



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Echahid Hamma Lakhdar D'El-Oued

Faculté de Technologie

Département d'Hydraulique et de Génie Civil



MEMOIRE

Présenté en vue de l'obtention du diplôme du Master en Hydraulique

Option : Ouvrage Hydraulique

THEME :

**Contribution à l'étude expérimentale d'humidité de sol
dans l'irrigation par planches sous les conditions
arides
(Cas d'Ouargla)**

Encadreur:

MEGUELLATI Soumia

Co-encadreur:

Berakbia Mohamed

Présenté par :

- *Ben amor Abdelatif*
- *Gharmouli Khaldi*
- *Haded Kamal*

Soutenu devant le jury composé de :

President: Ghomri Ali

Examineur: Riguet Ferhat

Encadreur: Meguellati Soumia

Professeur

Maître de conférence B

Maître Assistant A

Université d'El-Oued

Université d'El-Oued

Université d'El-Oued

Promotion : Septembre 2022

Remerciement

Avant tout nous remercions notre Dieu, le tout puissant de nos avoir accordé la force, le courage et la volonté pour mener à terme ce travail.

Nous profitons cette occasion pour tenir à exprimer nos vifs remerciements à tous les personés qui nous ont aidé tout au long de notre travail.

Notre reconnaissance va plus particulièrement à :

Notre promoteur **M^{me} Meguellati Soumia**, de nos avoir proposé et dirigé et contribuer à l'élaboration de cette mémoire.

Nous adressons également notre remerciement aux membres du jury de mémoire, qui ont accepté d'évaluer notre travail.

A tout le corps enseignant de l'Université Echahid Hamma Lakhdar - El Oued, particulièrement ceux du département d'Hydraulique et Génie Civil.

Nous voudrions exprimer notre gratitude aux tous les agents de la station expérimentale INRAA de Sidi Mahdi, à Touggourt, affiliée à l'Institut national d'agronomie, surtout **Mr Berakbia Mohamed** et **Mr Geryani Sofiane**.

Un grand remerciement à **Mr khachekhouche A** et **Melle Cherif Hakima** pour leur aide dans la conception du système de mesure, mille merci.

Enfin, nos remerciements vont à toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de cette modeste étude.

Dédicaces :

Je dédie cet humble travail à tous sans exception :

A ma mère et mon père A tous mes frères et sœurs A tous
les membres de ma famille A tous mes amis et camarades, A
tous Mes professeurs et enseignants qui me passaient dans
ma carrière pédagogique.

ABDELATIF , KHALDI, KAMAL

Résume :

Le but de cette contribution est d'étudier l'humidité du sol en terre ou en irrigation par planche sous une circonférence sèche afin de contrôler et de surveiller l'humidité de la terre, ce qui améliore et détermine les besoins en eau de la plante, ce qui se traduit par une activité végétale accrue, rendements abondants, haute qualité et de nombreux autres avantages.

Mots-clés : humidité du sol, irrigation par planche, conditions sèches.

ملخص :

الهدف من هذه المساهمة هو دراسة رطوبة التربة في التربة أو الري الخشبي تحت محيط جاف من أجل التحكم في رطوبة التربة ومراقبتها ، مما يحسن ويحدد الاحتياجات المائية للنبات ، مما يؤدي إلى زيادة نشاط النبات ، ووفرة الغلات ، والجودة العالية و العديد من الفوائد الأخرى.

الكلمات المفتاحية: رطوبة التربة ، رى الألواح ، الظروف الجافة.

Abstract :

The purpose of this contribution is to study soil moisture in soil or board irrigation under dry girth in order to control and monitor soil moisture, which improves and determines the water requirements of the plant, resulting in increased plant activity, abundant yields, high quality and many other benefits.

Keywords: soil moisture, board irrigation, dry conditions.

Sommaire

RESUME
INTRODUCTION GENERALE	1
Chapitre I : Les systèmes d'irrigation	3
1.1. Classification des Systèmes d'irrigation	4
I.1.1. L'irrigation de surface	4
I.1.1.1. Irrigation par planches	5
I.1.1.2. L'irrigation par bassin	9
I.1.1.3. L'irrigation à la raie	9
I.1.2. L'irrigation goutte à goutte	9
I.1.3. Irrigation par aspersion	9
I.2. Comment choisir les méthodes d'irrigation appropriées	10
I.3. La meilleure méthode d'irrigation	11
I.4. Avantages de l'eau d'irrigation	11
Chapitre II : Description générale de la région d'étude, et présentation du site expérimental.	13
II.1. Présentation de la région d'étude	14
II.2. Le relief	15

II.3. Climat	16
II.3.1. Pluviométrie	16
II.3.2. Températures	17
II.3.3. Diagramme Ombrothermique	18
II.3.4. Humidité relative de l'air	19
II.4. Ressources hydriques	19
II.4.1. Continental Intercalaire	19
II.4.2. Complexe terminal	19
II.4.3. Le Miopliocène	19
II.4.4. Le sénonien	19
II.5. Présentation du site expérimental	20
II.5.1. Les caractéristiques physiques de la station	20
Chapitre III : Conception et réalisation du système de mesure de l'humidité du sol.	22
III.1. L'humidité du sol	23
III.2. Classification l'humidité du sol :	24
III.2.1. L'humidité à capacité au champ (HCC)	24
III.2.2. L'humidité du point de saturation (HPS) :	24
III.2.3. L'humidité au point de flétrissement (HPF)	24

III.2.4. L'humidité équivalente (Héq)	24
III.3. Méthodes de mesure de l'humidité du sol	24
III.3.1. Mesures indirectes de l'humidité de sol	25
III.3.2. Mesures directes de l'humidité de sol	25
III.4. Présentation du système de mesure de l'humidité du sol	25
III.5. Les outils matériels, description de chaque composant	26
III.5.1. L'Arduino UNO	26
III.5.2. Capteur d'humidité et température DHT22	28
III.5.3. Capteur d'humidité de sol (Soil Moisture Sensor)	28
III.5.4. Module de carte SD	30
III.5.5. Les câbles	31
III.6. Logiciels utilisés	33
III.6.1. Structure générale du programme	33
III.7. Conception et réalisation de tout le système avec Arduino UNO	34
III.7.1. Le schéma de câblage (Circuit du branchement)	34
III.7.2. Le schéma final	36
III.7.3 Principe de fonctionnement	36
III.8. Les tests des différents étages de notre système	36

III.8.1. Test du capteur d'humidité du sol	36
III.8.2. Mesure de température et d'humidité	37
Chapitre IV : Résultats et discussions	39
IV. Méthode de mesure	
IV.1. Dispositif expérimental	40
IV.1.1. Mesure du débit à l'entrée de la planche	42
IV.1.2. Mesure de de l'humidité du sol le long de la planche	42
IV.2. Résultats d'expériences	43
IV.2.1. Etude de l'humidité du sol	43
IV.2.1.1. Répartition de l'humidité de la planche	43
IV.2.1.2. L'avancement de l'eau	47
IV.2.2. Etude de l'humidité d'air et de la température	47
Conclusion générale	52
Références Bibliographiques	54
ANNEXE A	57
ANNEXE B	63

Liste des tableaux

Tableau n° I.1 : Ordres de grandeur des longueurs et des largeurs maximums des planches	6
Tableau n° II.1 : Les données climatiques de la région de Ouargla (1991-2021)	16

Liste des figures

Figure n°I.1 : Différentes méthodes d'irrigation pratiquées (AZOUGAGH, 2001)	4
Figure n° I.2 : Faible courant d'eau	8
Figure n° I.3 : Courant d'eau à fort débit	8
Figure n°II.1 : Situation de la wilaya de Ouargla (Salhi Abdelkader 2017)	15
Figure n° II.2 : Courbe de température moyenne mensuelle interannuelle (1991-2021)	17
Figure n° II.3 : Courbe des heures d'ensoleillement (1991-2021)	18
Figure n° II.4 : Diagramme Ombrothermique (1991-2021)	18
Figure n° III.1 : Architecture de la carte Arduino UNO	26
Figure n° III.2 : Carte Arduino UNO	27
Figure n° III.3 : Capteur d'humidité de l'air et de température DHT22	28
Figure n° III.4 : Capteur d'humidité de sol	29
Figure n° III.5 : La carte LM393 IC	30

Figure n° III.6 : Capteur d'humidité	30
Figure n° III.7 : Module de carte SD	31
Figure n° III.8 : Câble alimentation USB pour Arduino	32
Figure n° III.9 : Câble connecteurs mâle/mâle et mâle/femelle	32
Figure n° III.10 : Interface IDE Arduino	34
Figure n° III.11 : Schéma de câblage final de notre système avec l'Arduino UNO	35
Figure n° III.12 : Le schéma final de système de mesure	36
Figure n° III.13 : Test des 6 capteurs d'humidité du sol et test du capteur DHT22	37
Figure n° VI.1 : Le dispositif expérimental	41
Figure n° VI.2 : Humidité du sol (%) le long de planche (Planche n°1)	44
Figure n° VI.3 : Humidité du sol (%) le long de planche (Planche n°2)	45
Figure n° VI.4 : Humidité du sol (%) le long de planche (Planche n°3)	46
Figure n° IV.5 : Avancement de l'eau dans la planche n°1 pour les 4 expériences	48
Figure n° IV.6 : Avancement de l'eau dans la planche n°2 pour les 4 expériences	49
Figure n° IV.7 : Avancement de l'eau dans la planche n°3 pour les 4 expériences	50

Liste des Photos

Photo n° I.1 : Irrigation par planche	5
Photo n° 2 : Expérience n°1	63
Photo n° 3 : Expérience n°2	64
Photo n° 4 : Expérience n°3	65
Photo n° 5 : Expérience n°4	66

Introduction générale

Introduction Générale

L'eau est un facteur de production essentiel en agriculture, la bonne gestion de cette ressource naturelle est indispensable et demande plus d'attention qu'en avant. La disponibilité de l'eau pour l'irrigation constitue l'une des principales conditions de l'amélioration de la production car les zones qui irriguent de plus sont les plus productives par rapport aux zones non irriguées.

L'agriculture présente l'un des principaux piliers sur lesquels se fonde le développement économique de tout pays, de ce fait l'Algérie se rend compte de son importance mettant en œuvre des politiques et programmes de son développement, ces programmes tiennent compte du financement d'investissement, d'aides et de subvention offertes aux agriculteurs et la mise en place de toutes les techniques modernes afin d'en tirer les meilleurs rendements possibles.

L'agriculture dans les régions désertiques qui sont de gros consommateurs d'eau, pourrait être sérieusement menacée, en particulier autour des grandes villes, si elles ne font pas le nécessaire pour se raréfier comme le permettent les technologies d'irrigation.

Dans le domaine de l'irrigation la solution consiste à identifier les futurs projets en adoptant les techniques et les procédés d'arrosage qui utilisent d'une façon rationnelle et efficace les volumes d'eau réservés, et le développement des systèmes d'irrigation et l'innovation dans les techniques ont permis d'économiser de grandes quantités d'eau et d'accroître les superficies pour une même quantité d'eau mobilisée.

Notre étude porte sur l'irrigation de surface, plus précisément l'irrigation par planche et l'objectif est de mesurer l'humidité de sol le long de la planche sous les conditions arides (en fonction du débit d'entrée Q , longueur de la planche L , la pente du fond de la planche et le temps d'irrigation), on s'est appuyé sur les résultats des études déjà faites et qui traitent la même problématique.

Pour bien mener cette recherche, nous avons réparti notre travail en quatre chapitres comme suit:

- Chapitre I : Les systèmes d'irrigation.
- Chapitre II : Description générale de la région d'étude, et présentation du site expérimental.
- Chapitre III : Conception et réalisation du système de mesure de l'humidité du sol.
- Chapitre IV : Résultats et discussions.

Chapitre I

Les systèmes d'irrigation

Introduction:

L'irrigation est l'opération qui consiste à apporter artificiellement de l'eau à des végétaux cultivés pour en augmenter la production, et permettre leur développement normal en cas de déficit d'eau induit par un déficit pluviométrique, un drainage excessif ou une baisse de la nappe, en particulier dans les zones arides (Azougagh, 2001).

Les différents systèmes d'irrigation nécessitent des matériaux bien connus, pratiqués aux champs avec des méthodes adaptées. En effet, chacune de ces méthodes présente des avantages et des inconvénients. Il existe plusieurs systèmes d'irrigation (Azougagh, 2001).

1.1. Classification des Systèmes d'irrigation :

Les systèmes d'irrigation peuvent être classés en deux grandes catégories (Figure n°I.1) ; L'irrigation de surface et l'irrigation sous pression. Cette dernière est classée en deux types l'irrigation goutte à goutte et l'irrigation par aspersion (Azougagh, 2001).

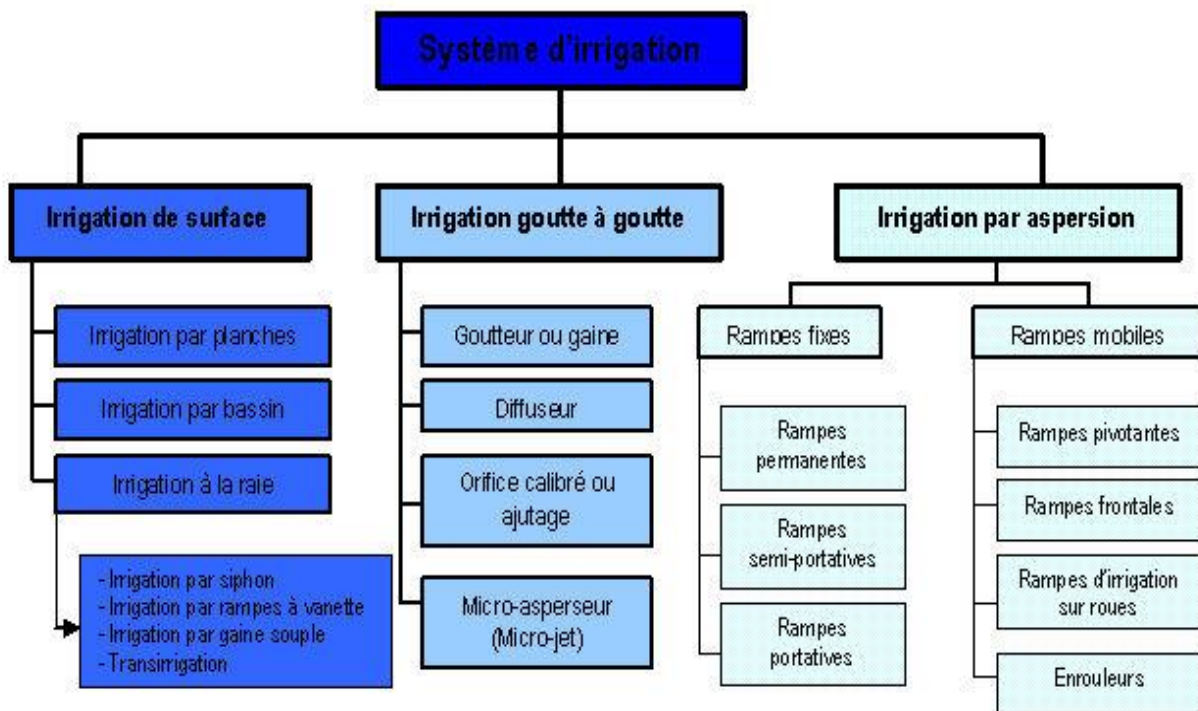


Figure n°I.1 : Différentes méthodes d'irrigation pratiquées (Azougagh, 2001).

I.1.1. L'irrigation de surface :

La technique de l'irrigation de surface consiste à arroser les cultures en faisant ruisseler l'eau à la surface du sol. C'était la seule méthode possible jusqu'au milieu du 20^{ème} siècle. Dans la grande majorité des cas, le transport de l'eau se fait par canaux fonctionnant à surface libre. (Berkaoui N et all)

I.1.1.1. Irrigation par planches :

L'irrigation par planche consiste à faire couler une mince couche d'eau sur un sol incliné de 0,2 à 3%. Le débit à déverser est fonction de la pente, de la largeur et de la longueur de la planche. Cette méthode est de loin la plus difficile car il faut ajuster le débit d'irrigation de chaque planche avec toutes les autres variables. Ce système est l'objet de notre étude. (FAO 1990)

Les planches sont généralement des bandes de terre assez longues, à pente uniforme, et séparées par des diguettes. Contrairement à l'irrigation par bassins, les diguettes ne sont pas conçues pour former une cuvette pour contenir les eaux, mais pour guider les filets d'eau dans leur ruissellement à travers la planche (Photo n° I.1).



Photo n° I.1 : Irrigation par planche

→ Conditions d'utilisation :

L'irrigation par planches est recommandée pour les exploitations de grande taille, où les travaux agricoles sont mécanisés. En effet, une exploitation aménagée en planches de grande longueur offrirait de longues périodes d'utilisation ininterrompue des machines agricoles. Les planches peuvent atteindre 800 m de longueur, la largeur varie de 3 à 30 m. Les dimensions définitives des planches dépendent de plusieurs facteurs. Cette méthode d'irrigation n'est pas pratique dans le cas des petites exploitations où les travaux agricoles sont faits à l'aide de la main-d'œuvre, ou bien par traction animale (FAO 1990).

- **Pentes adéquates :**

La pente des planches doit être uniforme, avec un minimum de 0,05 % pour faciliter le drainage, et un maximum de 2 % pour éviter l'érosion.

- **Types du sol approprié :**

Les sols appropriés à ce mode d'irrigation sont les sols profonds limoneux et argileux, à taux d'infiltration moyen. Cette technique n'est pas recommandée pour les sols argileux lourds, où l'infiltration des eaux est assez lente. Dans ce dernier cas, l'irrigation par bassins est préférable.

- **Cultures recommandées :**

Cette méthode convient particulièrement à l'irrigation de la luzerne, des céréales et des pâturages.

➔ **Aménagement des planches :**

Les dimensions et la forme des planches sont fonction du type du sol, du débit du courant d'eau, de la pente du terrain, de la dose d'arrosage et d'un certain nombre de facteurs tels que les pratiques culturales et la taille de l'exploitation. Toutes les considérations présentées à propos de l'irrigation par bassins et par sillons sont généralement applicables à l'irrigation par planches. Pour cela on ne va pas les reprendre dans ce chapitre. Le tableau n° I.1 donne une idée générale des dimensions les plus pratiques des planches. Cependant, il est à noter que les valeurs indiquées dans le tableau sont des ordres de grandeur plutôt que des valeurs strictes. En effet, ce sont des valeurs empiriques qui n'ont pas la rigueur des valeurs calculées à partir des relations scientifiques (FAO 1990).

Tableau n° I.1 : Ordres de grandeur des longueurs et des largeurs maximums des planches

Type du sol	Pente de la planche (%)	Débit unitaire par mètre de largeur U/s)	Largeur de la planche (m)	Longueur de la planche (m)
SABLE	0.2-0.4	10-15	12-30	60-90
Taux d'infiltration supérieur à 25 mm/h	0.4-0.6 0.6-1.0	8-10 5-8	9-12 6-9	60-90 75
LIMON	0.2-0.4	5-7	12-30	90-250
Taux d'infiltration de 10 à 25 mm/h	0.4-0.6 0.6-1.0	4-6 2-4	6-12 6	90-180 90
ARGILE	0.2-0.4	3-4	12-30	180-300
Taux d'infiltration inférieur à 10 mm/h	0.4-0.6 0.6-1.0	2-3 1-2	6-12 6	90-180 90 I

Note : Le débit est donné par mètre linéaire de largeur de la planche. Par conséquent, le débit total s'obtient en multipliant le débit unitaire par la largeur de la planche exprimée en mètres.

→ **Mise en eau des planches :**

La mise en eau des planches consiste à introduire un courant d'eau à partir du canal d'amenée, à l'extrémité supérieure de celles-ci. L'eau ruisselle en descendant la pente de la planche. Une fois le volume d'eau nécessaire introduit dans la planche, le courant d'eau est arrêté. La fermeture de la prise peut bien avoir lieu avant l'arrivée du front d'eau à l'extrémité aval de la planche. Il n'y a pas de règles précises qui dictent cette décision. Cependant, si le débit d'eau est arrêté plus tôt que nécessaire, on risque une couverture incomplète de la planche, et l'eau n'atteindra pas l'extrémité aval de celle-ci. Par contre si le débit d'eau est arrêté plus tard que nécessaire, on aura un débit sortant à l'extrémité de la planche, et l'eau sera perdue dans le réseau de drainage. Comme ordre de grandeur, la fermeture de la prise d'eau doit intervenir, suivant les cas, comme suit :

- En sol argileux, le courant d'eau est arrêté quand l'eau couvre 60 % de la planche. Par exemple, si la longueur de la planche est de 100 m, un jalon sera placé à 60 m de l'amont. Quand l'eau atteint le jalon, la prise d'eau est fermée.
- En sol limoneux, le débit d'eau est arrêté quand l'eau couvre 70 à 80 % de la planche.
- En sol sableux, la fermeture de la prise d'eau intervient uniquement quand l'eau couvre la totalité de la planche.

Comme on vient de le dire, ce sont des directives. Les règles définitives sont arrêtées cas par cas, et après avoir testé leur validité (FAO 1990).

✓ **Profils d'humectation :**

Comme c'est le cas avec les autres méthodes d'irrigation, il est important de veiller à ce que la quantité d'eau nécessaire soit fournie à la planche, pour que l'humidification de la zone racinaire soit uniforme. Cependant, il faut noter que certaines erreurs courantes sont à l'origine d'une mauvaise distribution d'eau (FAO 1990).

a- Courant d'eau inadéquat :

Un courant d'eau à faible débit sera perdu par percolation profonde au voisinage immédiat du canal d'amenée (Figure n° I.2), spécialement en sol sableux.

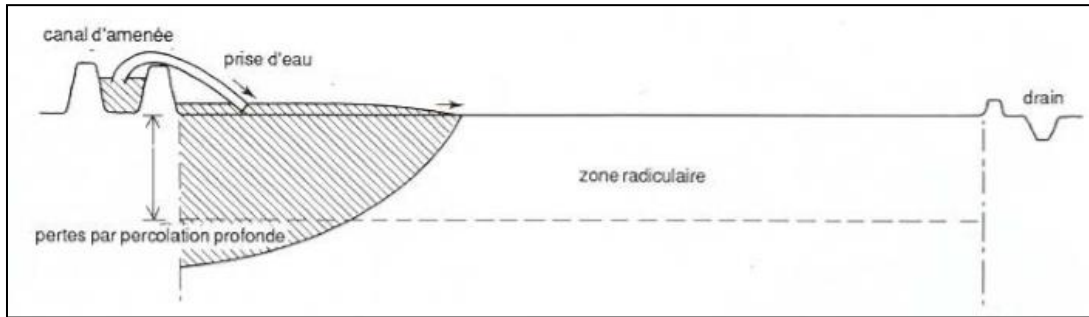


Figure n° I.2 : Faible courant d'eau

b- Le courant d'eau est à fort débit :

L'eau ruisselle rapidement et atteint le point qui marque la fermeture de la prise avant qu'une quantité suffisante d'eau soit introduite pour humidifier la zone racinaire (Figure n° I.3). Dans ce cas, la prise doit rester ouverte jusqu'à ce que l'humidification de la zone racinaire soit adéquate. Il va en résulter des pertes d'eau par écoulement en excès, qui seront collectées dans le réseau de drainage. Les courants d'eau à forts débits peuvent provoquer l'érosion de la planche (FAO 1990).

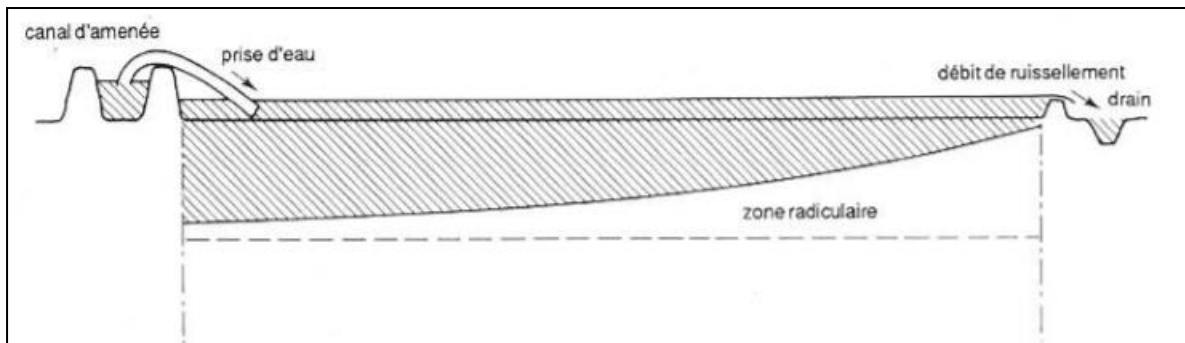


Figure n° I.3 : Courant d'eau à fort débit

c- Arrêt inopportun de l'alimentation en eau :

Si l'arrêt de l'alimentation intervient trop tôt, l'eau ne pourra pas couvrir la totalité de la planche. Par contre, si l'arrêt de l'alimentation en eau intervient trop tard, l'eau ira se déverser à l'extrémité aval, pour être perdue dans le réseau de drainage.

→ Entretien des planches :

L'entretien des planches consiste à les débarrasser des mauvaises herbes et à maintenir leur pente uniforme. Toute défection dans les diguettes doit être immédiatement réparée, les canaux et les drains doivent faire l'objet d'un curage et d'un désherbage régulier. Le contrôle régulier et l'entretien rapide peuvent garantir la sécurité des ouvrages et prévenir les dégâts importants.

L'irrigation par planche consiste à faire couler une mince couche d'eau sur un sol incliné de 0,2 à 3%. Le débit à déverser est fonction de la pente, de la largeur et de la longueur de la planche. Cette méthode est de loin la plus difficile car il faut ajuster le débit d'irrigation de chaque planche avec toutes les autres variables (FAO 1990).

I.1.1.2. L'irrigation par bassin :

L'irrigation par bassin est la plus connue dans l'irrigation gravitaire. Sa pratique sur un sol nivelé (pente 0,1 à 1%) ainsi que la simplicité de l'opération, qui consiste à remplir le bassin, font que cette technique est fréquemment utilisée, la taille des bassins est de 40 à 50 m² et cette technique est connue sous le nom "Robta". Cette dernière occasionne une perte importante de superficie, due au nombre important de cloisonnements.

I.1.1.3. L'irrigation à la raie :

L'irrigation à la raie ou par rigole convient parfaitement au sol présentant une pente comprise entre 0,2 et 3%. Les sillons sont séparés d'une distance variante entre 0,6 et 1,25 m, selon le type de sol et la culture. Suivant le débit dont on dispose, on peut irriguer un ou plusieurs sillons à la fois. Les raies peuvent être parallèles ou perpendiculaires à la rigole permanente d'amenée d'eau.

I.1.2. L'irrigation goutte à goutte :

Dans l'irrigation goutte à goutte, l'eau est livrée à la plante à faible dose entraînant ainsi l'humidification d'une fraction du sol. Ceci permet de limiter les pertes par évaporation et percolation. Elle permet aussi de réduire le développement des mauvaises herbes Elle met également en œuvre des équipements fixes et légers.

I.1.3. Irrigation par aspersion :

L'irrigation par aspersion est recommandée dans les cas suivants :

- Sols de faible profondeur, ne pouvant être correctement nivelés pour une irrigation de surface, tout en conservant une profondeur suffisante.
- Sols trop perméables, qui ne permettent pas une répartition uniforme de l'eau dans le cadre d'une irrigation avec ruissellement en surface.

- Terrains à pente irrégulière avec micro relief accidenté, ne permettant pas l'établissement d'une desserte gravitaire à surface libre.

I.2. Comment choisir les méthodes d'irrigation appropriées :

Le choix d'une méthode d'irrigation est déterminé en fonction d'un certain nombre de facteurs, à savoir :

- **Les conditions naturelles :**

- Le type de sol,
- La pente,
- Le climat,
- La disponibilité de l'eau,
- La qualité de l'eau

- **Les cultures :**

L'irrigation de surface s'applique à toutes les cultures. Les méthodes d'irrigation par aspersion et au goutte à goutte, du fait des coûts d'investissement importants, sont principalement adoptées pour l'irrigation des cultures à haute valeur financière telles que les légumes et les arbres fruitiers.

Elles sont rarement utilisées pour les cultures de base à faible valeur financière. L'irrigation au goutte à goutte est très recommandée pour l'irrigation des plantations individuelles, les arbres et les cultures en lignes. Elle n'est pas utilisée pour l'irrigation des plantations denses telles que les rizières.

- **La technologie :**

Le niveau de technicité requis pour l'installation et le fonctionnement d'une méthode d'irrigation affecte sa sélection dans un cas déterminé.

Les techniques des méthodes d'irrigation par aspersion et au goutte à goutte sont plus complexes que celles de l'irrigation de surface.

- **La tradition des irrigations :**

- Le choix d'une méthode d'irrigation dépend des traditions des irrigants dans la région ou dans le pays.
- L'introduction d'une nouvelle méthode d'irrigation peut amener des difficultés inattendues.
- Généralement, les agriculteurs sont réticents à adopter les nouvelles techniques d'irrigation.
- La gestion des équipements sera aléatoire, et les frais seront trop élevés comparés aux bénéfices.

- Souvent, il est plus avantageux de réhabiliter et d'améliorer le fonctionnement d'un réseau d'irrigation traditionnel que d'introduire une nouvelle méthode d'irrigation.

- **Les besoins en main-d'œuvre :**

- Les besoins en main-d'œuvre pour l'aménagement, le fonctionnement et l'entretien des projets d'irrigation de surface sont toujours supérieurs à ceux des projets d'irrigation par aspersion ou au goutte à goutte.

- L'irrigation de surface nécessite des travaux de préparation de terrain (nivellement) assez soignés, un entretien régulier et une bonne conduite des irrigations pour assurer le bon fonctionnement du réseau.

- En aspersion ou au goutte à goutte, les travaux de préparation du terrain sont très minimes, et les besoins en main-d'œuvre pour le fonctionnement et l'entretien des réseaux sont moins importants que pour l'irrigation de surface.

- **Les coûts et les bénéfices :**

Avant de choisir une méthode d'irrigation, il faut faire une estimation des coûts, bénéfices et avantages de chaque option.

I.3. La meilleure méthode d'irrigation :

C'est celui qui fournit à la terre de l'humidité pour la croissance des plantes sans perdre d'eau ou de sol, sécurise la culture contre les sécheresses courtes, et lave les sels présents dans le secteur du sol pour devenir en dessous de la limite critique pour obtenir la plus grande et la meilleure récolte, avec utilisation efficace de l'eau et distinction dans le rendement économique de l'unité d'eau.

En général, il est bien connu que pour être irrigué, la technologie (des méthodes d'irrigation primitives au système d'irrigation le plus moderne) doit être utilisée pour réguler l'approvisionnement des plantes avec leurs besoins en eau.

I.4. Avantages de l'eau d'irrigation :

L'eau agit comme un solvant pour les nutriments contenus dans le sol et leur transport vers les racines de la plante. Il aide l'activité des bactéries du sol, qui travaillent à analyser la nourriture dans le sol afin que la racine puisse l'absorber. Aide à maintenir la température du sol adaptée à la

croissance des plantes. Il transporte au sol et aux égouts les excès de sels et de matières nocives pour les plantes.

Conclusion :

Quelle que soit la technique d'irrigation utilisée, le but final est d'avoir une récolte de qualité supérieure et une productivité élevée. Pour cela la bonne conception du réseau, sa bonne exécution et la pratique judicieuse des irrigations sont de première importance. Les travaux d'entretien qui ont pour objet de garder l'infrastructure du réseau et les ouvrages en bon état de fonctionnement sont souvent négligés. Ce fait a toujours amené la baisse du rendement (efficience) de distribution d'eau et a conduit à la réduction du profit qu'on peut tirer des techniques d'irrigation.

Chapitre II

Description générale de la région d'étude, et présentation du site expérimental

Introduction :

Le présent chapitre présente la région d'étude la wilaya de Ouargla et le site expérimental, ou nous donnons une idée générale sur les caractéristiques de celui-ci (situation, le climat... .)

II.1. Présentation de la région d'étude :

La région de Ouargla de par sa position géographique centrale et de sa proximité avec les bassins pétroliers et gaziers s'installe progressivement comme le centre administratif, technique et industriel du territoire saharien. (Bellaoueur A, 2008)

Ainsi, Ouargla est géographiquement située au Nord du Sahara algérien, dans le domaine aride du grand désert africain.

Administrativement, la Wilaya de Ouargla est située au Sud-Est du pays dans le bas Sahara dans les limites de latitude 28°45' et 33°55' et de longitude 3° et 9° 35' couvrant un territoire de 163 230 km². Elle se situe à 128 m. d'altitude, à 190 km à l'Est de Ghardaïa, 388 km au Sud de Biskra et à 160 km au Sud-Ouest de Touggourt (Ministère de l'A T E. 2013).

Elle est limitée par la Wilaya d'El-Oued au Nord, la Wilaya d'Illizi au Sud, les Wilaya de Djelfa Biskra et Ghardaïa au Nord-Ouest et Ouest, la Wilaya de Tamanrasset au Sud-Ouest et par la Tunisie à l'Est. La Wilaya est organisée administrativement en 21 communes et 10 Daïra (Figure n°II.1).

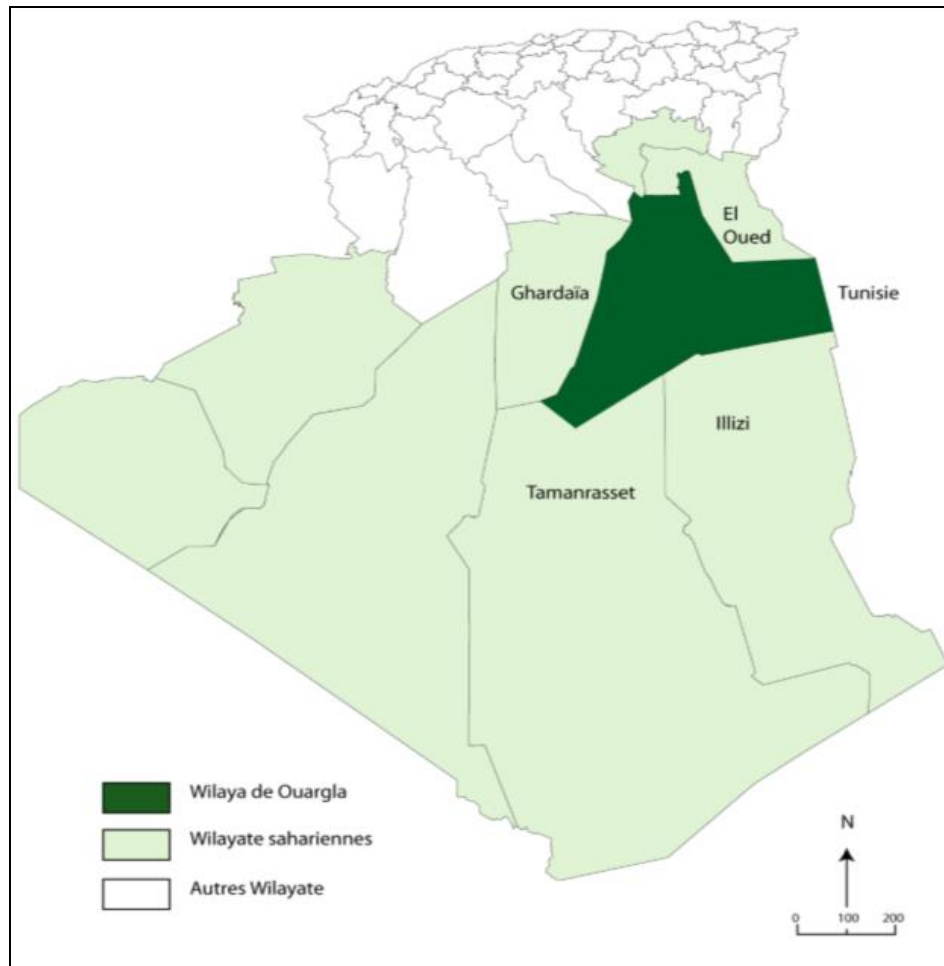


Figure n°II.1 : Situation de la wilaya de Ouargla (Salhi Abdelkader 2017)

II.2. Le relief :

Le territoire de Ouargla est situé dans l'immense bassin saharien au relief très varié. Il constitue le grand Erg oriental que forme une formidable mer de sable dont la hauteur de certaines dunes peut atteindre 200 m. Ce grand Erg couvre environ les 2/3 du territoire de la Wilaya.

On trouve également la Hamada représenté par un plateau rocailleux localisé en grande partie à l'Ouest et au Sud.

Les vallées sont représentées par la vallée fossile d'oued Miya et celle de l'oued Righ. Les plaines s'étendent du nord au sud et sont plutôt réduites à la limite occidentale de la Wilaya. Quant aux dépressions, elles sont essentiellement localisées dans la région de l'Oued Righ.

Le relief est dominé par :

* le Grand Erg Oriental : véritable mer de sable où les dunes peuvent atteindre une hauteur de 200 m. Il s'étend au 2/3 du territoire

- * La hamada : plateau caillouteux situé en grande partie au Sud et à l'Ouest
 - * Les plaines : assez réduites s'étendent du Nord au Sud. L'Oued Mya et l'Oued Righ constituent les deux vallées fossiles de la région.
 - * Les dépressions : sont peu nombreuses et se situent dans la zone d'Oued Righ.
- La Wilaya se situe dans une région très peu accidentée et est tectoniquement stable. Trois régions se distinguent :
- * Le grand Erg oriental : vaste dépôt de sable éolien, à l'Est et au Sud.
 - * Au centre : régions de vallées, où prédominent les dépôts d'alluvions,
 - * Le plateau du M'Zab à l'Ouest.

II.3. Climat :

Le climat dominant de Ouargla est de type désertique, avec des températures estivales élevées, une faible pluviométrie et une forte évaporation.

Au cours de l'année, il n'y a pratiquement aucune précipitation en Ouargla. En moyenne la température à Ouargla est de 22.9 °C. La moyenne des précipitations annuelles atteints 39 mm.

Ouargla se trouve dans l'hémisphère Nord. L'été commencé fin Juin et se termine en Septembre. Il y a les mois d'été : Juin, Juillet, Aout, Septembre.

Le tableau n° II.1 résume une moyenne des données climatologiques de la wilaya.

Tableau n° II.1 : Les données climatiques de la région de Ouargla (1991-2021)

	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre
Température moyenne (°C)	10.5	12.8	17.7	22.5	27.4	32.1	35.2	34.3	30.1	24.1	16.1	11.4
Température minimale moyenne (°C)	5.1	6.7	10.9	15.3	20	24.3	27.4	26.9	23.4	17.7	10.5	6.2
Température maximale (°C)	16.3	18.8	23.9	28.8	33.6	38.5	41.7	40.6	36	29.8	21.6	16.8
Précipitations (mm)	10	3	5	4	2	0	0	0	3	4	4	4
Humidité(%)	54%	40%	31%	25%	22%	19%	17%	20%	28%	35%	47%	57%
Jours de pluie (jrée)	1	1	1	1	0	0	0	0	1	1	1	1
Heures de soleil (h)	8.8	9.8	10.6	11.5	12.4	12.8	12.6	12.0	11.1	10.2	9.3	8.7

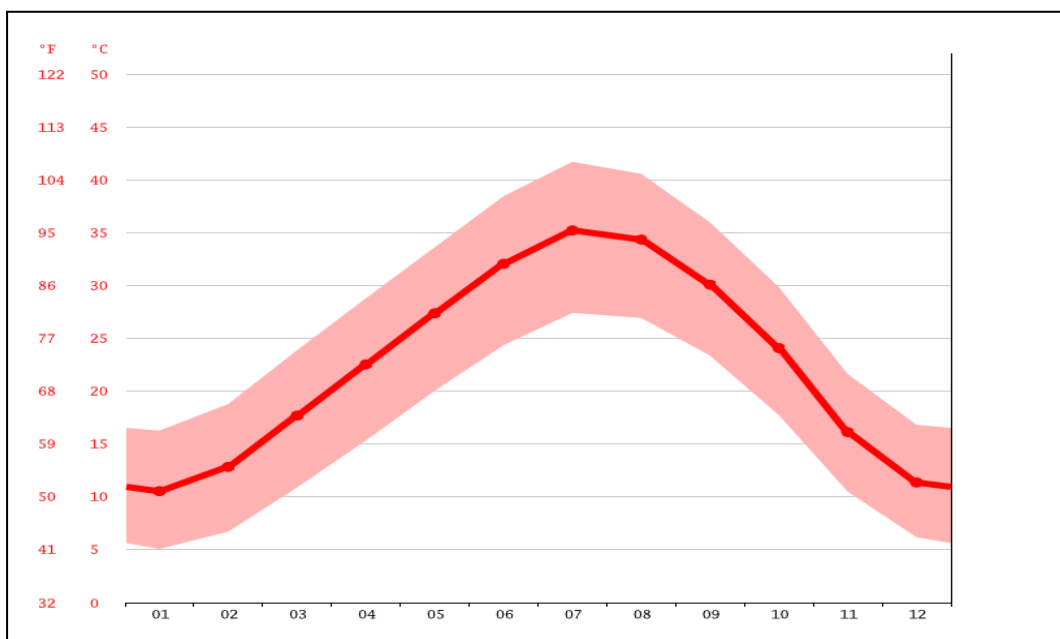
Source : CLIMATE-DATA .ORG (2022)

II.3.1. Pluviométrie :

D'une manière générale, les précipitations sont qualifiées de rares et irrégulières. Les données des 30 années enregistrées à la station météorologique de Ouargla, montrent que le mois de Janvier est le mois le plus pluvieux (10 mm) et Juin, Juillet et Août les plus secs (0 mm).

II.3.2. Températures :

Les températures sont de type saharien. La moyenne mensuelle interannuelle (du mois le plus chaud est de 35,2° C en Juillet et celle du mois le plus froid est de 10,5° C en Janvier. (Figure n° II.2)



Source : CLIMATE-DATA .ORG (2022)

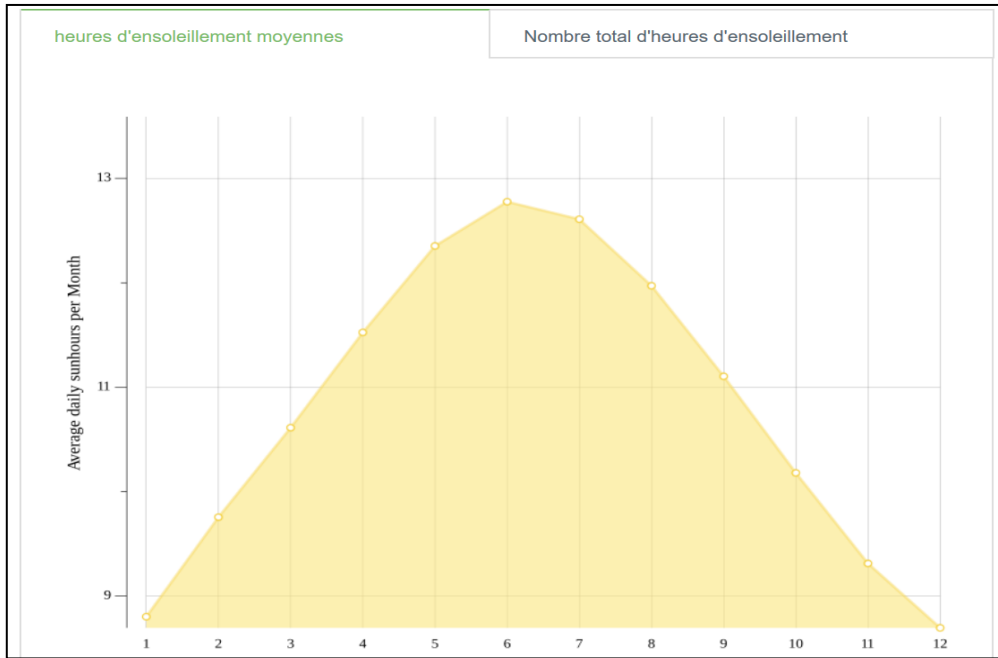
Figure n° II.2 : Courbe de température moyenne mensuelle interannuelle (1991-2021)

✓ Heures d'ensoleillement :

A Ouargla, le mois avec le plus d'ensoleillement quotidien est Juin avec une moyenne de 12.61 heures d'ensoleillement. Au total, il y a 390.85 heures d'ensoleillement en Juin.

Le mois avec le moins d'heures d'ensoleillement quotidien à Ouargla est Janvier avec une moyenne de 8.7 heures d'ensoleillement par jour. Au total, il y a 269.58 heures d'ensoleillement en Janvier.

Environ 3946.54 heures d'ensoleillement sont comptées à Ouargla tout au long de l'année. Il y a en moyenne 129.69 heures d'ensoleillement par mois (Figure n° II.3).



Source : CLIMATE-DATA .ORG (2022)

Figure n° II.3 : Courbe des heures d'ensoleillement (1991-2021)

II.3.3. Diagramme Ombrothermique :

Avec 0 mm, le mois de Juin est le plus sec. Le mois de Janvier, avec une moyenne de 10 mm, affiche les précipitations les plus importantes (Figure n° II.4).

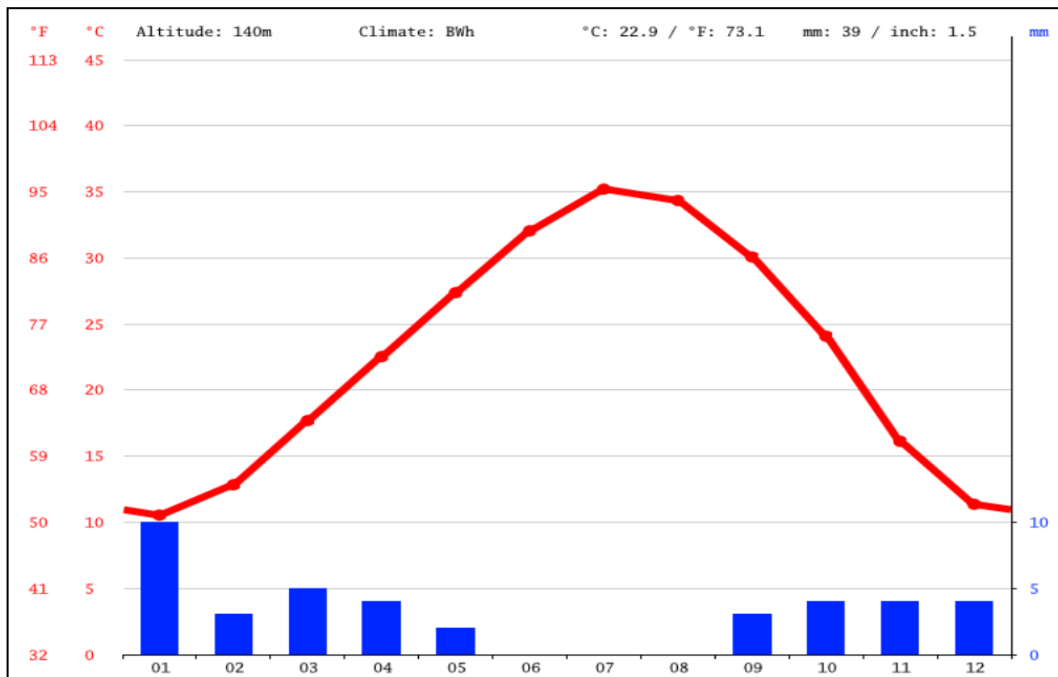


Figure n° II.4 : Diagramme Ombrothermique (1991-2021)

II.3.4. Humidité relative de l'air :

L'humidité relative la plus basse de l'année est en Juillet (17.07 %). Le mois où le taux d'humidité est le plus élevé est Décembre (56.63 %).

Le moins de jours de pluie est à prévoir en Aout (0.07 jours), tandis que les jours les plus pluvieux sont mesurés en Janvier (1.53 jours).

II.4. Ressources hydriques :

II.4.1. Continental Intercalaire :

Cette nappe couvre le Sahara septentrional, sa formation est constituée de dépôts continentaux sablo-gréseux et argilo-sableux marins du crétacés inférieur, elle est alimentée par l'infiltration des eaux de l'atlas saharien et sur alimentée par les eaux circulant dans la hamada Sud ouranienne et sous l'Erg occidental. La nappe du Continental Intercalaire occupe une superficie de 600,000 km², bordurée par l'oued Saoura l'ouest et par les territoires tunisiens et libyens à l'Est. La nappe du Continental Intercalaire est caractérisée par des températures moyennes de 20° à 30°C, une salinité qui va de 1,5 à 2,5 g/l. (Castany, 1982 in Houbi, 2010).

II.4.2. Complexe terminal :

Le système aquifère du complexe terminal couvre la majeure partie du bassin oriental du Sahara septentrional sur environ 350000 Km². Ce complexe est représenté par deux aquifères : le premier est contenu dans les sables du Miopliocène et le deuxième dans le sénonien.

II.4.3. Le Miopliocène :

Cet aquifère fut à l'origine des palmeraies irriguées dans la région de Ouargla. Il coule du sud-ouest vers le nord-est, en direction du chott Melghir à une profondeur qui varie entre 30 et 65 m. La conductivité électrique des eaux de la nappe du Miopliocène varie de 3 ms/cm à 6.4 ms/cm (A.N.R.H., 2001).

II.4.4. Le sénonien :

Il est mal connu, et exploité à des profondeurs allant de 20 à 40 environ. Malgré la bonne qualité de ses eaux, son faible débit limite son utilisation. Les eaux de la nappe sénonienne sont moins chargées, leur conductivité ne dépassant généralement pas la valeur de 3mS.cm⁻¹. Les profils ioniques montrent que les eaux de la première nappe sont à dominance chlorurée sodique et ceux de la deuxième sont à dominance Sulfato-Sodique (IDDER., 2007).

II.5. Présentation du site expérimental :

Notre expérimentation a été réalisée au niveau de la station expérimentale de l'INRA (Institut National de la recherche Agronomique), située à Sidi Mahdi. La station régionale est située, à environ 7 km Sud- Est du chef-lieu de la daïra de Touggourt, sur le plateau oriental de l'Oued-Righ, avec une latitude de 33°04 Nord, une longitude de 6°05 Est, et une altitude de 85 m. Elle est occupée une superficie de 52 ha. La palmeraie occupe 26 ha (Benmoussa, 2013).

Cette palmeraie a une plantation régulière, d'une densité de 100 pieds/ha, soit un espacement de 10m x 10m. Dont 1 ha est réservé à une collection de cultivars provenant des régions d'Oued-Righ et Oued-Souf.

Contrairement aux palmeraies traditionnelles, les opérations pratiquées dans la palmeraie expérimentale de la station de l'INRAA obéissent à un calendrier technique qui varie en fonction de la saison et du stade phénologique du palmier.

II.5.1. Les caractéristiques physiques de la station :

✓ Le climat :

Le climat de Sidi Mahdi est de type saharien caractérisé par des températures avoisinant les 45°C durant l'été, des précipitations rares et irrégulières inférieure à 70 mm/an, des vents fréquents, violents et parfois accompagnés de sable. Les écarts de températures sont très importants et surtout en été, ils peuvent atteindre facilement les 16°C durant le mois d'Aout.

✓ Le sol :

La description d'un profil pédologie sous un palmier qui a réalisées par MEISSA 2012 (Benmoussa, 2013), montres que le sol du site est caractérisé par une composition texture à prédominance de sable. La texture du sol est de type sableux à sable-limoneuse sur le triangle international. Une concentration des racines les plus actives à une profondeur de 0.40 m.

✓ L'irrigation :

Les eaux d'irrigation utilisées proviennent de deux grands ensembles aquifères :

- * Par continental intercalaire (CI), ou albien (la profondeur est mois 180, T=58°C, salinité 2.5-3g/l).
- * Par le complexe terminal ou Miopliocène (la profondeur est mois de 100m, T°=25°C, salinité 5-6 g/l).

L'irrigation de la palmeraie se fait par un réseau de distribution de l'eau, ce réseau est un ensemble des canaux à ciel ouvert et plus précisément les seguias.

Les canaux d'alimentation de ces seguias sont de deux types ; soit le canal à ciel ouvert en béton, soit par une canalisation enterrée, selon la poste d'irrigation.

Conclusion :

Le climat de la région de Ouargla est connu par son aridité marquée notamment par la faiblesse et l'irrégularité des précipitations d'une part, et par les amplitudes thermiques et les températures trop élevées d'autre part. Cette aridité ne se constate pas seulement en fonction du manque de pluies, mais aussi par une forte évaporation dans la région.

Ce climat est de type méditerranéen aride, malgré l'effet de la continentalité, il est caractérisé par un hiver doux et une période de sécheresse prolongée.

Chapitre III

Conception et réalisation du système de mesure de l'humidité du sol

Introduction :

L'efficacité de l'utilisation de l'eau et des éléments nutritifs est optimale quand l'irrigation fournit à la culture tout juste la quantité d'eau dont elle a besoin et que le sol est à même de retenir. Quand on considère la durée des opérations d'irrigation, il est logique de prendre le temps de mesurer l'humidité du sol dans le but d'améliorer les décisions d'irrigation. (R. Shortt et All).

Il existe plusieurs méthodes pour estimer et évaluer l'humidité du sol. Nous trouvons qu'il existe des méthodes directes et indirectes de mesure de l'humidité du sol.

L'idée de la conception du système de mesure provient malheureusement du fort cher prix des sondes captives qui mesure l'humidité du sol, et l'absence d'un appareil qui mesure l'humidité dans le temps le long de la planche pendant l'irrigation.

Ce système permet de résoudre le problème du temps et de la main-d'œuvre en contrôlant l'humidité du sol, par conséquent, la production agricole.

L'idéal est d'atteindre ces objectifs destinés à développer l'agriculture et à augmenter la production. Il est possible d'élargir l'idée en elle-même afin d'y inclure de nombreuses fonctionnalités nouvelles destinées à développer l'agriculture et à augmenter la production.

Dans ce chapitre. Il s'agit de concevoir et de réaliser un système qui mesure l'humidité du sol, nous allons présenter les étapes suivies pour réaliser l'ensemble de la partie software et la partie hardware du système étudié.

III.1. L'humidité du sol :

Chaque culture a besoin de déterminé de teneur donne en eau dans le sol. Un dépassement de ce seuil peut constituer un danger pour sa croissance alors qu'une valeur plus faible peut dessécher le sol. (Toutani, 1997 in Khemgani, 2005)

L'humidité du sol est la clé pour apporter la bonne quantité d'eau aux cultures, au bon moment

III.2. Classification l'humidité du sol :

L'eau dans le sol se trouve en trois états différents selon leur facilité d'être drainées et leur utilisation par les cultures. Il s'agit de l'eau gravitaire, l'eau capillaire et l'eau hygroscopique. Elle est en fonction de la teneur en humidité ainsi que le degré de liaison du film d'eau aux particules du sol, à partir des quels sont défini les différentes formes de l'humidité du sol (Lahlouh M et all)

:

III.2.1. L'humidité à capacité au champ (HCC) :

C'est le taux d'humidité du sol après ressouillage. Elle diffère selon la texture du sol et varie de quelques heures après irrigation pour un sol sableux à 2 ou 3 jours pour un sol argileux. Elle constitue le seuil maximum de l'eau utilisable dans le sol au de la duquel l'activité racinaire des plantes peut être négativement influée.

III.2.2. L'humidité du point de saturation (HPS) :

Elle exprime le taux d'eau dans sol quand tous les pores sont remplis d'eau.

III.2.3. L'humidité au point de flétrissement (HPF) :

C'est le taux d'humidité du sol à partir duquel la plante ne peut plus utiliser l'eau nécessaire pour ses activités. IL peut être soit temporaire ou permanent et il exprime le seuil minimum de l'eau utilisable dans le sol.

III.2.4. L'humidité équivalente (Héq) :

C'est le pourcentage d'eau que peut retenir un sol saturé en eau après centrifugation de 100 tours /minute. Sa détermination donne une idée sur l'humidité à capacité au champ (HCC).

III.3. Méthodes de mesure de l'humidité du sol :

La mesure de l'humidité du sol se fait par prélèvement de sol ou à l'aide d'enregistreurs d'humidité implantés dans le sol.

III.3.1. Mesures indirectes de l'humidité de sol :

Une bonne alimentation en eau suppose, qu'à tout moment il ya équilibre satisfaisant entre la quantité d'eau susceptible de cheminer du sol jusqu'à la surface foliaire évaporation peut être assurée par ce feuillage. Cette « demande » qui exprime les besoins bruts en eau de la culture et dépend, essentiellement, du climat et l'évapotranspiration potentielle (désignée par les trois lettres E.T.P), valeur caractéristique d'un lieu donné pour une période donnée.

III.3.2. Mesures directes de l'humidité de sol :

La méthode la plus simple consiste à prélever des échantillons de terre dans la couche de sol exploitée par les racines (le réservoir utile) et à les peser, avant et après dessiccation, pour connaître, leur teneur en eau.

D'autres méthodes utilisant des sondes capacitives permettent une mesure immédiate de l'eau contenue dans le sol, de façon continue et à plusieurs profondeurs du sol dans le système racinaire des plantes. (Agralis services).

Ces sondes sont malheureusement fort chères et réservées, de ce fait, dans notre étude, nous avons pu réaliser un système électronique qui permet la mesure de l'humidité du sol, dans le temps et le long de la planche d'irrigation.

Dans la suite nous présentons les outils matériels et environnements logiciels utilisés pour le développement du système et ainsi que les différentes plateformes d'exécution de ses différentes parties.

III.4. Présentation du système de mesure de l'humidité du sol :

L'irrigation dans les systèmes de culture agricoles étant le secteur le plus important en termes de gestion et d'utilisation de l'eau, la maîtrise des dépenses en eau demeure un enjeu majeur des industriels et des producteurs indépendants. Plusieurs chercheurs ont conçu des systèmes d'arrosages automatiques à énergie solaire dit "intelligent" (Salhi A et all).

Ces systèmes peuvent réduire la consommation de l'eau dans un champ à 50%. Et aussi minimiser les dépenses en énergie électrique, le fait d'utiliser un ensemble de panneaux solaires et de batteries rechargeables, la plate-forme est possédée de divers capteurs d'humidités enfoui dans le sol qui permet de calculer les besoins réels des sols en eau et réguler le débit en conséquence grâce à d'une petite unité électronique. Ce système permet de contrôler de façon constante et en temps réel des différents paramètres atmosphériques et du sol, et les besoins des plantes (Salhi A et all).

Notre système de mesure est basé sur une carte Arduino connectée à certains capteurs. Pour la réalisation de notre système de mesure nous avons besoin des éléments suivants :

1- Arduino UNO

2- Les capteurs

- Capteur de température et d'humidité de l'air (DHT-22).
- Capteur d'humidité de sol (soil moisture sensor).

3- Carte SD.

III.5. Les outils matériels, description de chaque composant :

III.5.1. L'Arduino UNO :

Une carte Arduino est une petite carte électronique (5,33 x 6,85 cm) équipée d'un microcontrôleur. Il permet, à partir d'événements détectés par des capteurs, de programmer et commander des actionneurs (Figure n°III.1) ; la carte Arduino est donc une interface programmable, La carte Arduino la plus utilisée est la carte Arduino UNO Le système Arduino est composé de deux choses principales : le matériel et le logiciel (Sabri I et all).

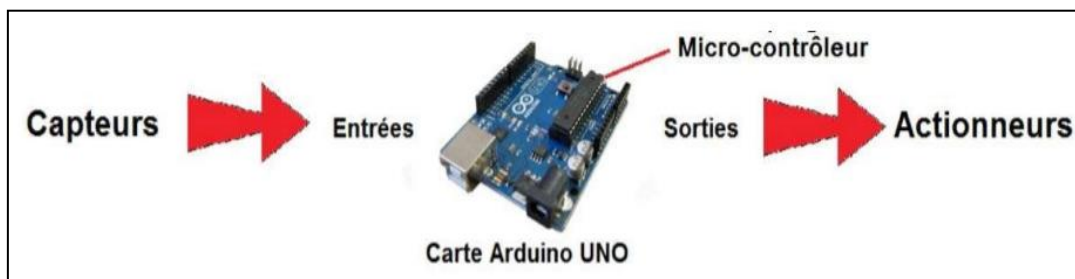


Figure n° III.1 : Architecture de la carte Arduino UNO

Cette carte électronique permet donc à son utilisateur de programmer facilement des choses et de créer des mécanismes automatisés, sans avoir de connaissances particulières en programmation (Figure n° III.2). Il est un outil pensé et destiné aux inventeurs, artistes ou amateurs qui souhaitent créer leur propre système automatique en le codant de toute pièce (Salhi A et all).

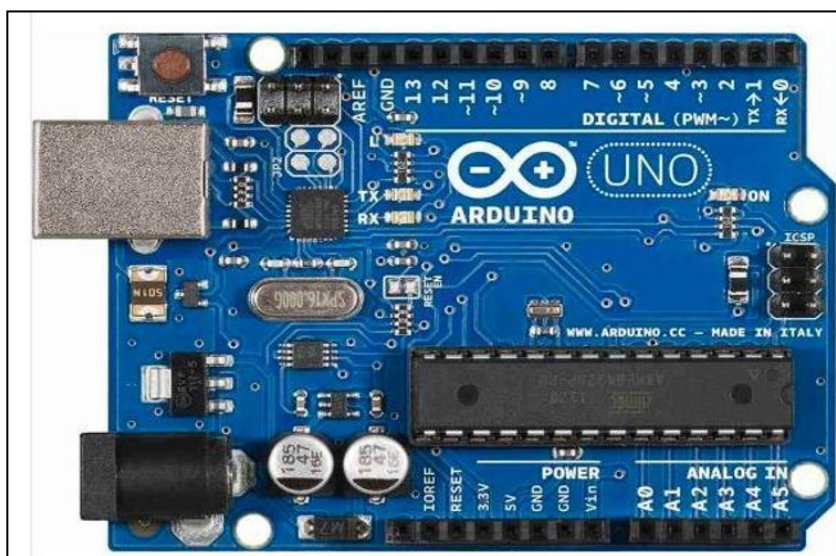


Figure n° III.2 : Carte Arduino UNO

→ Le Principe de fonctionnement :

1. On conçoit ou on ouvre un programme existant avec le logiciel Arduino.
2. On vérifie ce programme avec le logiciel Arduino (compilation).
3. Si des erreurs sont signalées, on modifie le programme.
4. On charge le programme sur la carte.
5. On câble le montage électronique.
6. L'exécution de programme est automatique après quelques secondes.
7. On alimente la carte soit par le port USB, soit par une source d'alimentation.
8. Autonome (pile 9 volts par exemple).
9. On vérifie que notre montage fonctionne. (Sabri I et all)

III.5.2. Capteur d'humidité et température DHT22 :

La DHT22 est un capteur à bas cout permettant d'acquérir une température et une humidité ambiante d'une manière numérique. Il utilise un capteur d'humidité capacitif et une thermistance pour mesurer la température et l'humidité de l'air et la transmet d'une manière numérique sur un bus série. Les données sont actualisées toutes les 2 secondes.

La connexion de ce capteur est très simple, il suffit de relier le premier pin à gauche à l'alimentation (3V à 5V), le pin central sur une pin Arduino déclarée en entrée (INPUT) et le pin de droite à la masse (GND) (Figure n° III.3) (Salhi A et all).

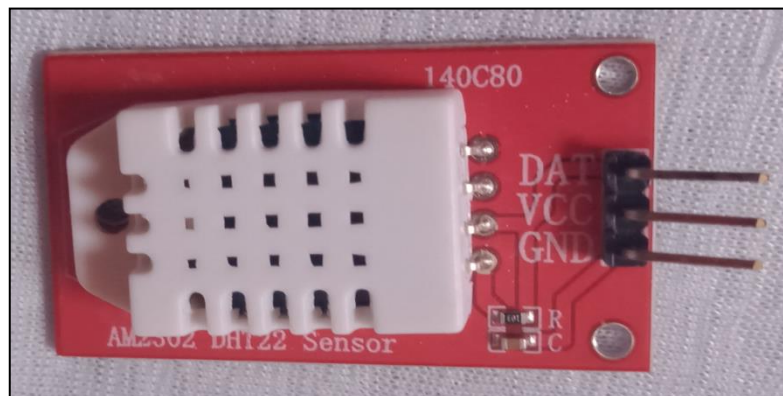


Figure n° III.3 : Capteur d'humidité de l'air et de température DHT22

Ce capteur nous permet de voir l'humidité de l'air et la température présente en chaque point dans la longueur de la planche irrigue. Cela nous donne une idée sur le climat de la région.

III.5.3. Capteur d'humidité de sol (Soil Moisture Sensor) :

Ce module de capteur est utilisé pour détecter l'humidité du sol. Il mesure le contenu volumétrique de l'eau dans le sol et nous donne le niveau d'humidité comme sortie. Le module dispose de sorties numériques et analogiques et d'un potentiomètre pour ajuster le niveau du seuil (Figure n° III.4).

Ce module de détection d'humidité est composé d'un capteur d'humidité, de résistances, d'un condensateur, d'un potentiomètre, d'un comparateur LM393 IC, d'une LED d'alimentation et d'état dans un circuit intégré (Salhi A et all).

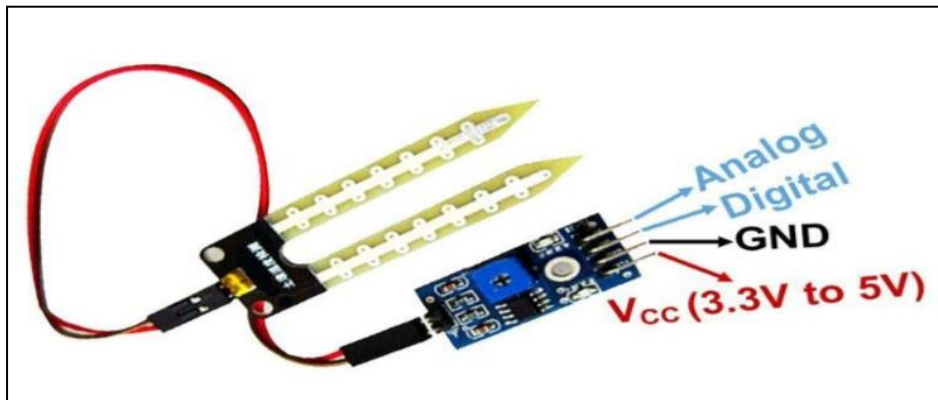


Figure n° III.4 : Capteur d'humidité de sol

- **Caractéristique :**

- Tension de fonctionnement : 3.3V à 5V DC
- Courant de fonctionnement : 15mA
- Sortie numérique - 0V à 5V, niveau de déclenchement réglable à partir d'une valeur prédéfinie.
- Sortie analogique - 0V à 5V basée sur le rayonnement infrarouge de la flamme du feu tombant sur le capteur.
- LEDs indiquant la sortie et l'alimentation.
- Taille du circuit imprimé : 3.2cm x 1.4cm.
- Conception basée sur LM393.
- Facile à utiliser avec des microcontrôleurs ou même avec un circuit intégré numérique/analogique normal. Petit, bon marché et facilement disponible (Salhi A et all).

- **La carte LM393 IC :**

Le comparateur LM393 est utilisé comme comparateur de tension dans ce module de capteur d'humidité (Figure n° III.5). La broche 2 du LM393 est connectée à la présélection (Pot 10K Ω) tandis que la broche 3 est connectée à la broche du capteur d'humidité. Le circuit intégré comparateur comparera la tension de seuil définie à l'aide du pré-réglage (broche 2) et de la broche du capteur (broche 3) (Salhi A et all).

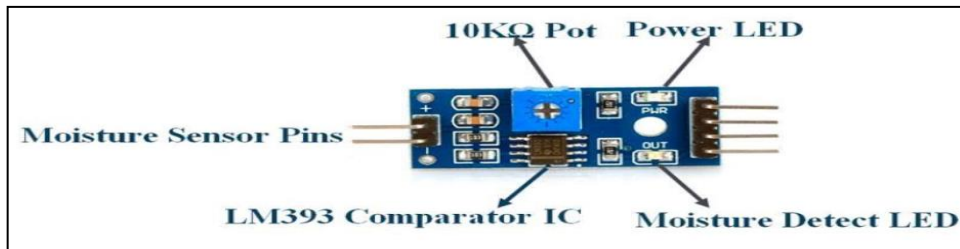


Figure n° III.5 : La carte LM393 IC

- **Capteur d'humidité :**

Le capteur d'humidité se compose de deux sondes qui sont utilisées pour détecter l'humidité du sol (Figure n° III.6). Les sondes du capteur d'humidité sont recouvertes d'or par immersion qui protège le nickel de l'oxydation. Ces deux sondes sont utilisées pour faire passer le courant dans le sol, puis le capteur lit la résistance pour obtenir les valeurs d'humidité (Salhi A et all).

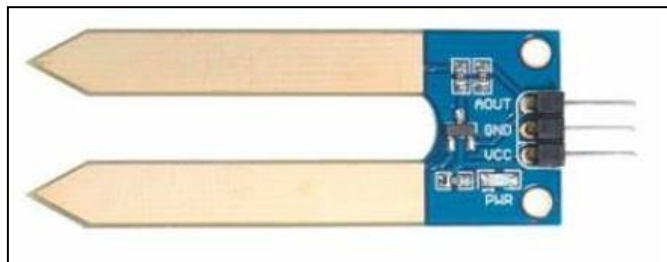


Figure n° III.6 : Capteur d'humidité.

III.5.4. Module de carte SD :

Nous allons montrer comment utiliser un module de carte SD (Figure n° III.7) avec Arduino pour lire et écrire des fichiers sur une carte SD. Le module de carte SD est particulièrement utile pour les projets nécessitant un enregistrement de données, l'Arduino peut créer un fichier sur une carte SD pour écrire et sauvegarder des données à l'aide de la bibliothèque SD. Il existe différents modèles de différents fournisseurs, mais ils fonctionnent tous de manière similaire, en utilisant le protocole de communication SPI. Le module (adaptateur de carte Micro SD) est un module de carte

Micro SD de lecteur, et l'interface SPI via le pilote de système de fichiers, système de microcontrôleur pour compléter la carte Micro SD lire et écrire fichiers (Lahlouh M et all).

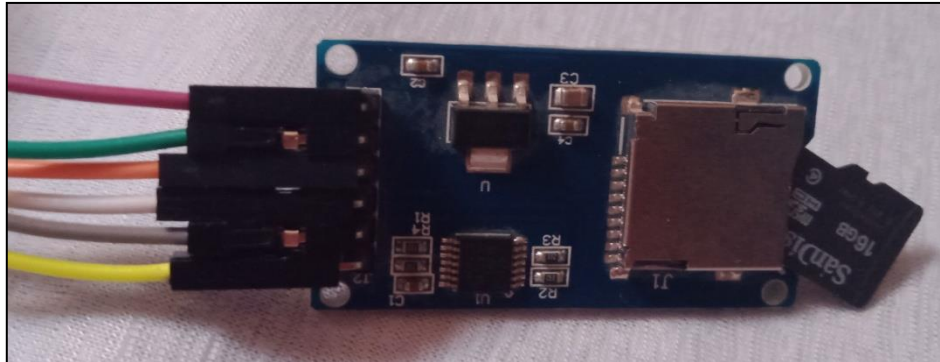


Figure n° III.7 : Module de carte SD

III.5.5. Les câbles :

Un câble regroupe généralement plusieurs fils conducteurs au sein d'une même gaine qui va les protéger, ces câbles sont utilisés pour relier les différents composants et peut être utilisé pour le transport d'énergie électrique mais aussi pour la transmission de données.

Il existe ainsi plusieurs types et plusieurs modèles de câbles que nous pouvons retrouver sur le marché. Pour la construction de notre projet on va utiliser plusieurs câblages tels que : les câbles d'alimentation pour assurer l'alimentation des composants impliquées ou participées dans notre projet (capteurs, carte Arduino, ...) (Kambouche S et all).

A- Câble d'alimentation :

C'est un câble USB pour connecter facilement les cartes Arduino à un ordinateur. Ce câble permet d'alimenter simplement votre kit Arduino UNO (Figure n° III.8).



Figure n° III.8 : Câble alimentation USB pour Arduino

B- Jumper:

Être utilisé pour le projet électronique et la maquette. Compatible avec les en-têtes d'espacement de 2,54 mm

✓ Cet ensemble de fils de raccordement multicolores convient à de nombreux projets Arduino et est facile à connecter et à utiliser.

✓ Longueur 10-30 cm (8 pouces),

✓ Jumper Wire cavalier câble connecteurs mâle/mâle, femelle/femelle, mâle/femelle et sont compatibles avec les connecteurs à broches droites de 2,54 mm (Kambouche S et all).

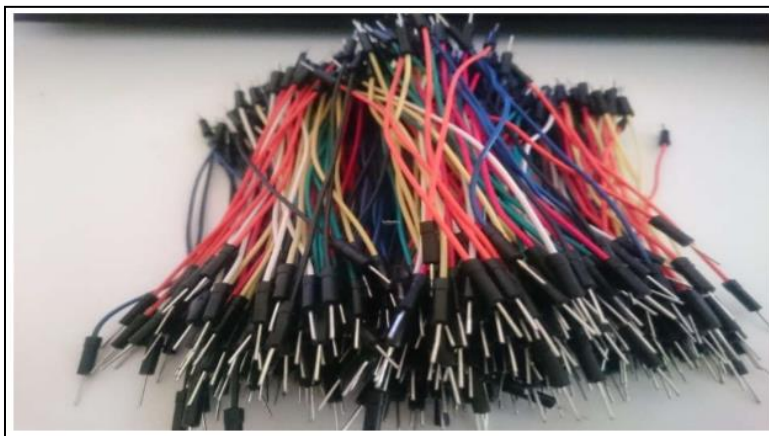
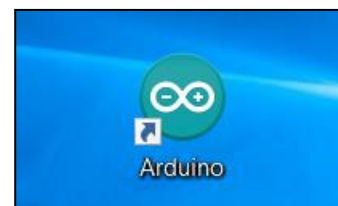


Figure n° III.9 : Câble connecteurs mâle/mâle et mâle/femelle

III.6. Logiciels utilisés :

Notre réalisation ne fonctionne pas sans la partie soft, donc dans cette réalisation, nous nous sommes basés sur le logiciel, Arduino UNO, nous a servi à programmer et configurer notre carte Arduino pour le bon fonctionnement de notre application.



Le logiciel de programmation de la carte Arduino sert d'éditeur de code (langage proche du C). Une fois, le programme tapé ou modifié au clavier, il sera transféré et mémorisé dans la carte à travers de la liaison USB. Le câble USB alimente à la fois en énergie la carte et transporte aussi l'information, ce programme appelé IDE Arduino (Kambouche S et all).

III.6.1. Structure générale du programme :

Le logiciel Arduino est un environnement de développement (IDE) open source et gratuit, (Figure n° III.10) téléchargeable sur le site officiel d'Arduino. L'IDE Arduino permet :

- D'éditer un programme : des croquis (sketch en Anglais),
- De compiler ce programme dans le langage « machine » de l'Arduino,
- De téléverser le programme dans la mémoire de l'Arduino,
- Communiquer avec la carte Arduino grâce au terminal. (Kambouche S et all).



Figure n° III.10 : Interface IDE Arduino

Le programme détaillé est dans l'annexe A.

III.7. Conception et réalisation de tout le système avec Arduino UNO :

III.7.1. Le schéma de câblage (Circuit du branchement) :

- 1 DHT 22 se brancher avec l'Arduino par 1 fil (D4) + VCC, GND.
- 6 Capteur d'humidité du sol se brancher avec l'Arduino par 1 fil (A0) +VCC, GND.
- 1 Carte SD CC, GND. (Salhi A et all).

La figure n° III.11 représente le schéma explicatif de schéma de câblage qui nous montre la connexion entre les différents modules avec la carte Arduino UNO.

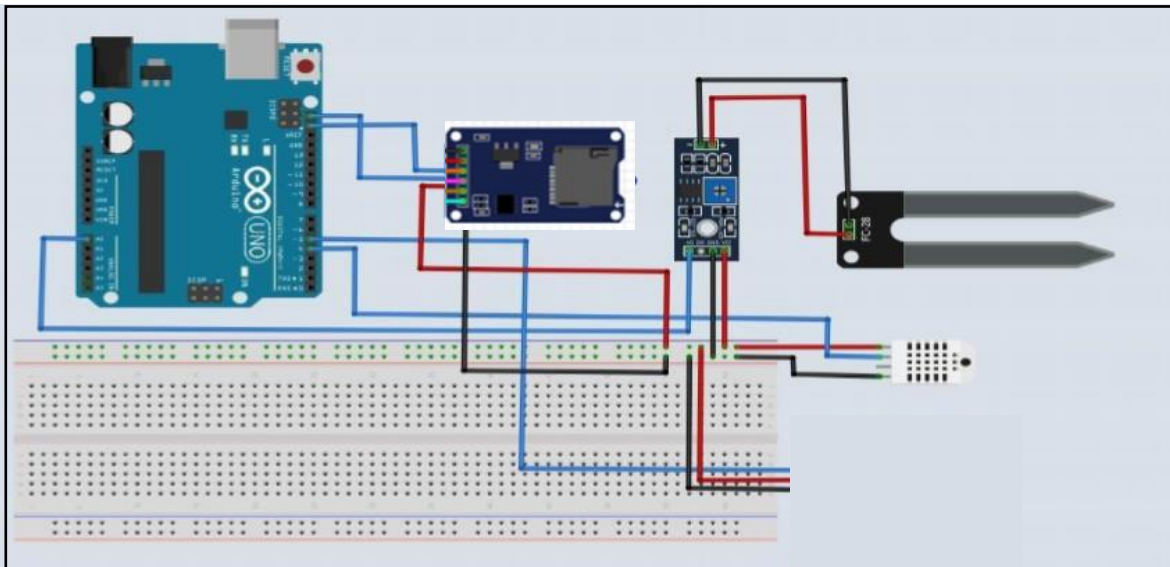


Figure n° III.11 : Schéma de câblage final de notre système avec l'Arduino UNO.

III.7.2. Le schéma final :

La figure n° III.12 représente le schéma final du système réalisé, il est composé de 6 capteurs d'humidité de sol, DHT22, carte SD, la carte Arduino UNO, un micro-ordinateur pour laisser le système allumer. Après, nous avons envoyé le programme Arduino a la carte Arduino qui on a utilisé.

Notre projet a un support supplémentaire qui est un port USB d'ordinateur (5V 200mA) pour communiquer régulièrement des informations afin de simuler le projet sous forme réduite, en alimentant le système en 12V.

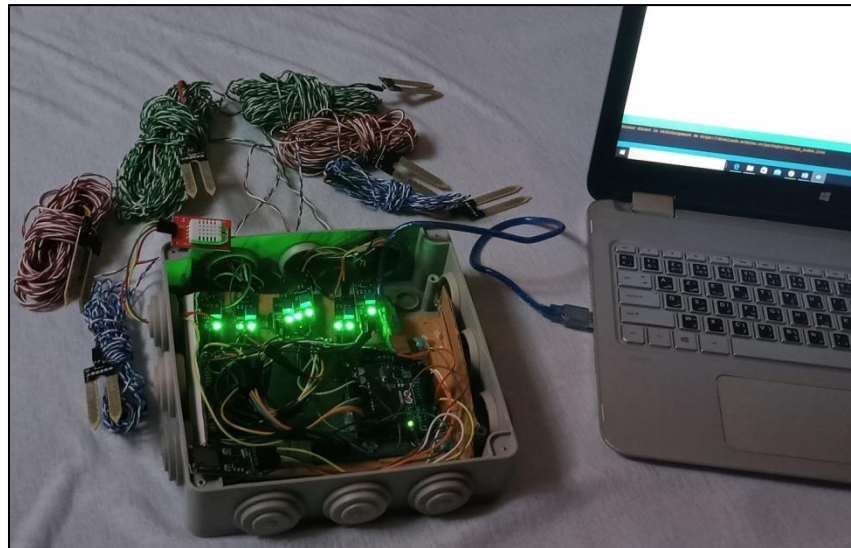
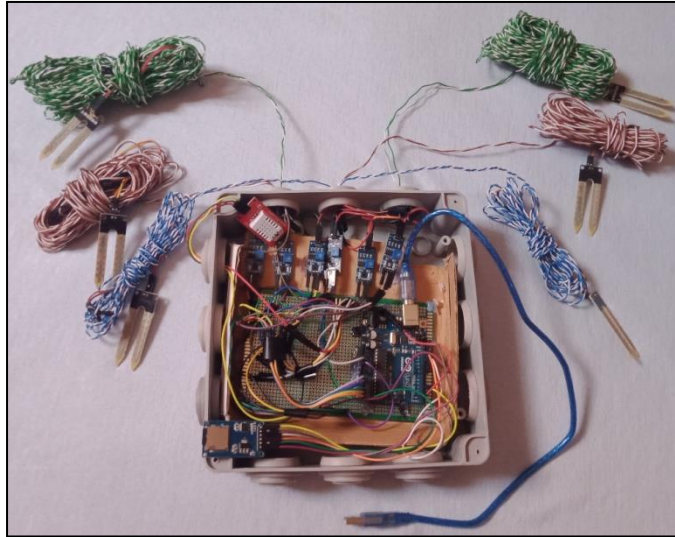


Figure n° III.12 : Le schéma final de système de mesure

III.7.1 Principe de fonctionnement :

Dans notre système de mesure, divers capteurs tels que capteur de l'humidité du sol, le capteur DHT22 sont connectés aux broches d'entrée du microcontrôleur Arduino. Arduino est un microcontrôleur qui agit comme un cerveau pour l'ensemble du système.

Les valeurs détectées par les capteurs sont affichées sur l'écran de l'ordinateur. L'Arduino enregistre également les données d'humidité du sol dans le cloud Thingspeak, configuré à l'aide du module WIFI ESP32. Les mêmes données sont également sauvegardées dans la carte SD (Salhi A et all).

III.8. Les tests des différents étages de notre système :

Après avoir présenté dans la section précédente, les outils utilisés pour réaliser notre système. Tout d'abord, chaque capteur est monté et testé séparément. Ensuite, après avoir expérimenté les composants selon le schéma de la figure précédente, nous les avons réalisés et testés.

III.8.1. Test du capteur d'humidité du sol :

Afin de s'assurer du bon fonctionnement de notre capteur d'humidité du sol. Nous l'avons mis en place dans de la terre, ensuite nous l'avons relié avec la carte UNO, comme le montre la figure n° III.13.

III.8.2. Mesure de température et d'humidité :

Pour certains composants, comme le capteur (DHT22), nous avons besoin d'une bibliothèque (coté soft) qui contient pleins de fonctions pour nous faciliter la programmation. La bibliothèque disponible et téléchargeable sur le lien donné dans la référence [2]. Après le téléchargement et l'installation de cette dernière, nous avons effectué des tests comme le montre la figure n° III.13.

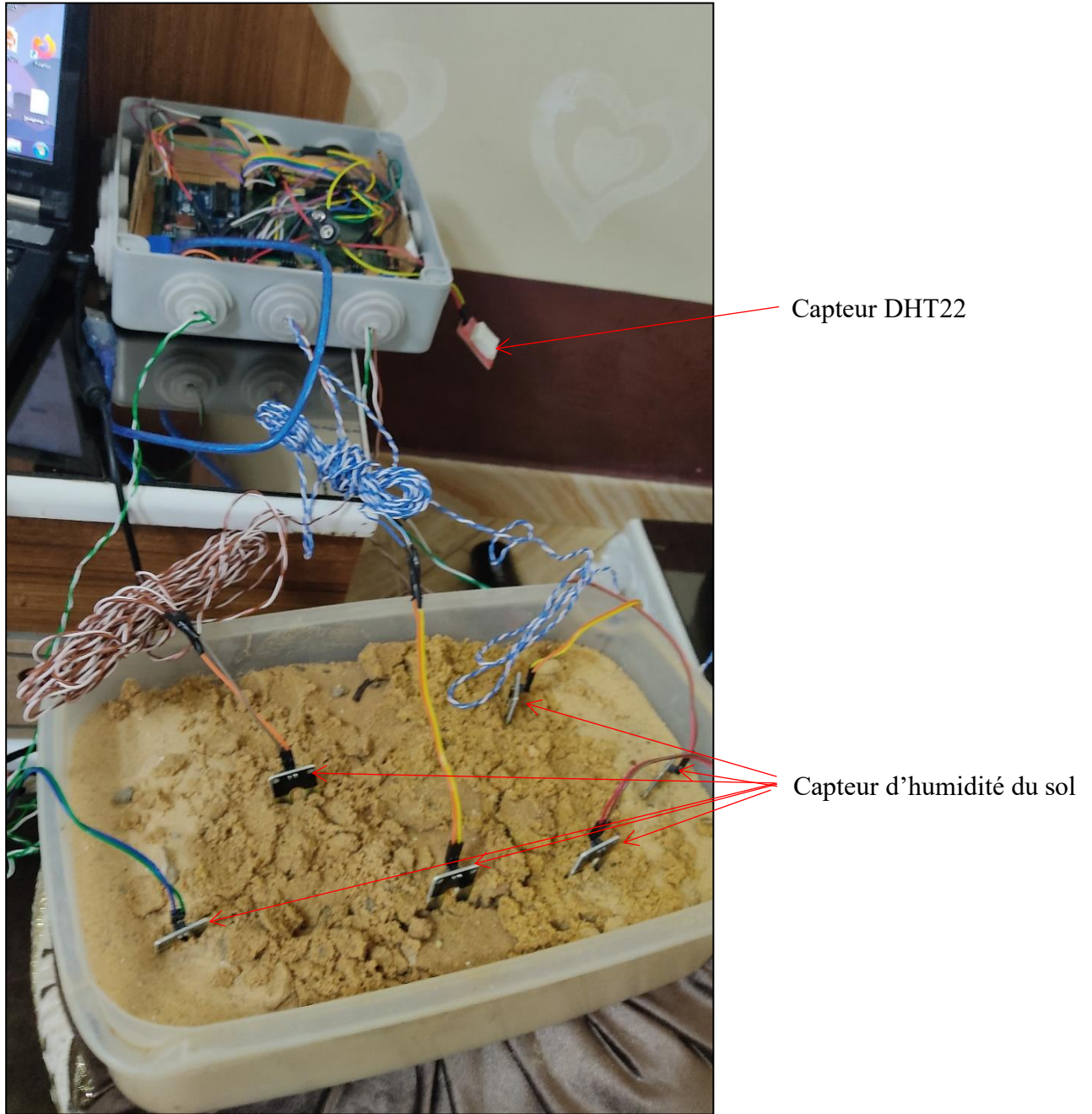


Figure n° III.13 : Test des 6 capteurs d'humidité du sol et test du capteur DHT22

Conclusion :

Le long de ce chapitre, nous avons présenté un détail sur l'humidité et les méthodes de sa mesure. Nous avons également expliqué l'idée du système proposé pour mesurer l'humidité du sol. Pour cela nous avons décrit le schéma synoptique, le schéma électrique ainsi que les fonctionnalités de chaque composante contenue dans notre système. Le but est de permettre de mesurer l'humidité du

sol, lire et enregistrer les différentes lectures. Les résultats d'expériences sur terrain seront présentés, commentés et discutés dans le chapitre suivant.

La réalisation de notre système et le fait d'approfondir les recherches nous a permis de découvrir un secteur que nous ne connaissions pas vraiment et d'avoir une expérience professionnelle très riche.

Chapitre IV

Résultats d'expériences, discussions et commentaires

Introduction :

Dans ce chapitre, nous présenterons les résultats des expériences effectuées sur un terrain réel afin de valider le bon fonctionnement de notre système réalisé. Ces expériences ont été menées sur trois planches irrigues afin de mettre en évidence les différentes conditions d'humidité et de température (climat aride). Le système de mesure évalue le taux d'humidité du sol et le taux d'humidité d'air et de température chaque cinq minute pendant presque une heure. Les résultats numériques de mesure ont été récupérées de la carte mémoire SD puis tracées sur Excel.

IV. Méthode de mesure :

Nous devons, donc déterminer pour une longueur de planche donnée, un débit et une durée d'alimentation, pour que la plante reçoive la quantité d'eau dont elle a besoin tout le long de la planche de l'amont à l'aval. De ce fait, pour une longueur de la planche donnée, nous donnons du débit, et le système réalisé mesurer l'humidité du sol et l'humidité d'air et de température. Seulement dans la région de Ouargla ainsi que dans les régions avoisinantes, la façon d'arroser dépend toujours de l'agriculteur qui doit choisir le débit d'alimentation et la durée d'irrigation de façon pragmatique sans avoir les moyens de vérifier la qualité des arrosages (Benlarbi D).

IV.1. Dispositif expérimental :

Les évaluations du fonctionnement de l'irrigation par planches comprennent les observations suivantes :

- Le débit d'entrée est toujours égal au débit disponible, soit fort ou faible.

Ce paramètre est déterminé sur terrain exactement, il reste constant pendant toute la période d'irrigation des trois planches, dans notre étude le débit égale à 1 l/s.

- Le dispositif expérimental est un ensemble de trois (3) planches comme le montre la figure n° VI-1, la longueur de la planche dépend de la disposition du terrain des points d'eau et des pistes, dans notre étude les trois planches ont une longueur de 30 m.

- La largeur pour chaque planche est égale à 1 mètre.

- Le temps d'irrigation est choisi par expérimentation ainsi que la durée entre deux irrigations, lorsque l'eau est disponible.

- La durée de l'alimentation en tête est variable, elle dépend de la longueur des planches, et du débit d'entrée.

- La pente du fond de la planche longitudinale dans le sens de l'écoulement a été choisie constante pour les trois planches et égale à 2%, et celle dans le sens transversal nulle.
- La période expérimentale est faite durant le mois d'Aout 2022.
- Les sols de notre site sont sableux et perméables.
- L'écartement entre les planches sur le terrain, nous avons façonné les planches espacées de 1 m.



Figure n° VI.1 : Le dispositif expérimental

IV.1.1. Mesure du débit à l'entrée de la planche :

Le choix du débit est un facteur primordial qui conditionne le déroulement et le résultat d'une irrigation. Il n'est pas facile d'avoir sa valeur exacte, car il n'y a pas de critère simple pour le déterminer en fonction des caractéristiques de la parcelle, cependant il doit être :

- Supérieur à l'infiltration totale de la planche, pour que l'eau atteigne l'extrémité avale de la planche,
- Supérieur au débit érosif, valeur qui provoque une érosion manifeste dans la planche.

Le débit idéal diminue lorsque l'on renouvelle les irrigations, à cause de la distribution de la capacité d'infiltration due au lissage de la planche et à la chute de perméabilité du sol. C'est surtout la première irrigation qui se distingue des autres (dés fois elle exige un débit double de celui des irrigations suivantes).

Le débit en tête de la planche est constant car le niveau de l'eau dans le canal ne varie pas au cours du temps et le débit en fin de la planche est variable car il dépend de l'infiltration.

Il existe plusieurs méthodes de détermination du débit à l'entrée de la planche, dans notre travail, nous l'avons déterminé à l'aide d'un débitmètre. Il faut le garder constant pendant toute la période expérimentale (Benlarbi D).

IV.1.2. Mesure de de l'humidité du sol le long de la planche :

On place des jalons avant l'arrosage espacés de 6 m sur la longueur de la planche, dans chaque de jalons nous mettons un capteur d'humidité du sol. On arrose une fois par semaine pendant un mois. Et pendant l'arrosage le système de mesure évalue le taux d'humidité du sol et le taux d'humidité d'air et de température chaque cinq minute pendant presque une heure, aux niveaux des différents points où on a placé les jalons (Annexe B).

IV.2. Résultats d'expériences :

Nous avons réalisé quatre expériences pour chaque planche, durant un mois (Aout 2022). La date de chaque expérience est :

Expérience n°1 : 01-08-2022

Expérience n°2 : 11-08-2022

Expérience n°3 : 18-08-2022

Expérience n°4 : 22-08-2022

Les résultats qu'on a obtenus sont représentés pour chaque planche, sur des représentations graphiques.

IV.2.1. Etude de l'humidité du sol :

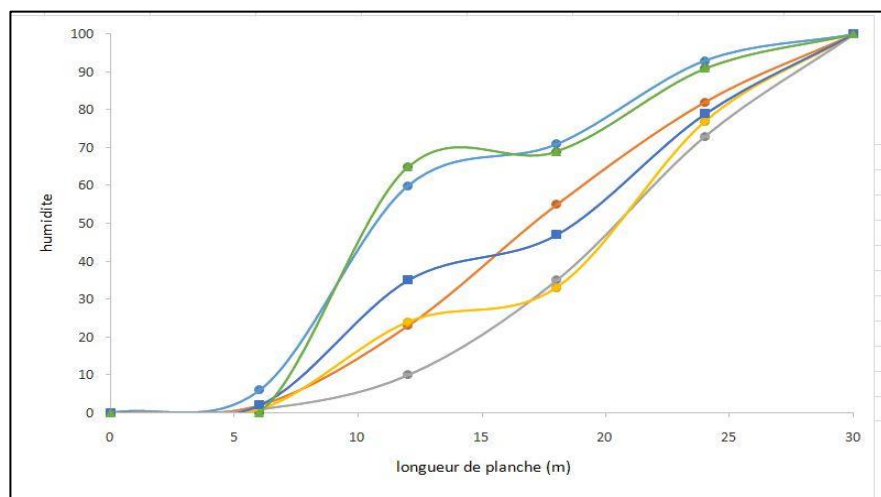
IV.2.1.1. Répartition de l'humidité de la planche :

Les données sauvegardées sur la mémoire sont illustrées sur les figures n° IV.2, IV.3 et IV.4. Ces derniers présentes la répartition de l'humidité le long de la longueur de chaque planche.

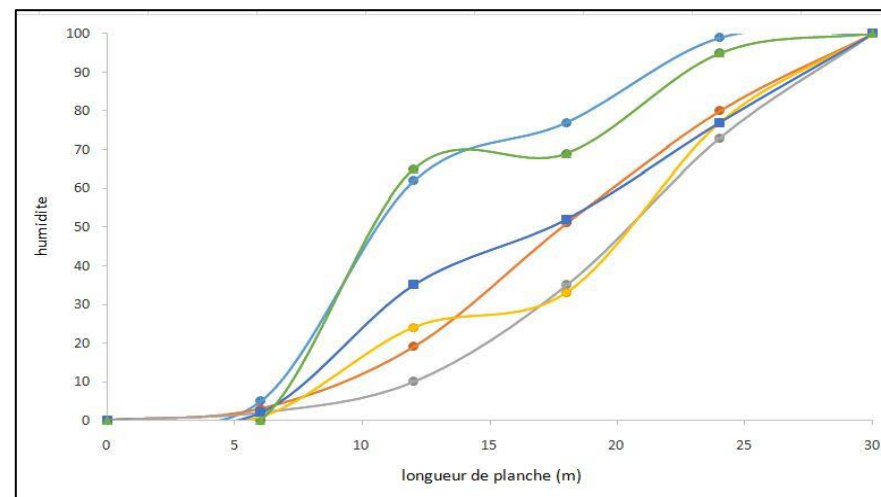
On voit que les valeurs des humidités reçues croissent de l'extrémité amont à l'extrémité aval de la planche. D'où, d'après ces résultats, nous pouvons dire que l'humidité augmente de l'amont à l'aval dans la grande pente (pente des 3 planches est 2%) et sa répartition est irrégulière.

Selon les études précédentes, pour l'uniformité de l'humidité dans les petites planches, peut prendre une valeur de pente entre [0% à 0,5%)

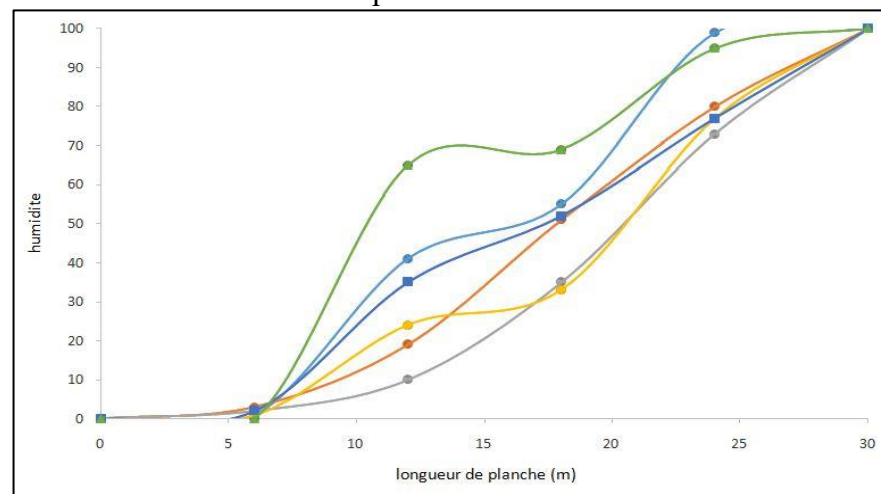
Planche n°1 :



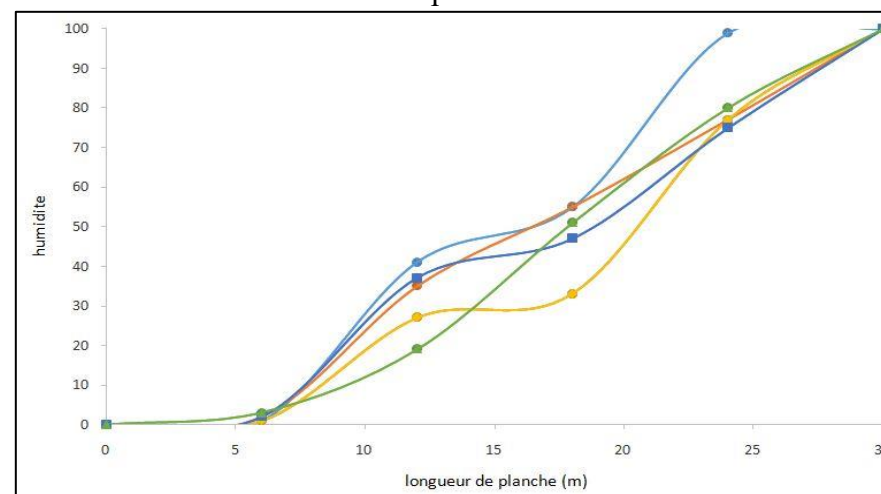
Expérience n°1



Expérience n°2



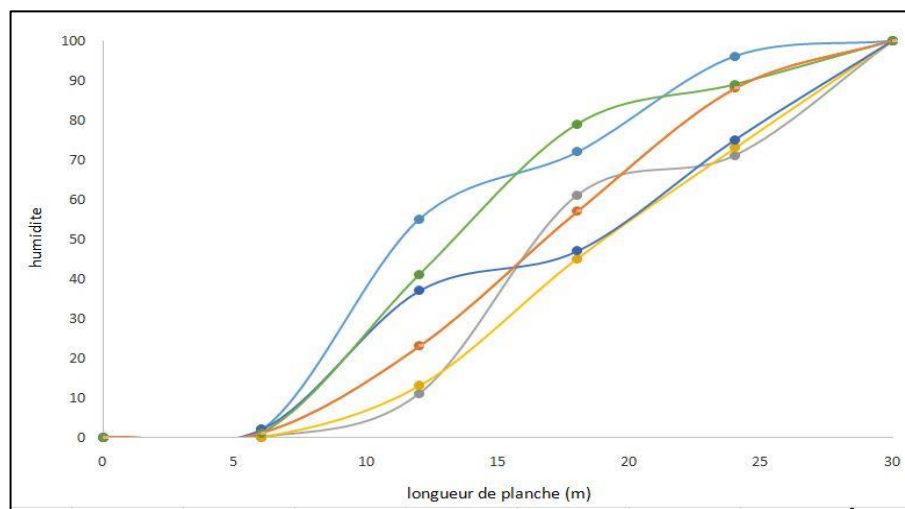
Expérience n°3



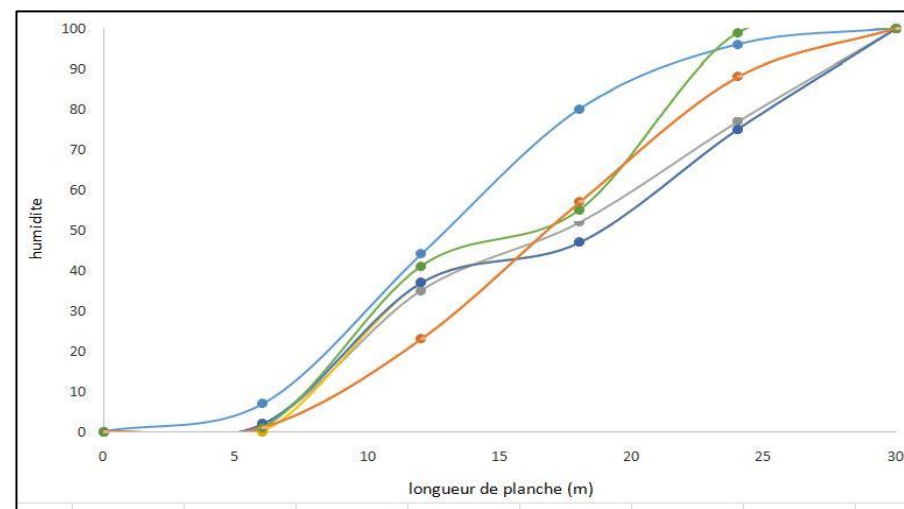
Expérience n°4

Figure n° VI.2 : Humidité du sol (%) le long de planche (Planche n°1)

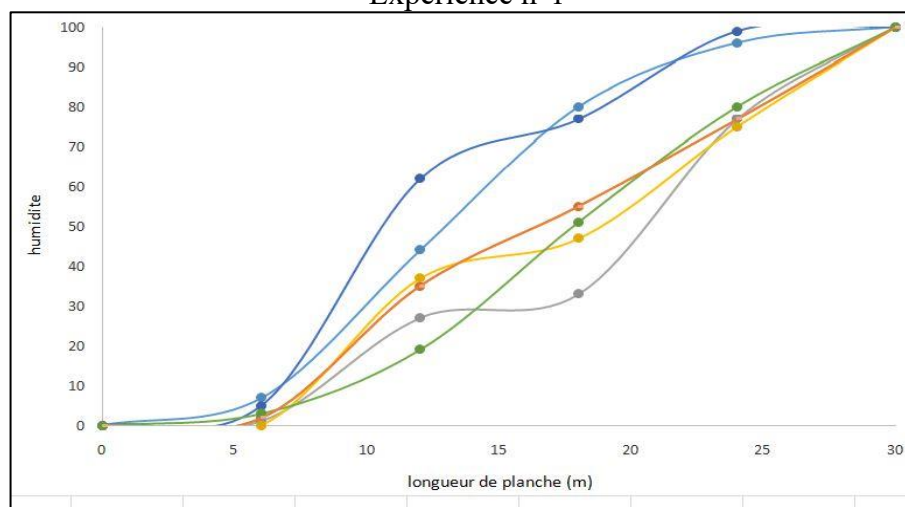
Planche n°2 :



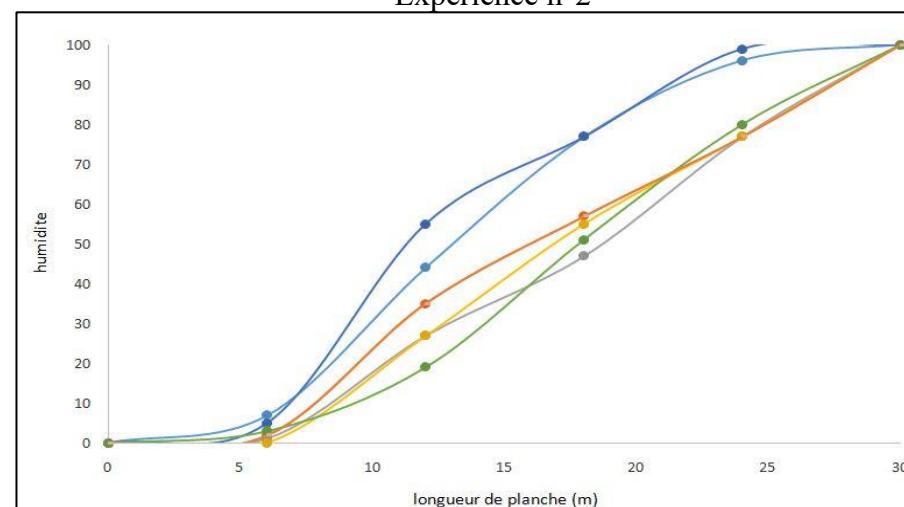
Expérience n°1



Expérience n°2



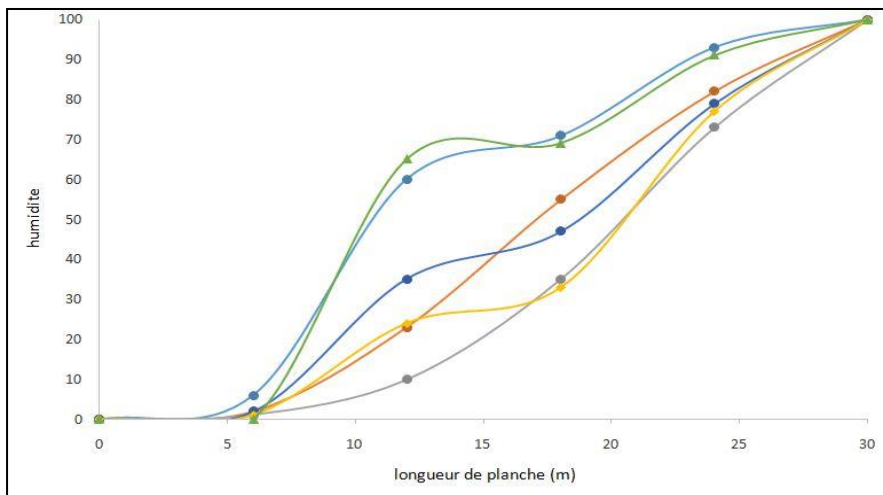
Expérience n°3



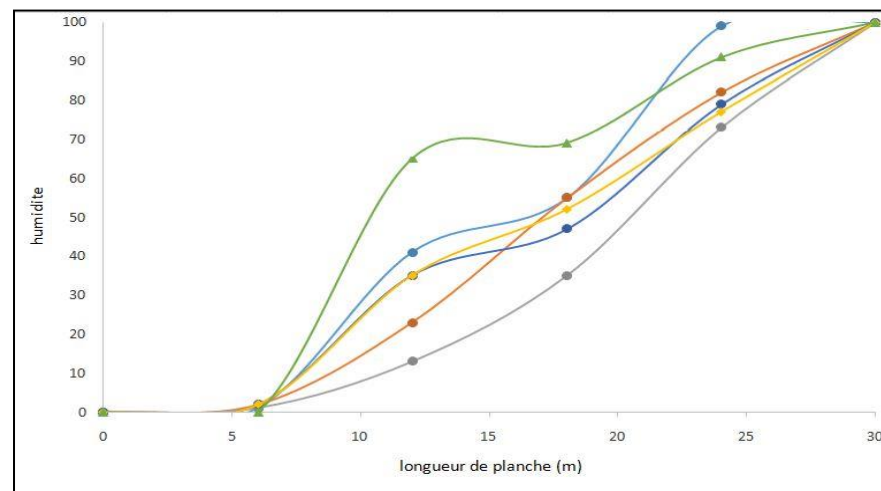
Expérience n°4

Figure n° VI.3 : Humidité du sol (%) le long de planche (Planche n°2)

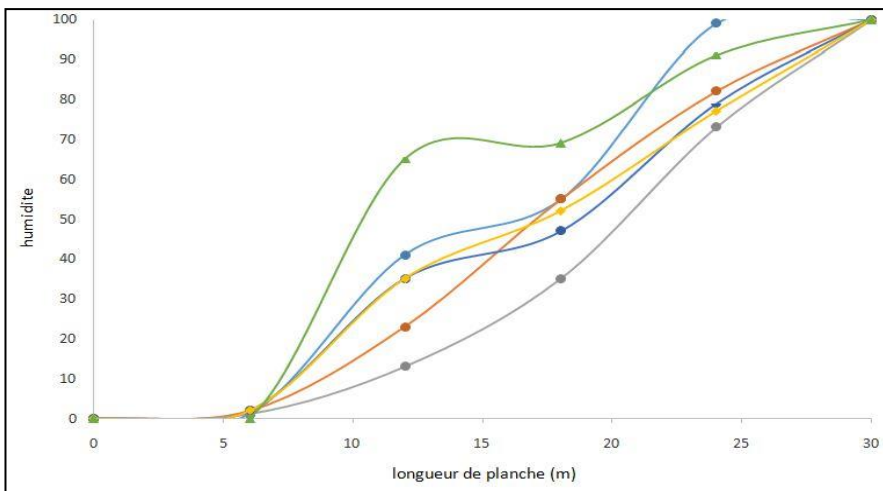
Planche n°3 :



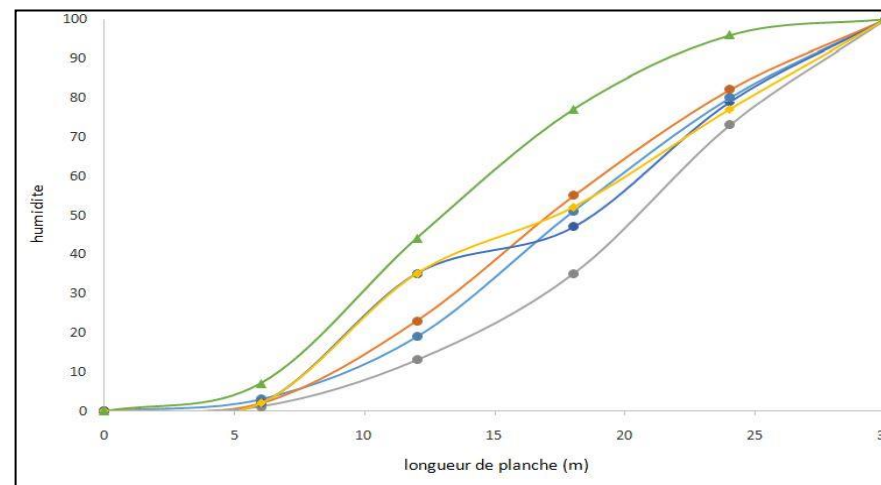
Expérience n°1



Expérience n°2



Expérience n°3



Expérience n°4

Figure n° VI.4 : Humidité du sol (%) le long de planche (Planche n°3)

IV.2.1.2. L'avancement de l'eau :

Les figures n° IV.5, IV.6 et IV.7 représentent le temps d'avancement de l'eau en fonction de la longueur de la planche, on a trouvé que le temps d'avancement de l'eau augmente progressivement avec la longueur de la planche. Par ailleurs les graphes de l'avancement montrent que le temps de l'avancement est fixe après chaque arrosage.

IV.2.2. Etude de l'humidité d'air et de la température :

Pour l'humidité d'air et de la température qui sont mesurés à l'aide de DHT22, les résultats (Annexe B) montrent : (Annexe B)

D'un part une augmentation de température dans chaque expérience faite au niveau des 3 planches.

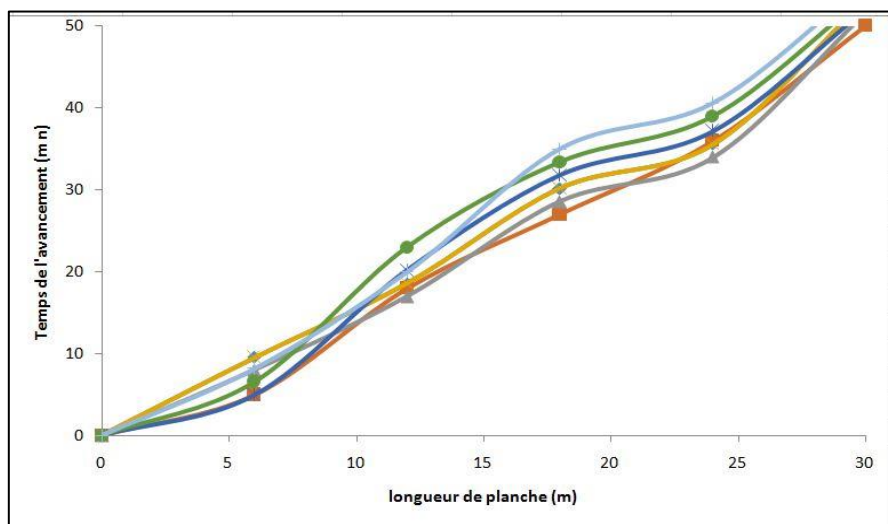
- Pour l'expérience n°1 : les températures allant de 25.4C° jusqu'à 46.C°.
- Pour l'expérience n°2 : les températures allant de 29.4C° jusqu'à 44.5 C°.
- Pour l'expérience n°3 : les températures allant de 38.4C° jusqu'à 48 C°.
- Pour l'expérience n°4 : les températures allant de 40.4C° jusqu'à 44.7 C°.

D'autre part, on remarque une diminution de pourcentage d'humidité d'air au niveau des 3 planches dans les 4 expériences.

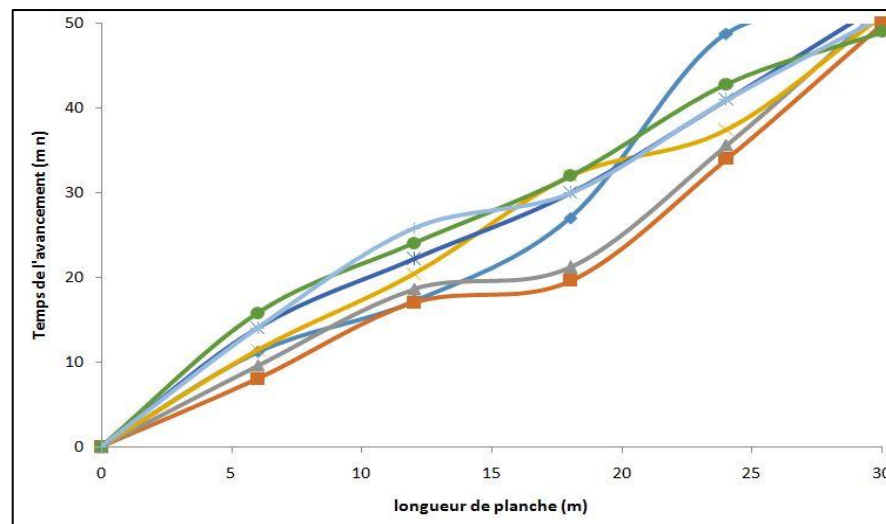
- Pour l'expérience n°1 : l'humidité d'air allant de 14.5 % jusqu'à 9.2 %.
- Pour l'expérience n°2 : l'humidité d'air allant de 17.7 % jusqu'à 14.4 %
- Pour l'expérience n°3 : l'humidité d'air allant de 13.5 % jusqu'à 7.4 %
- Pour l'expérience n°4 : l'humidité d'air allant de 18.2 % jusqu'à 10.5 %

Ces résultats confirment l'aridité du climat dans la région d'étude.

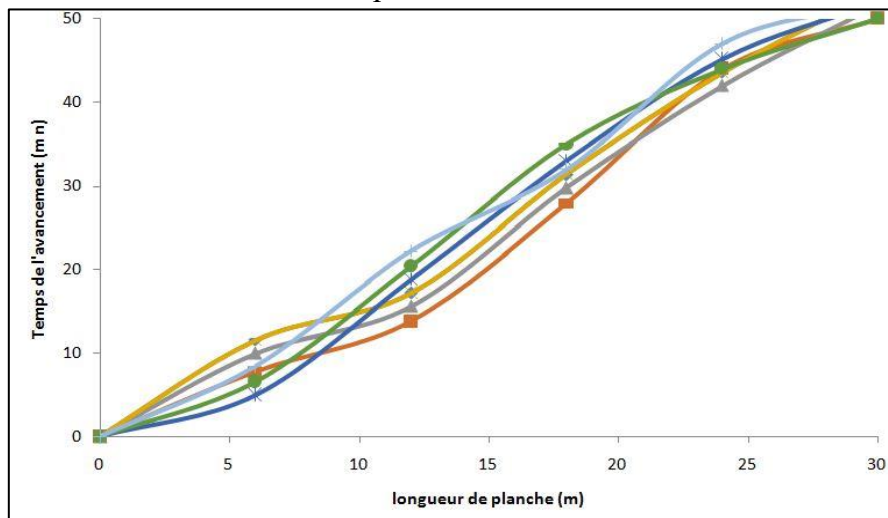
Planche n°1 :



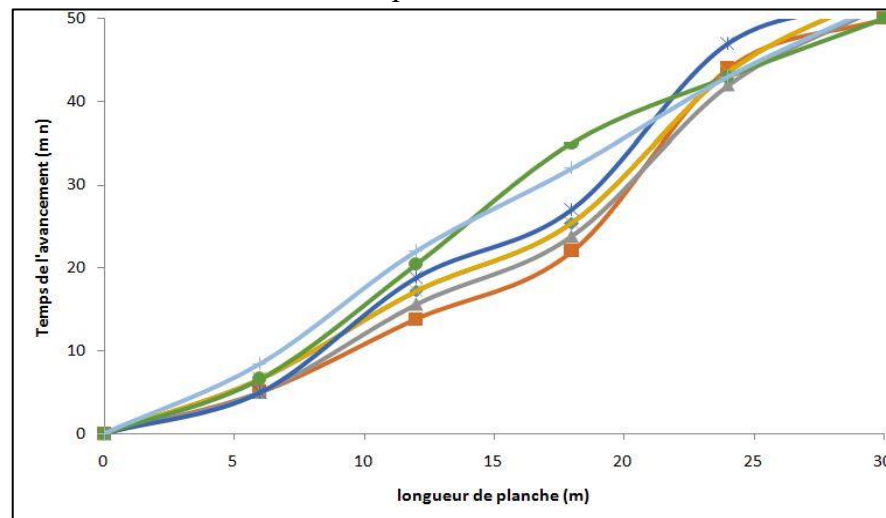
Expérience n°1



Expérience n°2



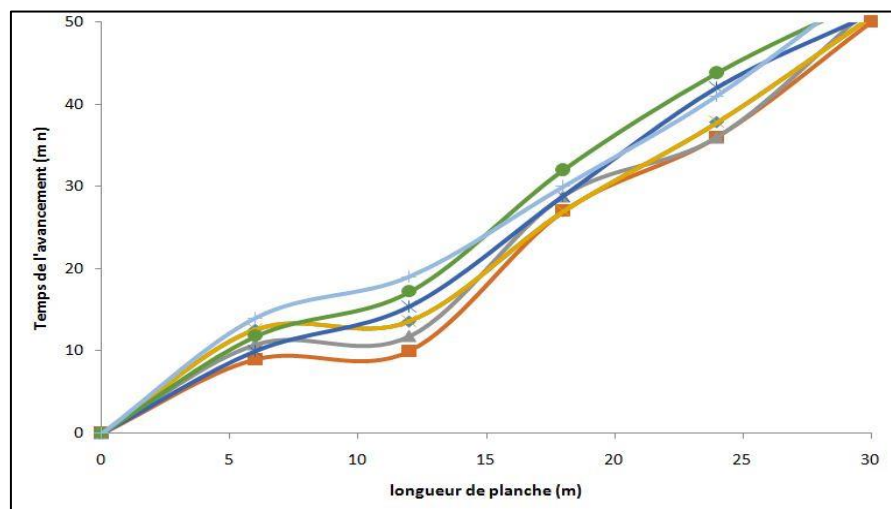
Expérience n°3



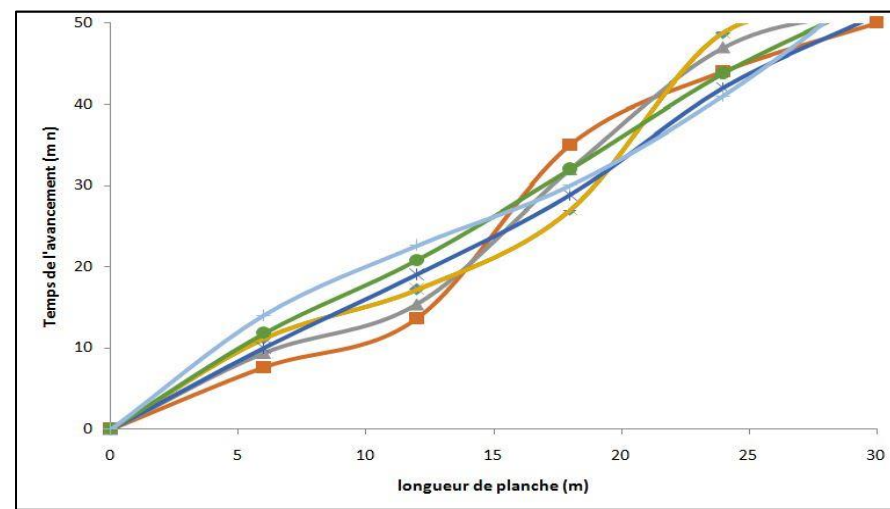
Expérience n°4

Figure n° IV.5 : Avancement de l'eau dans la planche n°1 pour les 4 expériences

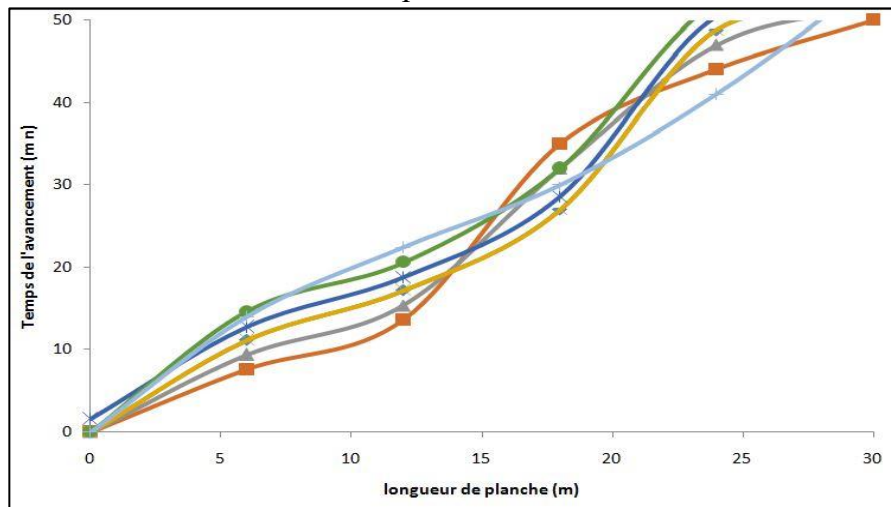
Planche n°2 :



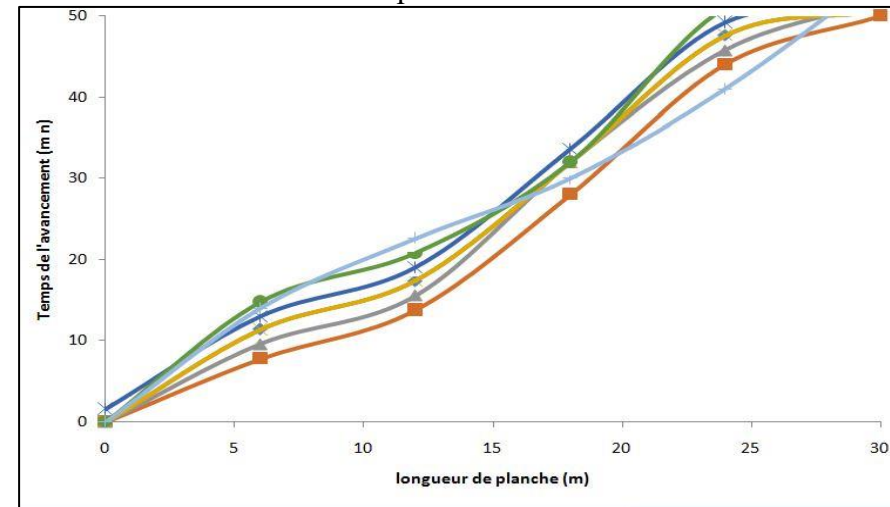
Expérience n°1



Expérience n°2



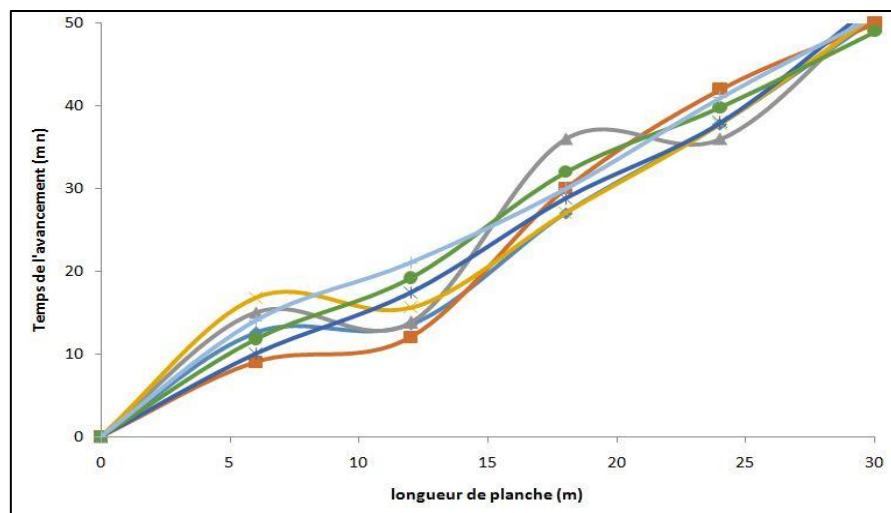
Expérience n°3



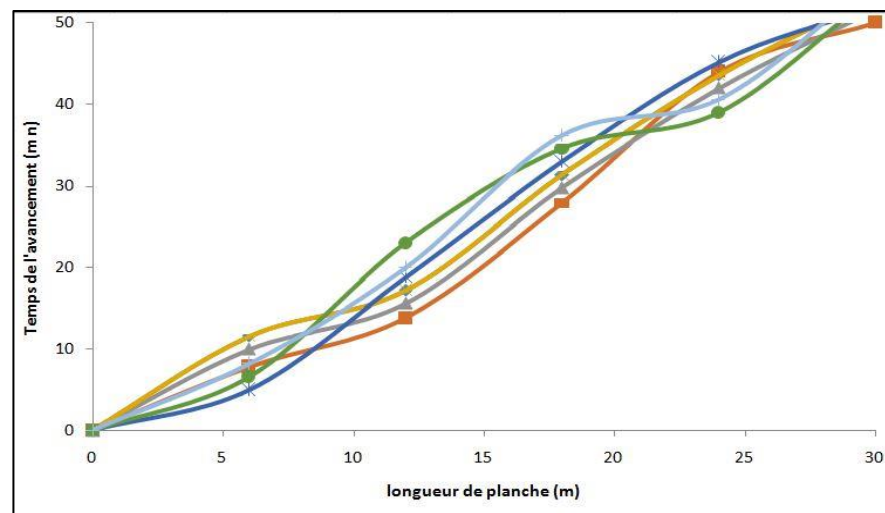
Expérience n°4

Figure n° IV.6 : Avancement de l'eau dans la planche n°2 pour les 4 expériences

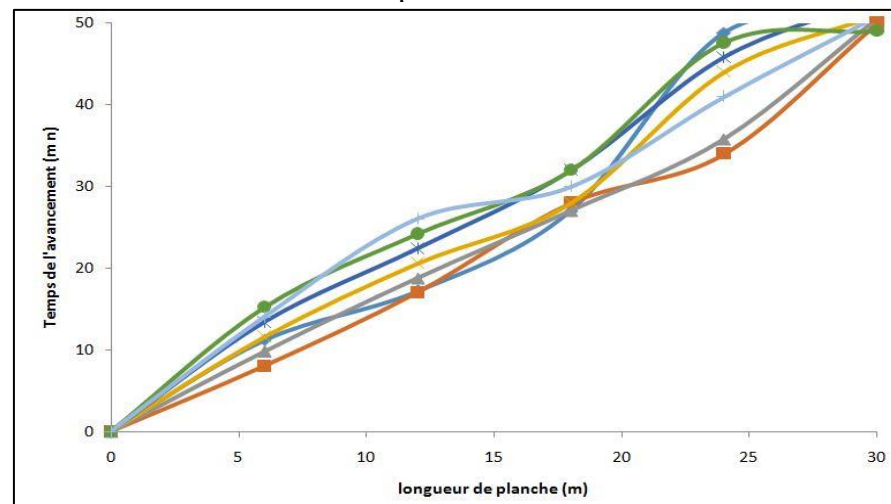
Planche n°3 :



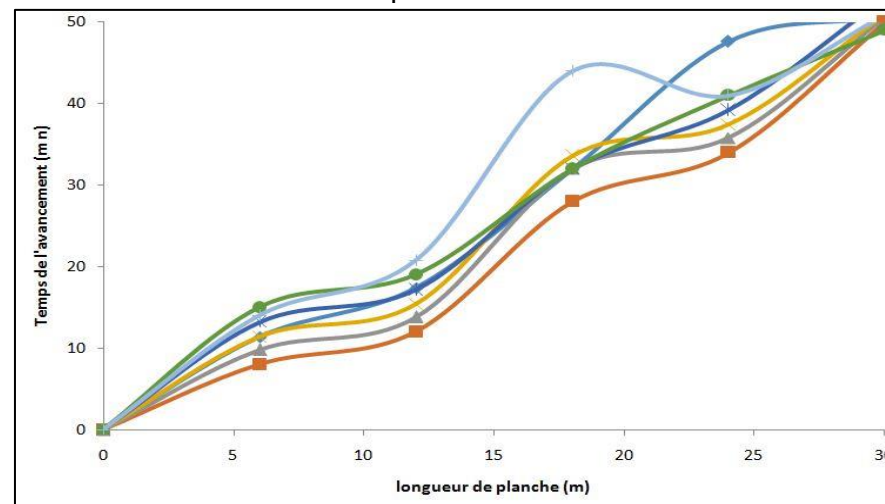
Expérience n°1



Expérience n°2



Expérience n°3



Expérience n°4

Figure n° IV.7 : Avancement de l'eau dans la planche n°3 pour les 4 expériences

Conclusion :

Dans ce dernier chapitre, nous avons explicité les différentes étapes qui nous ont permis de mettre en place le système de mesure et suivre l'humidité du sol dans le temps le long de la planche irriguée. Grâce à l'enregistreur de données, l'amélioration de la précision des mesures acquises par le DHT22 et les 6 capteurs d'humidité du sol, ils sont évidents.

D'un part l'étude de l'humidité du sol dans les 4 expériences pour les 3 planches d'irrigation, montre l'augmentation de pourcentage de l'humidité le long de planche est due à la forte pente longitudinale des planches.

D'autre part l'étude de l'humidité d'air et de la température les mesures varient logiquement selon situation climatique du site expérimental. Ceci nous assure le climat aride de la région d'étude.

Conclusion générale

Conclusion générale

A la fin de cette étude qui a été vivante, entraînante et motivante pour la suite de nos études :

- ➔ Nous avons pu mettre en évidence tous les aspects de notre projet de fin d'études consistant à une étude expérimentale d'humidité de sol dans l'irrigation par planches sous les conditions arides (Cas d'Ouargla)
- ➔ Nous avons développé tous les aspects pratiques de cette étude à savoir : le choix du matériel, la réalisation, la mise en test sur un terrain agricole, le relevé des mesures pertinentes et les tracés des résultats obtenus,
- ➔ Nous avons étudié l'humidité du sol et sa répartition le long des trois planches durant quatre expériences, qui a déterminé l'augmentation de l'humidité avec la longueur de la planche qui a une forte pente., ainsi que on a aussi étudié l'humidité d'air et la température qui a confirmé l'aridité du climat de la région.

L'avantage de ce projet est qu'il peut servir de base pour contrôler et surveiller l'humidité du sol. Cela améliore les décisions d'irrigation, apporter seulement l'eau nécessaire à la plante au bon moment procure une vigueur accrue des plants, des rendements optimaux des cultures, une meilleure qualité des récoltes, une résistance des plantes aux maladies, une plus grande valorisation de l'eau et une diminution du coût de l'irrigation.

Références Bibliographiques

Références Bibliographiques

- 1- CLIMATE-DATA .ORG
- 2 - <https://www.arduino.cc/reference/en/libraries/dht-sensor-library/>
- 3- Agralis services : Les sondes capacitatives mesurent l'humidité des sols et elles vous aident à prendre des décisions pour irriguer vos cultures. Une bonne gestion de l'eau démarre par une analyse scientifique des besoins en humidité des plantes... avec des sondes capables de vous restituer des données objectives.
- 4- « Agriculture : un arrosage intelligent à énergie solaire ».
- 5- Azougagh M : Transfert de technologie en agriculture bulletin mensuel d'information et de liaison du PNTTA.MADREEF/ DERD N81, 2001.
- 6- ANRH : Inventaire des forages et enquête sur les débits extraits de la Wilaya de Ouargla. Agence Nationale des Ressources Hydrauliques. Ouargla, Algérie, 2001.
- 7- Benlarbi Dalila : Evaluation de l'infiltration dans l'irrigation par planches dans la region de ouargla, mémoire de magister en hydraulique, 2003
- 8- Brouwer. C : Méthodes d'irrigation ; Institut international pour l'amélioration et la mise en valeur des terres : FAO 1990
- 9- Bellaoueur Abd El Aziz : Etude hydrogéologique des eaux souterraines de la région de Ouargla soumise à la remontée des eaux de la nappe phréatique et Perspectives de solutions palliatives (Sahara Nord-Est Septentrional - Algérie) ; mémoire de magister en géologie du génie civil et des milieux aquifères, 2008
- 10- Berkaoui Nadia, Tadount Amel : Le financement public de l'irrigation en agriculture : Cas de la « wilaya de Tizi-Ouzou », master académique en sciences économiques, 2019.
- 11- Belkacem. I : L'irrigation intelligente, GDN, 15th annual global développement conférence, Ghana, 2014.
- 12- Hamim Asma, Mme Menaaf Hafida : L'effet de deux systèmes d'irrigation aspersion et goutte à goutte sur l'évolution du profil salin du sol le cas de Hassi ben Abdallah, mémoire de master académique, sciences Agronomiques, 2018.
- 13- IDDER M. A., BENSACI M, OUALAN M. et PINTUREAU B., 2007. Efficacité comparée de trois méthodes de lutte contre la Cochenille blanche du Palmier dattier dans la région d'Ouargla

(Sud–est algérien) (Homoptera, Diaspididea). Bulletin de la Société Entomologique de France, 112 (2), 191 – 196. <http://www.lasef.org/index.htm>.

14- Kambouche Sofiane, Attou Ismail : Conception et réalisation d'un système d'agriculture intelligent, Mémoire de Master en Génie Electrique Spécialité, 2018.

15- Lahlouh Mohamed Ridha, Azizou Abderrahmane : Etude et réalisation d'un système d'irrigation automatique, mémoire de master en automatique et informatique industriel, 2018.

16- Ministère de l'Aménagement du Territoire, de l'Environnement et de la ville : Schéma de l'espace de programmation territoriale. Espace Sud-Est : Biskra – El Oued - Ouargla - Ghardaïa. Mission I : Bilan diagnostic, 2013.

17- Salhi Ammar et Boukerker Hatem : Etude et réalisation d'un système d'irrigation intelligente, mémoire de master filière : Electronique industrielle, 2021.

18- Sabri Islem et Bahria Mohamed El Amine : Réalisation d'un système agriculture hors-sol automatique (l'agriculture jardin intérieur) mémoire de fin de formation, « Technicien Supérieur en maintenance des équipements informatique Et bureautique, 2020.

19- Shortt. R et All : Surveiller l'humidité du sol pour améliorer les décisions d'irrigation, fiche technique du ministère de l'Agriculture, de l'Alimentation et des Affaires rurales, Canada, 2019.

ANNEXES

ANNEXE A

Programme SD Humidity sensor :

```
#include <SPI.h>
#include <SD.h>
#include <dht.h>
// MOSI - pin 11
// MISO - pin 12
// CLK - pin 13
// CS - pin 4
dht DHT;
float hum;
float temp;
const int chipSelect = 4;
//$$$$$sensor1
int sensorPin1 = A0;
int sensorValue1;
int H1;
//$$$$$sensor2
int sensorPin2 = A1;
int sensorValue2;
int H2;
//$$$$$sensor3
int sensorPin3 = A2;
int sensorValue3;
int H3;
//$$$$$sensor4
int sensorPin4 = A3;
int sensorValue4;
int H4;
//$$$$$sensor5
int sensorPin5 = A4;
```

```

int sensorValue5;
int H5;
//§§§§§§§§sensor6
int sensorPin6 = A5;
int sensorValue6;
int H6;
File Resultat;
void setup() {
  // Open serial communications and wait for port to open:
  Serial.begin(9600);
  while (!Serial) {
    ; // wait for serial port to connect. Needed for native USB port only
  }
  Serial.print("Initializing SD card...");

  // see if the card is present and can be initialized:
  if (!SD.begin(chipSelect)) {
    Serial.println("Card failed, or not present");
    // don't do anything more:
    return;
  }
  Serial.println("card initialized.");
}
void loop() {
  //§§§§§§§§DHT22 sensor
  int chk=DHT.read22(2);
  hum=DHT.humidity;
  temp=DHT.temperature;
  ///§§§§§§§§ H1
  sensorValue1 = analogRead(sensorPin1);
  H1=map(sensorValue1,1023,200,0,100);

```

```

//§§§§§§ H2
sensorValue2 = analogRead(sensorPin2);
H2=map(sensorValue2,1023,200,0,100);
////§§§§§§ H3
sensorValue3 = analogRead(sensorPin3);
H3=map(sensorValue3,1023,200,0,100);
////§§§§§§ H4
sensorValue4 = analogRead(sensorPin4);
H4=map(sensorValue4,1023,200,0,100);
// //§§§§§§ H5
sensorValue5 = analogRead(sensorPin5);
H5=map(sensorValue5,1023,200,0,100);
// //§§§§§§ H6
sensorValue6 = analogRead(sensorPin6);
H6=map(sensorValue6,1023,200,0,100);
File Resultat = SD.open("data.txt", FILE_WRITE);
  if (Resultat) {
Resultat.println("humidity=");
Resultat.println(hum);
Resultat.println("temperature=");
Resultat.println(temp);
Resultat.println("H1=");
Resultat.println(H1);
Resultat.println("H2=");
Resultat.println(H2);
Resultat.println("H3=");
Resultat.println(H3);
Resultat.println("H4=");
Resultat.println(H4);
Resultat.println("H5=");
Resultat.println(H5);

```

```
Resultat.println("H6=");
Resultat.println(H6);
Resultat.close();

Serial.println("humidity=");
Serial.println(hum);
Serial.println("temperature=");
Serial.println(temp);
Serial.println("H1=");
Serial.println(H1);
Serial.println("H2=");
Serial.println(H2);
Serial.println("H3=");
Serial.println(H3);
Serial.println("H4=");
Serial.println(H4);
Serial.println("H5=");
Serial.println(H5);
Serial.println("H6=");
Serial.println(H6);
}
// if the file isn't open, pop up an error:
else {
    Serial.println("error opening datalog.txt");
}
delay(30000);
}
```

ANNEXE B

Expérience n°1 : 1-08-2022



Photo n° 2 : Expérience n°1

Expérience n°2 : 11-08-2022



Photo n° 3 : Expérience n°2

Expérience n°3 : 18-08-2022



Photo n° 4 : Expérience n°3

Expérience n°4 : 22-08-2022



Photo n° 5 : Expérience n°4

