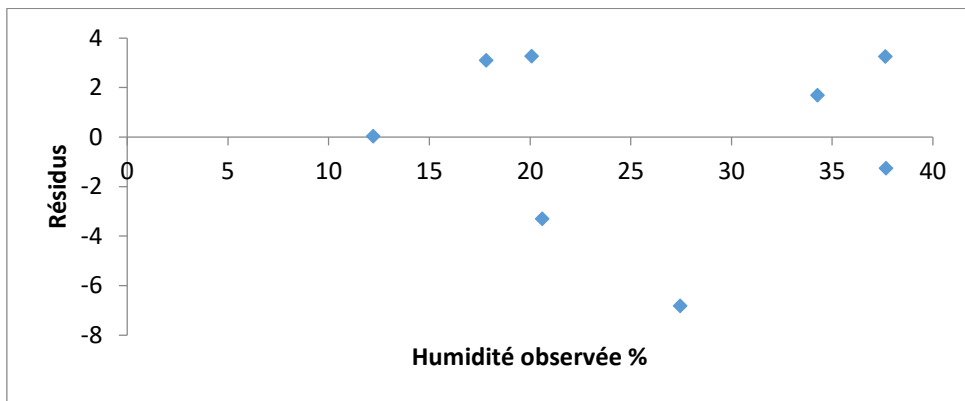


Figure III.10 : Résidus en fonction de l'humidité du sol.

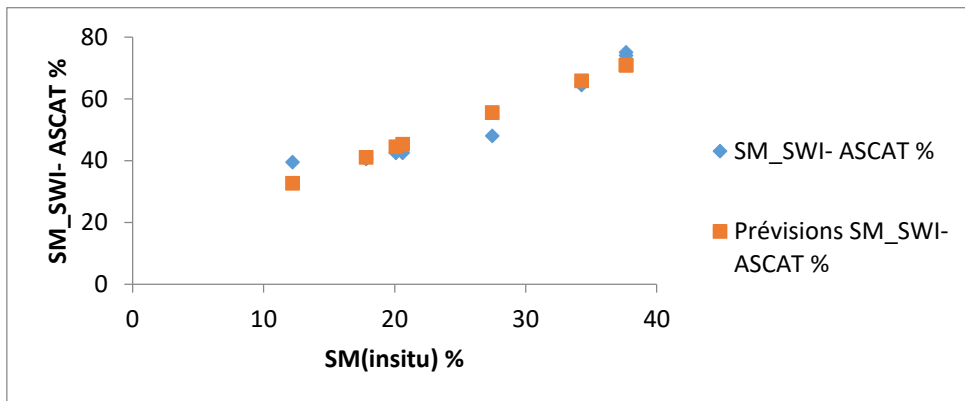
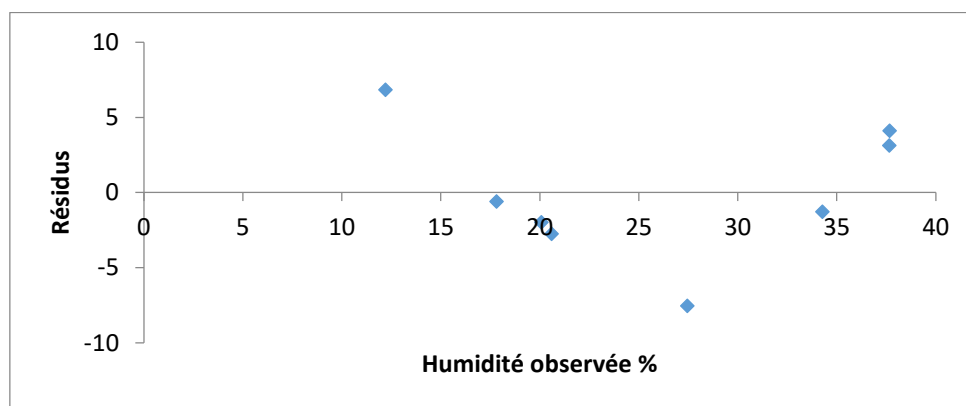


Figure III.11 : Régression linéaire entre les données in situ et satellitaire (SIW-ASCAT).



**Figure III.12 :** Résidus en fonction de l'humidité du sol.

Le satellite SMAP montre une amélioration par rapport à El Affroun avec un  $R^2$  de 67,7 %, ce qui indique une meilleure relation entre les variables. La valeur critique de F est également significative.

Le satellite ASCAT présente une performance encore plus élevée avec un  $R^2$  de 91,2 %, indiquant une très bonne adéquation du modèle aux données in situ. La valeur critique de F extrêmement faible confirme la robustesse du modèle.

- Analyse des résidus

Les valeurs des résidus fournissent une mesure de la différence entre les valeurs observées et les valeurs prédites par le modèle. Des résidus proches de zéro indiquent une bonne adéquation du modèle aux données.

Dans la zone d'El Affroun, les résidus pour le satellite SMAP montrent une variation plus large par rapport à ASCAT, ce qui peut indiquer une performance légèrement moins stable du modèle SMAP.

Pour la zone de Mouzaia, les résidus du satellite SMAP sont également plus étendus, tandis que ceux d'ASCAT montrent une variabilité similaire mais avec un maximum plus élevé.

Ces résultats mettent en évidence l'importance de l'analyse des résidus dans l'évaluation de la qualité des modèles de régression linéaire utilisés pour l'estimation de l'humidité du sol à partir de données satellitaires.

### III.1.3. Résultats d'erreur quadratique moyenne

**Tableau III.03 :** Résultats de calcul d'erreur quadratique moyenne.

	El Affroun	Mouzaia
in situ/SMAP	125,768399	107,2916
in situ/SIW-ASCAT	811,167351	787,05602

Pour la zone d'El Affroun, l'EQM pour le satellite SMAP (125,768) est significativement plus faible que celle du satellite ASCAT (811,167), indiquant que SMAP fournit des estimations plus proches des valeurs in situ.

Dans la zone de Mouzaia, l'EQM pour le satellite SMAP (107,292) reste inférieure à celle du satellite ASCAT (787,056), confirmant une tendance similaire.

Des valeurs d'EQM plus faibles indiquent une meilleure performance du modèle dans la prédiction de l'humidité du sol. Ainsi, les résultats suggèrent que le satellite SMAP est plus fiable que le satellite ASCAT pour les deux zones étudiées.

L'EQM élevée pour ASCAT dans les deux zones pourrait signaler une variabilité plus importante ou des erreurs de prédiction moins précises.

#### III.1.4. Résultats d'erreur absolue moyenne

**Tableau III.04** : Résultats de calcul d'erreur absolue moyenne.

	El Affroun	Mouzaia
in situ/SMAP	10,1746032	8,84718254
in situ/SIW-ASCAT	27,4015873	27,3528175

Pour la zone d'El Affroun, l'EAM pour le satellite SMAP (10,175) est beaucoup plus faible que celle du satellite ASCAT (27,402), ce qui indique que SMAP fournit des estimations plus précises par rapport aux valeurs in situ.

Dans la zone de Mouzaia, la tendance se maintient avec une EAM pour le satellite SMAP (8,847) également inférieure à celle du satellite ASCAT (27,353).

Des valeurs d'EAM plus faibles indiquent une meilleure performance du modèle dans la prédiction de l'humidité du sol. Les résultats montrent que le satellite SMAP est plus fiable que le satellite ASCAT dans les deux zones étudiées.

L'EAM relativement élevée pour ASCAT dans les deux zones suggère une variabilité plus importante ou des erreurs de prédiction moins précises.

### III.2. Résultats finale des analyses

- Corrélations et Ajustement des Modèles :

Les données SMAP et ASCAT montrent toutes deux une bonne corrélation avec les données in situ, mais ASCAT a un meilleur ajustement global, comme l'indiquent les  $R^2$  plus élevés.

La valeur critique de F pour les deux satellites étant significative (inférieure à 0,05) confirme que les modèles sont pertinents.

- Performance de SMAP vs ASCAT :

Bien que SMAP ait des  $R^2$  plus faibles, il montre une meilleure précision selon les EQM et EAM, indiquant qu'il fournit des estimations plus proches des mesures in situ.

Cette tendance se maintient dans les deux zones étudiées, soulignant la robustesse de SMAP en termes d'estimations précises malgré une capacité explicative légèrement inférieure.

- Variabilité régionale :

La zone de Mouzaia présente de meilleures corrélations et ajustements que la zone d'El Affroun, ce qui peut être dû à des facteurs environnementaux ou à des différences dans les caractéristiques du sol.

### III.3. Discussions

#### III.3.1. Implications des résultats

Les résultats indiquent que SMAP, bien qu'il ait un pouvoir explicatif moins élevé qu'ASCAT, offre des estimations plus précises pour l'humidité du sol, tant en termes de capacité explicative ( $R^2$ ) que d'erreurs (EQM et EAM). Les coefficients de corrélation élevés pour les deux satellites renforcent la confiance dans l'utilisation des données satellitaires pour l'estimation de l'humidité du sol. Cela suggère que SMAP pourrait être particulièrement utile pour des applications nécessitant des prédictions précises, tandis qu'ASCAT pourrait être plus approprié pour des analyses nécessitant une explication plus large de la variance. Ces résultats pourraient guider des décisions concernant l'utilisation de données satellitaires pour le suivi de l'humidité du sol.

#### III.3.2. Comparaison avec les études antérieures

Les résultats actuels montrent des coefficients de corrélation et des valeurs  $R^2$  qui se situent dans une plage acceptable par rapport aux études antérieures en Algérie.

- Évaluation par TDR :

Une étude a montré que les mesures d'humidité du sol obtenues par la méthode TDR avaient une corrélation satisfaisante avec les méthodes gravimétriques, mais avec certaines variations dues à la température du sol et aux caractéristiques physiques<sup>1</sup>. Les valeurs  $R^2$  observées dans cette étude étaient souvent inférieures à celles obtenues avec SMAP et ASCAT dans la présente analyse.

- Utilisation de Sentinel-2 :

D'autres recherches utilisant les données de Sentinel-2 ont développé des indices pour estimer l'humidité du sol avec une précision variable selon les conditions climatiques et la nature du sol<sup>2</sup>. Les résultats actuels montrent une meilleure capacité explicative avec ASCAT par rapport aux études utilisant uniquement des données satellitaires.

- Approches précédentes :

Des études antérieures sur l'humidité du sol dans des zones semi-arides ont révélé que les méthodes basées sur la télédétection peuvent avoir des limitations en raison de la variabilité spatiale et temporelle des sols<sup>4</sup>. Les résultats actuels indiquent une amélioration dans la précision des estimations d'humidité grâce à l'utilisation conjointe de SMAP et ASCAT. Les résultats obtenus pour les zones d'El Affroun et de Mouzaia montrent une amélioration significative par rapport aux études antérieures en Algérie. L'utilisation combinée des données in situ et satellitaires permet d'obtenir des estimations plus précises de l'humidité du sol.

### **III.3.3.Limites de l'étude**

L'analyse de corrélation entre les données in situ et satellitaires pour l'estimation de l'humidité du sol présente plusieurs limites qui peuvent affecter la validité et la généralisation des résultats.

La faible densité des réseaux de mesures in situ peut poser un problème majeur. Dans certaines études, comme celles menées en Afrique de l'Ouest, il a été noté que seulement quelques sites de mesure sont disponibles, ce qui limite la représentativité des données collectées. Une couverture plus dense serait nécessaire pour obtenir des estimations plus précises et fiables.

Les estimations fournies par certains capteurs, comme SMOS, SMAP, se limitent souvent à des profondeurs superficielles (0-5 cm). Cela peut ne pas refléter fidèlement l'humidité du sol à des profondeurs plus importantes où les racines des plantes se développent, ce qui est crucial pour l'agriculture et la gestion des ressources en eau.

Les modèles utilisés pour estimer l'humidité du sol reposent souvent sur des forçages de précipitation en temps réel, qui peuvent comporter des incertitudes significatives. Ces incertitudes peuvent affecter la précision des estimations d'humidité et, par conséquent, les résultats globaux de l'étude.

La variabilité spatiale et temporelle de l'humidité du sol peut également influencer les résultats. Les conditions climatiques changeantes, telles que les variations de température et de précipitations, ainsi que les différences dans les types de sol et la couverture végétale, peuvent rendre difficile une estimation précise.

Les méthodes basées sur la télédétection présentent leurs propres limitations, notamment en termes de résolution spatiale et temporelle. Par exemple, la résolution spatiale des satellites tels que SMAP peut induire des biais si les mesures ne sont pas suffisamment représentatives de la zone d'intérêt.

Ces limites soulignent la nécessité d'améliorer les méthodologies utilisées pour estimer l'humidité du sol en intégrant davantage de données in situ, en élargissant la profondeur d'échantillonnage et en utilisant des modèles météorologiques plus robustes. Des approches innovantes pourraient également inclure l'utilisation de capteurs supplémentaires et le développement de méthodes d'assimilation pour améliorer la précision globale des estimations d'humidité du sol.

### **III.3.4. Perspectives de recherche future**

Les résultats ouvrent la voie à des études futures sur d'autres méthodes d'estimation et l'évaluation de nouveaux capteurs satellitaires. Des recherches pourraient aussi se concentrer sur l'impact des conditions climatiques changeantes sur les performances des modèles.

## Conclusion

D'après les analyses des données les résultats montrent que SMAP, bien qu'il ait un pouvoir explicatif moindre qu'ASCAT, fournit des estimations d'humidité du sol plus précises. Cette précision, mesurée par des indicateurs tels que l'EQM et l'EAM, souligne la valeur de SMAP pour des applications nécessitant des prédictions fiables. D'autre part, ASCAT, avec sa capacité explicative plus large, pourrait être préféré pour des analyses où la compréhension des variations est essentielle. Ces résultats offrent des perspectives précieuses pour l'utilisation stratégique des données satellitaires dans le suivi de l'humidité du sol, en fonction des objectifs spécifiques des études.

**Conclusion générale**

## Conclusion générale

L'humidité du sol est un indicateur clé pour la santé des plantes, la durabilité des pratiques agricoles et la préservation des écosystèmes. Les agriculteurs doivent donc surveiller attentivement ce paramètre pour optimiser leur production tout en préservant les ressources en eau. À cet égard, la mesure in situ de l'humidité du sol est essentielle pour une gestion efficace de l'eau et pour comprendre les interactions complexes entre le sol, l'eau et le climat.

Dans cette optique, la mesure de l'humidité du sol par satellites représente une avancée majeure. Des missions telles que SMOS, SMAP et ASCAT permettent d'obtenir des données précises sur l'état du sol à des échelles régionales et mondiales. Ces informations sont cruciales pour soutenir une agriculture durable, gérer efficacement les ressources en eau et faire face aux défis du changement climatique.

La plaine de la Mitidja en Algérie, avec ses caractéristiques géographiques favorables et son climat méditerranéen, est un exemple de région agricole clé. Sa diversité de sols et son accès à l'eau en font un lieu propice à l'agriculture, notamment pour les cultures arboricoles et maraîchères. Cependant, la variabilité climatique pose des défis à la gestion durable des ressources en eau dans cette région.

Pour obtenir une vision détaillée des dynamiques d'humidité du sol, la collecte de données combinant mesures in situ et satellitaires est indispensable. Les méthodes d'analyse statistique, telles que l'analyse de corrélation et la régression linéaire, jouent un rôle crucial dans l'évaluation des relations entre ces deux ensembles de données. L'analyse de corrélation permet d'évaluer la force et la direction de cette relation, tandis que la régression linéaire aide à modéliser et à prédire les valeurs d'humidité du sol. Des mesures d'erreur, telles que l'erreur quadratique moyenne et l'erreur absolue moyenne, quantifient la précision des prévisions, fournissant des outils pour évaluer la performance des modèles.

Les résultats de l'analyse montrent que, bien que SMAP ait un pouvoir explicatif inférieur à celui d'ASCAT, il offre des estimations plus précises de l'humidité du sol, tant en termes de capacité explicative ( $R^2$ ) que d'erreurs (EQM et EAM). Les coefficients de corrélation élevés pour les deux satellites renforcent la confiance dans l'utilisation des données satellitaires pour l'estimation de l'humidité du sol. Cela suggère que SMAP pourrait être particulièrement utile pour des applications nécessitant des prédictions précises, tandis qu'ASCAT serait plus adapté pour des analyses plus larges. Ces résultats sont essentiels pour guider les décisions relatives à l'utilisation des données satellitaires dans le suivi de l'humidité du sol, contribuant ainsi à une gestion plus efficace des ressources en eau et à la durabilité agricole dans des régions comme la plaine de la Mitidja.

Cette recherche a permis de comparer les performances de deux missions satellitaires, SMAP et ASCAT, en ce qui concerne l'estimation de l'humidité du sol. Les résultats montrent que, bien que SMAP ait un pouvoir explicatif inférieur à celui d'ASCAT, il fournit des estimations plus précises, ce qui est crucial pour des applications nécessitant une grande exactitude.

Les coefficients de corrélation élevés observés pour les deux satellites renforcent la validité des données satellitaires dans l'estimation de l'humidité du sol. Cela contribue à établir une base solide pour l'utilisation de ces données dans des études environnementales et agricoles.

Les résultats offrent des indications précieuses sur le choix des satellites en fonction des besoins spécifiques. Par exemple, SMAP pourrait être privilégié pour des applications nécessitant des prédictions précises, tandis qu'ASCAT pourrait être utilisé pour des analyses plus larges.



Bien que les données satellitaires ne remplacent pas complètement les mesures in situ, elles peuvent les compléter de manière significative, offrant une solution fiable pour surveiller l'humidité du sol dans la plaine de la Mitidja, tout en répondant aux défis posés par le changement climatique et la pression sur les ressources en eau.

Il est recommandé d'utiliser SMAP pour les applications qui nécessitent une précision accrue, comme la gestion agricole et la prévision des sécheresses. ASCAT, avec sa capacité explicative plus large, pourrait être utilisé dans des contextes où une vue d'ensemble est nécessaire, comme les études climatiques à grande échelle.

Pour améliorer encore la précision des estimations d'humidité du sol, il serait bénéfique d'intégrer les données provenant de plusieurs missions satellitaires et de capteurs in situ. Cela permettrait de compenser les limitations individuelles de chaque satellite.

Il est conseillé de poursuivre les recherches sur les méthodes d'estimation de l'humidité du sol, en explorant notamment l'utilisation de nouveaux capteurs et technologies émergentes qui pourraient améliorer la résolution et la précision des données.

Pour maximiser l'utilisation des données satellitaires dans le secteur agricole et environnemental, il est recommandé d'organiser des sessions de formation pour les praticiens afin qu'ils comprennent comment interpréter et utiliser ces données efficacement.

***Références  
bibliographiques***

## Références bibliographiques

- Dancette, C. (1975). "Cartes d'adaptation à la saison des pluies des mils à cycle court, dans la moitié nord du Sénégal". Institut Sénégalais de Recherches Agricoles (ISRA).
- Topp et al. (1980). "Electromagnetic determination of soil water content: Measurements in coaxial transmission lines." *Soil Science Society of America Journal*, 44(3), 491-495.
- Bear, J. (1987). "Dynamics of Fluids in Porous Media". New York.
- Musy, A. & Soutter, M. (1990). "Hydrologie et gestion des ressources en eau". Paris : Éditions Eyrolles.
- Ambroise, B. (1999). "A model for overland flow generation investigating roughness effects". AGU spring meeting, USA.
- Wagner et al. (1999). "A method for estimating soil moisture from ERS scatterometer and soil data". *Remote Sensing of Environment*, 70, 191-207.
- Drusch et al. (2001). "Vegetation and atmospheric corrections for soil moisture retrieval from passive microwave data". *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 39(8), 1760-1770.
- Haider, SS. (2004). "Estimation de l'humidité du sol à partir des données ERS-2SAR". Thèse de doctorat, Wageningen University.
- Calvet, J. (2005). "L'humidité du sol : un facteur clé de la variabilité climatique". In : *Les enjeux de l'eau en France* (pp. 45-60). Paris : Éditions Quae.
- Goutorbe et al. (2005). "L'humidité du sol influence directement la productivité des cultures et la disponibilité de l'eau dans les systèmes terrestres". Dans *Les systèmes de culture en zone subhumide* (pp. 123-145). IRD Éditions.
- Maria José Escorihuela. (2006). "Estimation de l'humidité du sol à partir de données radiométriques en bande-L : préparation de la mission SMOS". Thèse, HAL.
- Garcia-Sanchez et al. (2011). "Utilisation de capteurs capacitifs pour mesurer l'humidité dans des sols caillouteux : résultats d'étalonnage sur quatre ans". *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 11(4), 123-135.
- GET (2012). "Utilisation des capteurs radar pour mesurer l'humidité du sol".
- Marshall, T.J., Holmes, L., & Rose, C.W. (2012). "Soil Physics". New York: Springer.
- Steeve Pepin (2012). "Évapotranspiration et gestion de l'irrigation".
- Jayantha et al. (2014). "Soil moisture monitoring at the field scale using neutron probe". *Canadian Geotechnical Journal*, 51(3), 332-345.
- Kirkham, M.B. (2014). "Soil Water and Plant Growth". New York: Academic Press.
- Zerouati, F. (2014). "L'approche détection des changements pour estimer l'humidité du sol en milieu semi-aride à partir des images ASAR. Cas des hautes plaines de l'Est de l'Algérie". *Revue Française de Photogrammétrie et de Télédétection*, 210, 42-50.
- Balesdent et al. (2015). "Stocker du carbone dans les sols français : quel potentiel au regard des pratiques agricoles ?" INRA.
- Bastien Combemale (2016). "La notion du point de flétrissement permanent dans la réserve utile. Un concept bien établi ?" Mémoire de Master, AgroParisTech, Montpellier.
- McCabe et al. (2016). "The role of satellite observations in estimating soil moisture: A review of the current state and future directions". *Remote Sensing of Environment*, 176, 1-14.
- Thiébeau, P., & Bertrand, C. (2016). "Dynamique du sol et interactions avec le climat : Rôle des capteurs d'humidité".
- Bouréma, A. (2017). "Humidité relative du sol et disponibilité en eau pour les plantes".
- Bencherif et al. (2018). "La plaine de la Mitidja : un bassin agricole clé en Algérie". Dans *Agriculture et développement durable en Algérie* (pp. 45-60). Éditions Universitaires.
- Giraud, D., & Moreau, L. (2018). "Changements climatiques et cycles hydrologiques : Évaluation des impacts de l'humidité du sol".

- Toumi et al. (2018). "Estimation de l'humidité du sol à partir de données satellitaires et in situ dans une région semi-aride". *Revue des Sciences de l'Eau*, 31(2), 123-135.
- Aroua et al. (2019). "Inventaire des cochenilles des agrumes (Clémentinier et Oranger) dans la Mitidja(Algérie)".*ResearchGate*.
- Hssaisoune.M(2019). "Infiltration et recharge des aquifères".
- Martin, P., & Lefebvre, C. (2019). "Agriculture de précision : Optimisation des pratiques culturales par la mesure de l'humidité du sol".
- Meyer et al. (2019)." Les méthodes traditionnelles de mesure de l'humidité du sol sont souvent coûteuses et laborieuses, rendant difficile une évaluation à grande échelle". Dans *Techniques modernes de mesure de l'humidité du sol* (pp. 75-90). Éditions Agronomiques.
- Rahmani et al. (2019)." Combining satellite and ground sensor data to monitor soil moisture in Sahelian regions: Identifying trends related to desertification and proposing reforestation actions". *Remote Sensing*, 11(12), 1456.
- Zhao et al. (2019)" Coupling hydrological models with remote sensing data for real-time estimations in various river basins". *Remote Sensing*, 11(8), 1234.
- Bouarfa et al. (2020)." Development of a hydrological model to assess soil moisture in agricultural plains: Optimizing irrigation needs". *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 25, e50.
- Boucher, A. (2020). " L'humidité du sol et le cycle des nutriments".
- Dupont, J. (2020). " L'importance de l'humidité du sol dans la gestion de l'irrigation".
- Gaudu et al. (2020). "Mesure de l'humidité des sols par une méthode capacitive : analyse des facteurs influençant la mesure."HAL.
- Martínez et al. (2020)." Innovative approach using InSAR for large-scale soil moisture estimation with a focus on agricultural areas". *Remote Sensing of Environment*, 236, 111-123.
- Bernard, R. (2021). "Modèles hydrologiques et dynamique de l'eau dans le sol".
- Fournier, R., & Petit, S. (2021). "Optimisation des apports en fertilisants grâce à la mesure de l'humidité du sol".
- Gupta et al. (2021)." Disruptions in classical models due to climate change: Adjusting forecasts for extreme conditions". *Climate Dynamics*, 57(3), 1234-1250.
- Zeddour et al. (2021)." Application of remote sensing techniques with Sentinel-2 satellites to estimate soil moisture in arid regions: Validation with in-situ measurements". *Remote Sensing of Environment*, 256, 112-123.
- GLOBE-SWISS (2022). " L'importance de l'humidité du sol pour les écosystèmes et l'agriculture durable".
- Khelifa et al. (2022)." Impact of climate change on soil moisture in Saharan areas: Modeling the decrease of water reserves and proposing sustainable management solutions". *Journal of Arid Environments*, 189, 104-115.
- Lemoine, J. (2022). " Mesurer l'humidité du sol pour évaluer la qualité du sol".
- Li et al. (2022)." Application of machine learning for regional soil moisture prediction: Significant improvement over traditional models". *Hydrology and Earth System Sciences*, 28(3), 917-935.
- Amokrane et al. (2023)." Analyse de la sensibilité des données TerraSAR-X à l'humidité des sols de la plaine du Bas-Chélif-Algérie". *Revue Française de Photogrammétrie et de Télédétection*, 210, 38-50.
- Benali et al. (2023)." Real-time moisture sensors in the Mitidja region for optimizing irrigation: Reducing water consumption while enhancing agricultural yields". *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 149(4), 123-135.
- EOSDA (2023)." Capteurs optiques et leur rôle dans l'agriculture de précision".
- EUMETSAT (2023). "ASCAT - Advanced Scatterometer".

- Gerbeaud (2023). "Changement climatique et gestion de l'humidité du sol : Vers une agriculture durable".
- Mettler Toledo (2023). " Thermobalances pour l'analyse de la teneur en humidité et l'extrait sec".
- Roux, P., & Simon, T. (2023). " Capteurs modernes pour une gestion durable des terres".
- Smith et al. (2023). " Combining satellite and ground sensor data with artificial intelligence algorithms to enhance soil moisture estimation in arid regions". *Remote Sensing*, 15(4), 123-145.
- Tilhac, J. (2023). " L'impact de l'humidité du sol sur les écosystèmes agricoles et naturels". *Journal of Environmental Management*, 300, 112-124.
- Agriculture et Agroalimentaire Canada (2024). " SMAP : Suivi de l'humidité du sol".
- Maman Bachar Ibrahima Oumarou et al. (2024). " Analysis of soil moisture variations using geophysical methods: Significant differences between dry and wet seasons". *Journal of Hydrology*, 600, 123-135.