

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**

**Ministère de L'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique**



**Université Kasdi Merbah Ouargla**



**FACULTÉ DES SCIENCES APPLIQUÉES**

**Département de : Génie Civil et Hydraulique**

**Mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention du diplôme de**

**Master, Filière: Hydraulique**

**Spécialité : Ressources Hydriques**

C:.....  
R:.....

**Thème**

**Détermination de l'Evapotranspiration du sol  
(expérimentalement et à l'aide de formules) dans le  
cas de nano- irrigation dans les régions arides**

**Présenté par :**

- ❖ **BOUDJEMA Saida**
- ❖ **HAFSI Manel**

**Soumis au jury composé de :**

<b>BOUTOUTAOU Djamel</b>	<b>Professeur</b>	<b>Université Ouargla</b>	<b>Président</b>
<b>BOUAMRANE Ali</b>	<b>M.C.B</b>	<b>Université Ouargla</b>	<b>Examineur</b>
<b>OULHACI Dalila</b>	<b>M.C.A</b>	<b>Université Ouargla</b>	<b>Encadreur</b>

*Année Universitaire: 2019 / 2020*

# *Remerciements*

Je remercie Allah, le tout puissant, le miséricordieux, de m'avoir appris ce que j'ignorais, de m'avoir donné la santé et la patience et tout ce dont j'avais besoin pour réaliser le travail imposé et rédiger ce mémoire.

Nos vifs remerciements et nos respects les plus distingués vont à notre encadreur Dr. OULHACI Dalila pour avoir d'abord proposé ce thème, pour le savoir et l'expérience qu'elle nous a apporté aussi bien en irrigation qu'en de nombreux autres domaines. Nous tenons également à saluer sa disponibilité durant cette période difficile. Enfin nous la remercions pour la confiance qu'elle nous a accordée, elle était accompagnée d'un soutien sans lequel il nous aurait été difficile d'achever ce travail.

Nous remercions chaleureusement, aussi Dr. SAGGAI Sofiane pour ses conseils judicieux, ses orientations, son encouragement tout au long de ce travail.

Nous tenons à remercier également le personnel du laboratoire Génie civil de la Faculté des Sciences Appliquées, Université Kasdi Merbah Ouargla, particulièrement Monsieur KCHIRAD Ali qui nous a beaucoup aidé aux cours des essais expérimentaux.

C'est avec un grand plaisir que nous adressons nos remerciements Pr. BOUTOUTAOU Djamel, enseignant au département de Génie civil et Hydraulique la faculté des sciences et de la technologie de l'université Kasdi Merbah-Ouargla, pour nous avoir honner en acceptant de présider le jury.

Nous remercions Dr. BOUAMRANE Ali d'avoir accepté d'évaluer ce travail.

Nos vifs remerciements vont également à l'ensemble du personnel de l'équipe de l'exploitation de l'ITAS, le personnel de l'O.N.M de Ouargla et du Laboratoire Travaux Publiques du Sud à Ouargla .

Nous n'oublierons pas le personnel de la Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie, particulièrement Monsieur BELAROUSSI Mohamed, DOUADI et ZENKRI Salah.

Nos vifs remerciements vont également à l'ensemble des enseignants du département de génie civil et hydraulique de l'université de Ouargla pour la formation qu'ils nous ont assuré au long de notre cursus universitaire .

Enfin, nous remercions tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

# *Dédicaces*



*Je rends grâce à ALLAH le TOUT PUISSANT pour tous les  
bienfaits dont il m'a comblé*

*Ce mémoire ayant été rédigé, je le dédie :*

*A ma source de tendresse, l'être le plus cher dans le monde, la  
femme*

*la plus patience, ma très chère mère.*

*Mon idéal, l'être le plus généreux, mon très cher père pour tous  
ses Sacrifices.*

*A mes chers frères Nasreddin*

*A ma très chères sœurs Soumia et Hanane*

*A mon beau-frère Saleh Khamed*

*A toute ma famille surtout ma grande mère*

*A ma tante Aicha*

*A mon binôme Manel HAFSI*

*A mes très amis : Assia, Rima ,Oualid et Madjid*

*✍ Saïda*

# *Dédicaces*



*Je rends grâce à ALLAH le TOUT PUISSANT pour tous les bienfaits dont il m'a comblé*

*Ce mémoire ayant été rédigé, je le dédie :*

*En premier lieu à ma mère et à mon père qui ont fourni beaucoup de sacrifices pour me permettre de réaliser mes objectifs, qu'ils trouvent ici toute ma reconnaissance et ma gratitude.*

*Particulièrement à mes chères sœurs :*

*IMAIN, KAOUTHAR, IKRAM, ainsi qu'à mes chers frères :*

*ALLA EDDINE, REDWANE ET JAOUAD*

*A mon binôme BOUDJAMA SAIDA*

*A tous mes camarades et mes amis*

*A toute ma famille surtout ma grande mère*

*A tous mes enseignants depuis le primaire jusqu'à cet instant*

*Manel*

# Table de matières

<b>Introduction général.....</b>	<b>1</b>
----------------------------------	----------

---

## *Chapitre I*

### **Généralités sur l'évapotranspiration et l'irrigation et la coriandre**

Introduction.....	3
<b>I.1 Évapotranspiration .....</b>	<b>3</b>
I.1.1 Relation entre l'évapotranspiration et les facteurs intervenant dans son processus.....	5
I.1.1.1 Relation entre l'évapotranspiration et les facteurs météorologiques.....	5
I.1.1.2 Relation entre l'évapotranspiration et les facteurs physiques.....	8
I.1.2 Méthodes d'évaluation de l'évapotranspiration .....	8
I.1.2.1 Mesure directe.....	9
I.1.2.2 Méthodes indirectes.....	12
<b>I.2 Irrigation.....</b>	<b>13</b>
I.2.1 Différents technique d'arrosages .....	14
I.2.2 Nano-irrigation.....	19
<b>I.3 Description générale de coriandre .....</b>	<b>20</b>
<b>I.4 Conclusion du chapitre I .....</b>	<b>21</b>

---

## *Chapitre II*

### **Présentation de la zone d'étude**

Introduction.....	22
<b>II.1 Situation géographique .....</b>	<b>22</b>
<b>II.2 Étude climatique de la région .....</b>	<b>23</b>
II.2.1 Températures.....	23
II.2.2 Humidité relative .....	24
II.2.3 Vitesse du vent.....	25
II.2.4 Précipitations.....	266

II.2.5	L'insolation .....	277
II.2.6	Évaporation .....	28
II.3	Synthèse climatique .....	<b>29</b>
II.4	Hydrogéologie.....	<b>34</b>
II.4.1	Nappe du continental intercalaire .....	35
II.4.2	La nappe du complexe terminal (CT) .....	35
II.4.3	Nappe phréatique .....	35
II.5	Conclusion II.....	<b>36</b>

---

### *Chapitre III*

#### **Matériels et méthodes**

	Introduction.....	37
III.1	Site expérimental.....	<b>37</b>
III.1.1	Granulométrie du sol.....	37
III.1.2	Coefficient d'uniformité .....	39
III.1.3	Densité apparente.....	39
III.2	Méthodologie de travail .....	<b>40</b>
III.2.1	Détermination de l'évapotranspiration du sol expérimentalement (méthode directe).....	43
III.2.1.1	Détermination par pesée.....	44
III.2.1.2	Détermination à l'aide d'un humidimètre.....	45
III.2.2	Détermination de l'évapotranspiration à l'aide de formule (méthode indirecte)..	48
III.3	Conclusion du chapitre III .....	<b>53</b>

---

### *Chapitre IV*

#### **Résultats et discussion**

	Introduction.....	54
IV.1	Détermination la quantité d'eau perdue par évaptranspirationoration.....	54
IV.1.1	Détermination par pesée .....	54

IV.1.2 Détermination à l'aide d'un humidimètre.....	59
IV.2 Estimation de l'évapotranspiration à l'aide de formules (Méthodes indirectes).....	<b>63</b>
IV.2.1 L'évapotranspiration potentielle .....	63
IV.2.2 L'évapotranspiration réelle .....	66
IV.3 Discussion .....	<b>67</b>
IV.4 Conclusion du chapitre IV .....	<b>69</b>
<b>Conclusion générale.....</b>	<b>71</b>
<b>Références bibliographiques.....</b>	<b>73</b>

# Liste des figures

## *Chapitre I*

### **Généralités sur l'évapotranspiration et l'irrigation et la coriandre**

Figure I. 1 Évaporation et évapotranspiration .....	3
Figure I. 2 pyranomètre .....	6
Figure I. 3 L' anémomètre .....	7
Figure I. 4 Cuve lysimétrique .....	9
Figure I. 5 Bac classe A.....	10
Figure I. 6 Bac colorado .....	11
Figure I. 7 Evaporomètre de Piche .....	11
Figure I. 8 Irrigation par aspersion .....	14
Figure I. 9 Irrigation par planche.....	15
Figure I. 10 Alimentation des planches par siphon .....	16
Figure I. 11 Irrigation par sillons.....	17
Figure I. 12 Irrigation souterraine.....	19

## *Chapitre II*

### **Présentation de la zone d'étude**

Figure II. 1 Situation géographique de Ouargla .....	22
Figure II. 2 Températures moyennes mensuelles à Ouargla sur la période (2008–2017).....	24
Figure II. 3 Humidité relative moyenne mensuelle à Ouargla sur la période (2008–2017).....	25
Figure II. 4 Vitesses moyenne mensuelle de vent à Ouargla sur la période (2008–2017).....	26
Figure II. 5 Précipitations moyenne mensuelle à Ouargla sur la période (2008–2017).....	27
Figure II. 6 Insolation moyenne mensuelle à Ouargla sur la période (2008–2017).....	28
Figure II. 7 Évaporation moyenne mensuelle à Ouargla sur la période (2008–2017).....	29
Figure II. 8 Diagramme ombrothermique de Gaussen de Ouargla dans la période (2008- 2017) .....	32
Figure II. 9 Climagramme pluviothermique d'Emberger pour la station de Ouargla.....	34
Figure II. 10 Coupe hydrogéologique à travers le Sahara (d'après UNESCO 1972).....	35

## *Chapitre III*

### **Matériels et méthodes**

Figure III. 1 Tamis.....	38
Figure III. 2 Balance.....	38

Figure III. 3 Approche méthodologique .....	43
Figure III. 4 Humidimètre .....	46

---

# Liste des photos

---

## *Chapitre I*

### **Généralités sur évapotranspiration et l'irrigation et la coriandre**

Photo I. 1 Irrigation au goutte à goutte.....	18
Photo I. 2 Nano-Irrigation .....	19
Photo I. 3 Coriandre .....	20

---

## *Chapitre III*

### **Matériels et méthodes**

Photo III. 1 Réseau d'irrigation.....	40
Photo III. 2 Vanne .....	40
Photo III. 3 Alimentation en eau.....	41
Photo III. 4 Mesure du débit .....	41
Photo III. 5 Semence de la coriandre.....	41
Photo III. 6 Evaporimètre .....	41
Photo III. 7 Nano-irrigation.....	42
Photo III. 8 Balance numérique.....	44
Photo III. 9 Humidimètre .....	44
Photo III. 10 Les trous au fond du bac.....	45
Photo III. 11 Pesée du gravier .....	45
Photo III. 12 Pesée du sable.....	45
Photo III. 13 Humidimètre .....	48

---

# Liste des Tableaux

---

## *Chapitre II* **Présentation de la zone d'étude**

Tableau II. 1 Températures moyennes mensuelles enregistrée dans la région de Ouargla entre (2008 –2017 O.N.M, 2018) .....	23
Tableau II. 2 Humidités moyennes mensuelles enregistrée dans la région de Ouargla entre (2008 –2017 O.N.M, 2018) .....	24
Tableau II. 3 Vitesses moyennes mensuelles des vents enregistrés dans la région de Ouargla entre (2008 –2017 O.N.M, 2018) .....	25
Tableau II. 4 Précipitations moyennes mensuelles enregistrées dans la région de Ouargla entre (2008 –2017 O.N.M, 2018) .....	26
Tableau II. 5 L'insolation moyenne mensuelle enregistrée dans la région de Ouargla entre (2008 –2017 O.N.M, 2018) .....	27
Tableau II. 6 Évaporation moyennes mensuelles enregistrée dans la région de Ouargla entre (2008 – 2017 O.N.M, 2018) .....	28
Tableau II. 7 Classification des climats selon l'indice de Martonne .....	30
Tableau II. 8 Indice d'aridité mensuel de Martonne .....	31
Tableau II. 9 les valeurs moyennes mensuelles des précipitations et des températures (2008-2017) .....	31
Tableau II. 10 Températures moyennes des maximas et minimas (2008 à 2017) .....	33

---

## *Chapitre IV*

### **Résultats et discussion**

Tableau IV. 1 Détermination de la quantité d'eau perdue par évapotranspiration par pesée ..	55
Tableau IV. 2 Détermination de l' évapotranspiration à l'aide de l'humidimètre du mois de mars .....	59
Tableau IV. 3 Détermination de l' évapotranspiration à l'aide de l'humidimètre du mois de Juillet .....	61
Tableau IV. 4 Détermination de l'évapotranspiration à l'aide de l'humidimètre du mois d'Août.....	62
Tableau IV. 5 Calcul de l'évapotranspiration annuelle et mensuelle par la formule de Boutoutaou .....	64

Tableau IV. 6 Estimation de l'évapotranspiration mensuelle et journalière avec la formule de Turc.....	64
Tableau IV. 7 Estimation de de l'évapotranspiration mensuelle et journalière avec la formule de Blaney- Criddle.....	64
Tableau IV. 8 Estimation de l'évapotranspiration mensuelle et journalière avec la formule d'Ivanov.....	65
Tableau IV. 9 Détermination de l'évapotranspiration mensuelle et journalière d'après la méthode de Penman.....	65
Tableau IV. 10 Détermination de l'évapotranspiration mensuelle et journalière d'après la méthode de ANRH .....	65
Tableau IV. 11 Détermination de l'indice thermique annuel de la formule de Thornthwaite .	66
Tableau IV. 12 Détermination de l'évapotranspiration mensuelle et journalière d'après la méthode de Thornthwaite .....	66
Tableau IV. 13 Détermination de l'évapotranspiration mensuelle et journalière d'après la méthode de Serra .....	66
Tableau IV. 14 Détermination de l'évapotranspiration mensuelle et journalière d'après la méthode de Serra .....	66
Tableau IV. 15 Détermination de l'évapotranspiration d'après la méthode de Coutagne .....	66
Tableau IV. 16 Résultats de calcul de l'évapotranspiration.....	67
Tableau IV. 17 Résultats de l'erreur entre les deux méthodes expérimentales.....	68
Tableau IV. 18 Erreur entre les valeurs expérimentales et les valeurs calculées de l'évapotranspiration potentielle.....	68

# *Introduction Générale*

## Introduction générale

Le contexte climatique des régions arides est principalement influencé par une irrégularité annuelle et une variabilité interannuelle très marquées des précipitations et une hétérogénéité de leur distribution. Les ressources en eau sont de plus rares et souvent de mauvaise qualité. Du fait de l'extrême faiblesse des précipitations en zones arides l'eau nécessaire à la végétation des plantes est fournie à partir des ressources superficielles (cours d'eau, oueds, crues ....) et souterraines (sources résurgentes, nappes phréatique, nappes profondes ....). [73]

Dans les régions à précipitations irrégulières, on irrigue pendant les périodes de sécheresse pour assurer une bonne récolte et accroître la production. Toutes les techniques d'irrigation ont des avantages et des inconvénients, des efforts sont fournis pour améliorer ces techniques pour avoir un bon rendement et surtout pour économiser l'eau.

L'eau est un élément constitutif de la plante, les tissus végétaux en contiennent de 60 à 95% et chaque kilogramme de matière sèche nécessite pour son élaboration une quantité, qui varie selon les espèces et les conditions climatiques. [32], [35]

Etant donné l'importance que prend l'irrigation dans le monde, il est utile de connaître les quantités d'eau à apporter aux cultures pour avoir un bon rendement. Ces quantités sont liées de près aux conditions climatiques, (en particulier évapotranspiration potentielle élevée au Sahara), mais aussi à la biologie de la plante, à sa place dans l'étagement des cultures de la palmeraie et à la nature du sol. [73]

Le manque d'eau et l'accroissement constant des besoins en eau en agriculture, conjugués aux conflits d'usage avec les autres secteurs, tels que l'industrie et la consommation en eau potable, amène constamment à réfléchir sur les économies d'eau et d'énergie. Ceci passera forcément par une gestion efficace de l'irrigation ainsi que par la maîtrise de l'utilisation et le choix des systèmes d'irrigation. L'utilisation de techniques d'irrigation innovantes et efficaces, pour économiser l'eau, est donc une option intéressante pouvant contribuer à la pérennité des surfaces cultivées. Avec l'irrigation, l'agriculteur dispose d'un puissant levier pour accroître et régulariser la production de ses cultures, à condition de pouvoir maîtriser son irrigation, afin de satisfaire les objectifs techniques (rendements) et économiques (au coût optimal) visés. La performance d'une installation d'irrigation dépendra du bon choix de la technique et du système d'irrigation et de la bonne mise en place des équipements sur la base de la parfaite connaissance des informations techniques et économiques liées aux conditions de l'exploitation. L'irrigation est pratiquée

dans toutes les régions du monde lorsque les précipitations ne fournissent pas suffisamment d'humidité au sol. Dans les zones arides, l'irrigation doit débiter dès le semis.

Le problème est de trouver une méthodologie d'irrigation qui conduit à une humidification uniforme sur la hauteur des racines avec le minimum de pertes d'eau par évaporation. C'est la raison pour laquelle il a été décidé de développer une méthodologie d'irrigation qui consiste à donner une petite quantité d'eau le long de la rigole appelée (Nano-irrigation).

La dose d'irrigation est la quantité d'eau qu'il faut à chaque irrigation pour recharger en eau le réservoir sol, alimenter la plante et compenser l'évapotranspiration (SOGREAH,1976).

Cette dose dépend de l'état de remplissage du sol, et des besoins de plante qui sont variables par rapport aux stades de développement.

L'évapotranspiration est donc un paramètre essentiel pour la détermination de la quantité d'eau nécessaire à la plante. Cette étude vise à sa détermination expérimentalement et théoriquement.

On divise cette étude en chapitres comme suit :

Dans le premier chapitre, on fera une étude bibliographique sur l'évapotranspiration, l'irrigation, et la culture cultivée <<la coriandre>>.

Dans le chapitre deuxième, on donnera un aperçu sur la région d'étude, et sur les méthodes de détermination de l'évapotranspiration.

Dans le troisième chapitre on expliquera la méthodologie de travail.

Dans le quatrième chapitre on présentera les résultats expérimentaux et théoriques avec une interprétation.

Et on terminera par une conclusion et quelques recommandations.

*Chapitre I*

*Généralités sur l'évapotranspiration et  
l'irrigation et la coriandre*

## Introduction

Étant donné l'importance que prend l'irrigation dans le monde, il est utile de connaître les quantités d'eau à apporter aux cultures pour avoir un bon rendement.

Pour la détermination des besoins en eau d'irrigation, il est nécessaire de connaître les différents termes qui composent le bilan hydrique qui est une équation hydrique donnant la relation entre les entrées, les sorties et le stock d'eau sur une période donnée.

L'évapotranspiration réelle est comptée dans les sorties du bilan hydrique. Par conséquent tout calcul de réseau d'irrigation doit être basé sur une estimation de l'évapotranspiration.

Dans les conditions naturelles, chaque fois qu'il y a un couvert végétal plus ou moins continu, on utilise donc le terme d'évapotranspiration comme étant la consommation de l'eau d'un couvert végétal. L'évapotranspiration est particulièrement importante dans les milieux arides et semi arides du monde.

On choisit pour notre étude comme culture « la coriandre » suite à ses principales caractéristiques. Elle est cultivée dans les zones arides et semi-arides, a une croissance rapide et un cycle court. La levée est assez rapide puisqu'elle a lieu environ 10 jours après le semis.

On donne dans ce chapitre des généralités sur l'évapotranspiration, l'irrigation et la coriandre.

## Évapotranspiration

L'évapotranspiration est une composante très importante qui entre en jeu dans la détermination de la dose d'irrigation, elle comprend deux termes essentiels :

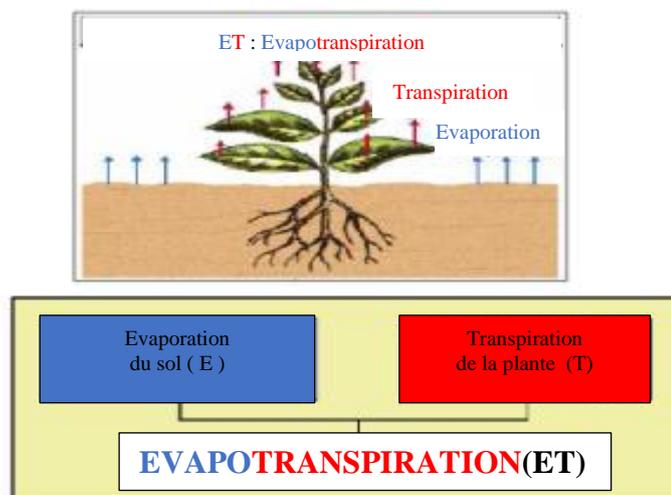


Figure I. 1: Évaporation et évapotranspiration

Evaporation des surfaces du sol, et la transpiration physiologique des végétaux et des plantes. Ce qui donne Evapotranspiration (Figure I.1)

L'évaporation à la surface des sols et la transpiration des végétaux conditionnent le plus souvent le "déficit d'écoulement" d'un bassin, à l'exception des terrains particulièrement poreux ou fissurés. La quantité d'eau à disposition est un facteur limitant dans le cas de l'évaporation d'un sol nu. En résumé, l'évaporation d'un sol nu est donc influencée d'une part par la demande évaporative, et d'autre part par la capacité du sol à répondre à cette demande et sa capacité à transmettre de l'eau vers la surface .[52]

L'évapotranspiration est une combinaison de deux processus : l'évaporation et la transpiration (Figure I. 1) L'évaporation, ou plus précisément l'évaporation directe, désigne l'eau qui s'évapore à partir d'un sol (nu) ou d'un plan d'eau. Autrement, l'évaporation est un transfert de l'eau, à partir de la surface du sol vers l'atmosphère.

#### **a) L'évapotranspiration potentielle**

L'évapotranspiration potentielle (comme une référence) et on la définit comme étant l'évapotranspiration d'un couvert végétal bas. Il s'agit d'une notion théorique qui se définit comme la quantité maximale d'eau que pourrait évaporer une surface terrestre pour laquelle l'eau ne serait pas un facteur limitant. [7]

#### **b) L'évapotranspiration Maximale (ETM)**

Quand la plante produit le maximum de matière sèche donnant un rendement maximum. Aussi l'évapotranspiration maximale est mesurée expérimentalement par les cases lysométriques et comparée à l'E.T.P .[21]

#### **c) L'évapotranspiration Réelle (ETR)**

C'est l'évapotranspiration d'un couvert végétal dans des conditions réelles données : l'alimentation en eau de la plante peut être limitée par des contraintes d'ordre physique (succion du sol),

C'est la valeur de l'évapotranspiration dans le cas d'une alimentation en eau insuffisante de la plante. En pratique, la détermination de l'évapotranspiration réelle (ETR) avec une précision suffisante est un problème commun à ceux qui, à titres divers (agronomes, hydrologues, météorologistes) .[20]

La transpiration désigne la transpiration des végétaux à travers les stomates (micropores par lesquels l'eau s'évapore) de leurs feuilles. Les racines des végétaux captent l'eau qui se trouve dans le sol. Une fois parvenue aux feuilles, une partie de l'eau va s'évaporer à travers les stomates des feuilles. L'autre partie va servir à la photosynthèse.[60]

L'air ambiant n'est jamais sec mais contient une part plus ou moins importante d'eau sous forme gazeuse de par :

➤ **L'évaporation physique**

L'évaporation est le processus par lequel l'eau sous forme liquide se transforme en gaz (vaporisation) et peut s'échapper de la surface évaporatoire. L'eau peut s'évaporer à partir de nombreuses surfaces comme les lacs, les rivières, les sols, les routes et la végétation mouillée.

Au-dessus des surfaces d'eau libre, des sols dépourvus de végétation et des surfaces couvertes par de la neige ou de la glace.[60]

➤ **La transpiration des végétaux**

Évaporation physiologique qui permet à la vapeur d'eau de s'échapper des plantes vers l'atmosphère.

En hydrologie, on utilise le terme générique d'évapotranspiration pour prendre en compte la combinaison de ces deux processus qui ont lieu généralement simultanément dans la situation d'un sol couvert par de la végétation.[60]

### **Relation entre l'évapotranspiration et les facteurs intervenant dans son processus**

L'évapotranspiration dépend essentiellement de deux facteurs associés à des facteurs météorologiques (la quantité de chaleur à disposition, la capacité de l'air à stocker de l'eau) mais aussi de facteurs physiques liés aux surfaces évaporantes. [1]

#### **I.1.1.1 Relation entre l'évapotranspiration et les facteurs météorologiques**

##### **A. Température de l'air**

La quantité d'eau évaporée est influencée par les variations de la température. Le pouvoir évaporant de l'air augmente avec l'élévation de la température qui a son tour fait varier le taux de saturation de l'air. [18]

La mesure de la température repose sur une grande diversité de méthodes à l'exemple :

- La thermo-sonde
- Le thermocouple
- Rayons infrarouges
- Des captures de type mécanique et acoustique.
- La mesure action thermique.

##### **B. Le rayonnement solaire**

Ce paramètre est un facteur énergétique important dans la mesure où il a provoqué l'évaporation. En fait, il représente la source d'énergie nécessaire pour mettre en œuvre cette

dernière sur une surface évaporant. Le bilan énergétique au niveau de n'importe quelle surface évaporant est déterminé par :

- L'énergie du soleil.
- Émission vers l'atmosphère d'une partie de la chaleur reçue.

Le bilan entre l'énergie reçue et l'énergie perdue représente l'énergie utilisée pour la mise en forme de l'évaporation, et la fonction transpiratoire de la plante.

L'énergie à la surface du sol se fait par le rayonnement solaire. La mesure du rayonnement nous fournit des renseignements sur la source de sur rayonnement. [74]

A la surface du sol on trouve :

- Le rayonnement global RG
- Le rayonnement solaire direct I.
- Le rayonnement solaire diffuse Rd.
- Le rayonnement atmosphérique Ra
- Le rayonnement du sol Rs.

On utilise pour la mesure du rayonnement émis des pyranomètres (Figure I.2)



**Figure I. 2 : Pyranomètre [10]**

### **C. Le vent**

Le vent est la partie essentielle et intégrante du calcul de l'évapotranspiration. Le rôle du vent dans l'atmosphère c'est qu'il remplace les masses d'air humides en tenant la surface évaporant par des masses d'air sèches.

La vitesse d'évaporation augmente avec ce processus du renouvellement de l'air au-dessus de la surface évaporant.[59]

L'augmentation de l'évaporation s'explique par l'augmentation de la vitesse du vent, et de la grande sécheresse.[67] Le vecteur vent peut-être caractérisé par deux nombres représentant son orientation « direction du vent » et son module « vitesse du vent ».

On mesure la vitesse du vent à l'aide d'anémomètres, ils sont classés en quatre catégories :(Figure I.3)

- Les anémomètres utilisant l'énergie cinétique de l'air.
- Les anémomètres utilisant la pression exercée par le vent.
- Les anémomètres thermiques
- Les anémomètres soniques



**Figure I. 3 : Anémomètre[10]**

#### **D. L'Humidité de l'air**

L'humidité de l'air est un paramètre climatique très important par rapport aux autres paramètres. L'approvisionnement en énergie du soleil et de l'air environnant est la force d'entraînement principale pour vaporisation de l'eau, la différence entre la pression de vapeur d'eau à évaporer la surface et l'air environnant est le facteur détermination pour l'extracteur de vapeur. [44]

#### **E. La pression de l'air**

Le pouvoir évaporant se trouve en rapport inverse à la pression de l'air. Une élévation de la pression de l'air provoque une diminution de l'évaporation.[59]

"La vitesse d'évaporation est inversement proportionnelle à la pression de l'air au-dessus du liquide, et qui dépend par ailleurs de la tension de la vapeur qui se trouve déjà au-dessus du liquide. La vapeur d'eau maximale croit linéairement avec la température".[26]

## **Conclusion**

Finalement, les facteurs cités sont indépendants l'un de l'autre et agissent tous sur le pouvoir évaporant. Ce qui donne au phénomène d'évaporation un caractère très complexe. Ce qui a pour conséquence une application des formules très difficile, dans les conditions géographiques et climatiques de l'expérimentation.

### **I.1.1.2 Relation entre l'évapotranspiration et les facteurs physiques**

Les facteurs influençant l'évapotranspiration à partir d'un sol nu sont :

#### **a. Teneur en eau du sol**

La teneur en eau du sol conditionne les processus d'évapotranspiration. Plus le sol est sec et plus les flux évaporés seront faibles. A l'inverse, un sol saturé peut même évaporer de l'eau à un taux supérieur à celui d'une surface d'eau libre vu que le microrelief du sol peut constituer une surface évaporant plus importante que celle d'un lac ou d'un réservoir.[52]

#### **b. Capillarité**

Dans le cas où le sol est relativement peu humide et dans la situation d'un sol nu en l'absence de nappe, le régime d'évaporation est fixé par la plus petite des contraintes entre les conditions météorologiques et la capacité du sol à transmettre de l'eau vers sa surface. Dans ce cas, les remontées capillaires permettent d'amener de l'eau jusqu'au front d'évaporation.[52]

#### **c. Couleur du sol et albédo**

Les sols de couleur claire présentant des valeurs d'albédo élevées vont absorber moins de rayonnement que des sols foncés. Toutefois, dans le cas où la quantité d'eau n'est pas un facteur limitant, les écarts entre l'évaporation d'un sol clair et celui d'un sol foncé ne sont généralement que de l'ordre de quelque pour cent, l'avantage étant donné au sol foncé [52]. Différents types de l'évapotranspiration.

Pour mieux étudier le phénomène de l'évapotranspiration, il est utile de distinguer différentes formes de l'évapotranspiration :

## **Méthodes d'évaluation de l'évapotranspiration**

L'estimation de l'évapotranspiration est importante pour les programmes d'irrigation, la planification et la gestion des ressources en eau .[80] ,[3],[8],[42],[39],[53],[29]

Mais l'évapotranspiration (ET) est l'une des composantes du cycle hydrologique les plus difficiles à quantifier du fait de sa complexité dans le système sol-terre- plante.[80],[36]

L'évapotranspiration peut être estimée directement par des instruments de mesure, comme les lys mètres.[46] Les bacs d'évaporation [62],[21], [57],[25], [43] ou les atmomètres [27]

La mise en place et la gestion de ces instruments suppose un coût financier élevé et du personnel qualifié, raison pour laquelle ils sont souvent réservés aux centres de recherche.[70]

Face à cette situation, de nombreuses méthodes ont été développées pour une estimation indirecte de l'évapotranspiration. [60]

### I.1.2.1 Mesure directe

#### A. Mesures par évapotranspiro-mètre ou case lys métrique

Le lys mètre est une cuve étanche enterrée, à parois verticales, ouverte en surface et remplie par une portion de terrain d'une épaisseur de 0,5 à 2m (figure I.4). La végétation et les conditions à chaque niveau, surtout la teneur en eau, sont maintenues sensiblement identiques à celles du terrain en place. Les variations de stock d'eau peuvent alors être mesurées avec précision.

Le lysymètre est pourvu à sa base d'un dispositif recueillant l'eau de drainage. On peut déduire l'évaporation à la surface du terrain de stock par pesée, ou encore des mesures de l'eau du sol et de drainage et des données de précipitations indiquées par un pluviomètre à proximité. L'aire horizontale de la portion de terrain isolée doit être suffisamment grande pour obtenir une bonne précision de la hauteur d'eau évaporée, en théorie à 0,01 mm près.[58]

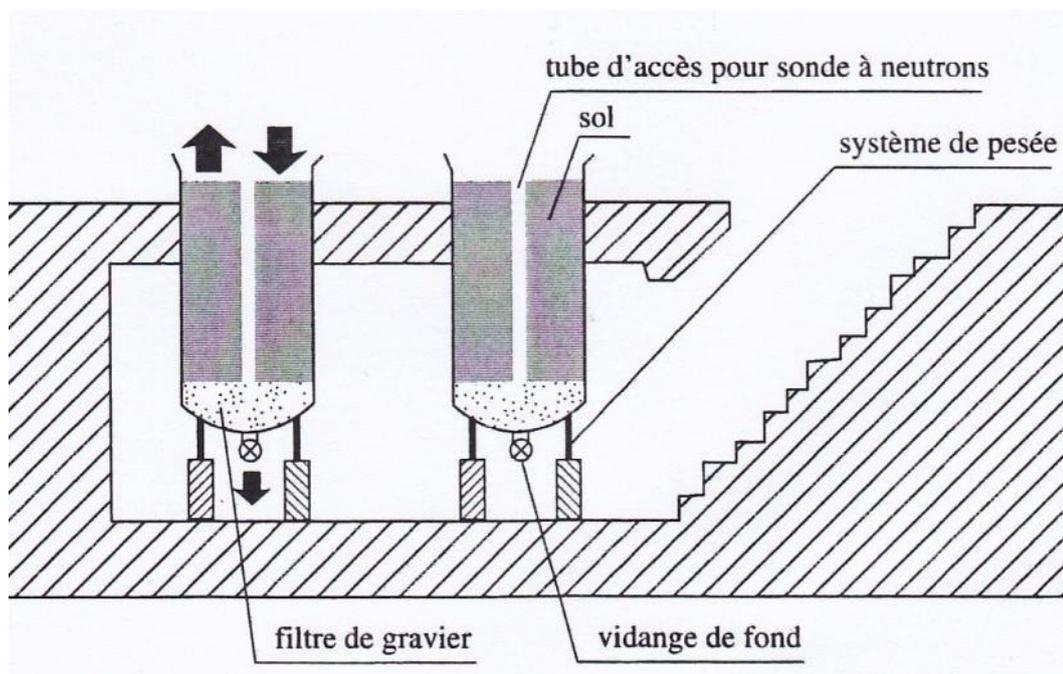


Figure I. 4 Cuve lysimétrique[58]

### B. Les bacs placés au-dessus du niveau du sol " Bac classe A "

Ces bacs ont l'avantage d'avoir une installation très simple et leurs résultats ne risquent pas d'être faussés par le rejaillissement des gouttes de pluie qui tombent sur le terrain avoisinant, par contre, ils sont très sensibles aux variations de la température de l'air et aux effets de l'insolation.

Le bac dit "Class A", utilisé par le Weather bureau, U.S.A" est constitué d'un cylindre métallique de 120.7 cm de diamètre et de 25.4 cm de hauteur. Dans ce cylindre, on maintient une épaisseur d'eau de 17.5 à 20 cm. Le cylindre est sur un support à 15 cm du sol. Ce support doit permettre une bonne aération sous le bac.[2](FigureI.5)

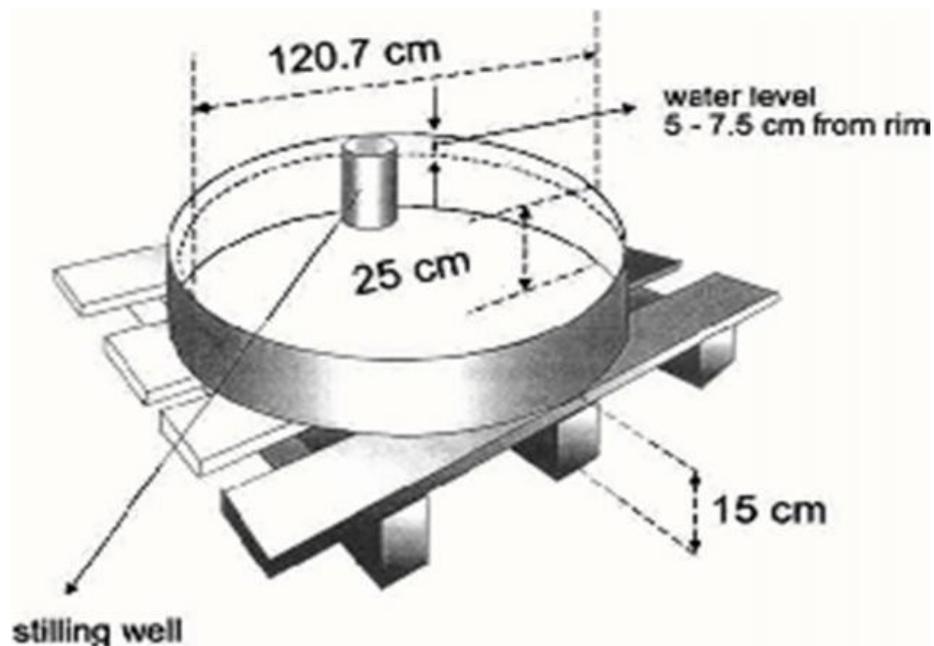


Figure I. 5Bac classe A

### C. Les bacs enterrés : le "Bac Colorado"

Le bac " Colorado " en terré a la forme d'un parallélépipède, dont la section droite est un carré de 100 cm de côté, sa profondeur est de 60 cm; il est enterré de 50 cm(ANRH, 2002). Ce bac est moins sensible aux influences de la température ambiante et du rayonnement solaire sur les parois(FigureI.6).

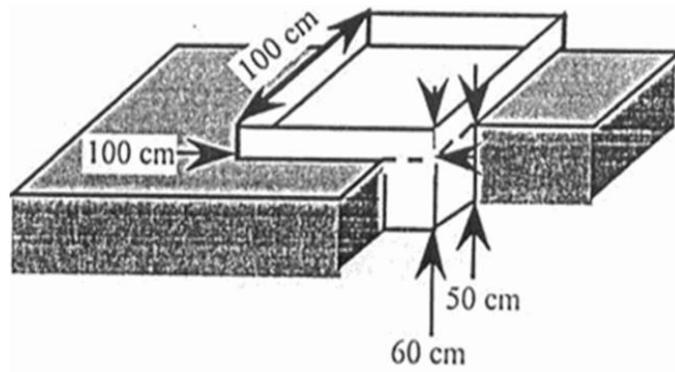


Figure I. 6 Bac colorado

#### D. Evaporomètre de Piche

Cet instrument est composé de deux parties. L'une c'est le tube en verre rempli d'eau, pour effectuer les mesures directes journalières. L'autre, c'est une pastille en forme de buvard composée de deux facies l'une mouillée par l'eau du tube et l'autre à l'air libre qui se dessèche à mesure que la température augmente.

Ce Piche permet de lire directement la quantité d'eau évaporée. Il est recommandé de procéder au remplissage total du tube par l'eau sans bulle d'air, lors de la fixation de la pastille. [49]

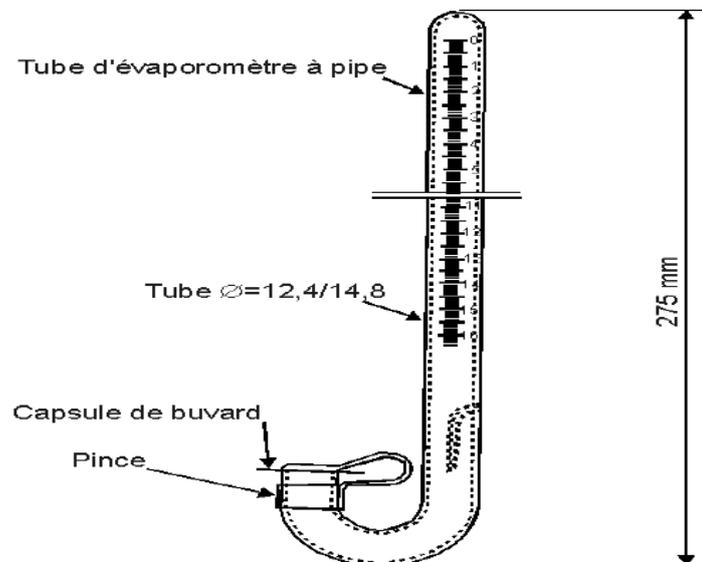


Figure I. 7Evaporomètre de Piche[49]

## **E. Mesures par télédétection des paramètres de l'évaporation et de l'évapotranspiration**

Des observations par télédétection combinées avec des données météorologiques auxiliaires ont été utilisées pour des estimations indirectes de l'évapotranspiration sur une gamme d'échelles spatio-temporelles. [7]

Beaucoup de progrès ont été réalisés, récemment, dans les mesures des paramètres par télédétection, y compris, la radiation solaire incidente, l'Albédo de surface, le couvert végétal, la température de surface et l'Humidité du sol

### **I.1.2.2 Méthodes indirectes**

Plusieurs méthodes ont été testées sous différentes conditions climatiques. Parmi ces méthodes, celle de PENMAN-MONTEITH (FAO-PM) a été recommandée par la FAO comme méthode standard [60],[8],[47],[28] ont montré que la performance de la méthode FAO-PM réside dans le nombre important de variables météorologiques qu'elle intègre : température (T), radiation solaire (Ra), humidité relative (HR) et vitesse du vent ( $u_2$ ). Cette méthode offre l'avantage de pouvoir être utilisée sans ajustement ou intégration d'autres variables. Cependant son application peut être compromise par l'absence de quelques variables climatiques dans certaines régions, particulièrement dans les pays en voie de développement, où l'accès aux données climatiques est parfois limité [60], particulièrement à

L'échelle journalière. [13] Pour pallier ce problème, des formules intégrant moins de variables climatiques ont été proposées. [5],[36],[79],[47],[29]

Ces différentes méthodes sont classées par catégorie en fonction des variables climatiques qu'elles intègrent [39] : température, radiation, transfert de masse ou combinaison de variables. Les méthodes à base de température sont largement utilisées du fait que cette variable est la plus facile à obtenir. [82], [60]

La qualité des résultats obtenus par ces différentes méthodes varie en fonction des conditions climatiques. Ainsi, en étudiant huit méthodes à base de radiation en Suisse, les résultats ont montré que les méthodes d'ABTEW, de MAKING et de PRIESTLEY-TAYLOR donnent les meilleures estimations de l'évapotranspiration de référence (ET<sub>0</sub>). [81] Cependant la méthode de MAKING ne donne pas de bonnes estimations de l'ET<sub>0</sub> sous un climat semi-aride en Iran. [8]

Parmi les cinq meilleures méthodes retenues à Ndiaye et à Fanaye au Sénégal, deux sont de type transfert de masse. [29] En revanche, ces méthodes de transfert de masse ont tendance à surestimer l'ET<sub>0</sub> dans les régions arides. [39],[4] qui ont utilisé les méthodes combinatoires, celle de [5], dite "Copais", et deux équations de [76],[78], à Pilbara en

Australie, sous des conditions climatiques semi-arides. Ils ont noté que les méthodes de VALIANTZAS ont donné de bonnes performances.

Toutes ces méthodes demandent un calage afin d'adapter l'estimation de l'évapotranspiration aux conditions climatiques locales.[82],[79],[23] A cet égard, [82] en évaluant sept méthodes à base de température au Nord-Ouest de l'Ontario au Canada, notent qu'après calage, les méthodes de BLANEY-CRIDDLE, de HARGREAVES et de THORNTHWAITE donnent de meilleures estimations de l'ET<sub>0</sub> [70] ont calé les méthodes de HARGREAVES et de PRIESTLEY-TAYLOR sous les conditions arides et humides de l'Iran et leurs résultats montrent une meilleure estimation de l'évapotranspiration de référence aussi bien en zone humide qu'en zone aride.

En Afrique de l'Ouest, plusieurs études portant sur l'évapotranspiration ont été menées, par exemple dans le delta du fleuve Sénégal où[30] ont évalué, calé, puis validé six méthodes d'estimation de l'ET<sub>0</sub> en utilisant les données journalières des stations de Saint-Louis et de Ndiaye. Au Sénégal aussi, [28] ont évalué la méthode de [75] en utilisant les données annuelles de cinq stations. Au Bénin, [33] a utilisé la méthode de PENMAN-MONTEITH pour calculer l'évapotranspiration potentielle, aux échelles horaire et journalière, sur quatre sites du haut bassin de l'Ouémé. Au Burkina Faso [74] a travaillé sur les méthodes d'estimation de l'évapotranspiration réelle dans le bassin versant du Kou. Plus récemment, ont utilisé les méthodes de PENMAN-MONTEITH [76] [77] pour estimer l'évapotranspiration à l'échelle du pays. Toutefois ces auteurs ont appliqué un nombre limité de méthodes. Il est donc important d'en tester davantage, relevant des différentes catégories, afin de déterminer celles qui fournissent les meilleures estimations.

## **Irrigation**

L'irrigation est l'application de l'eau au sol dans le but de rafraîchir le sol et l'atmosphère, par ce moyen réaliser les conditions les plus favorables pour la croissance des plantes. La desserte adéquate en eau est essentielle pour la croissance ou le développement végétatif des cultures. Lorsque les précipitations sont insuffisantes, l'irrigation serait nécessaire pour couvrir les besoins en eau des cultures. Il existe actuellement plusieurs méthodes d'irrigation pour la desserte en eau des cultures. Chaque méthode présente en même temps des avantages et des désavantages, qui doivent être pris en considération lors de la sélection de la méthode qui s'adapte le mieux aux conditions locales.

La méthode d'irrigation la plus élémentaire consiste à transporter l'eau à partir de la source d'alimentation, un puits, à chaque plante avec un seau ou un arrosoir.

Cette méthode nécessite une main-d'œuvre importante, un long travail et un grand effort.

Cependant, elle est fortement convenable pour l'irrigation des petits jardins de légumes, à proximité immédiate de la source d'eau.

L'irrigation des grandes superficies, ou des périmètres d'irrigation, nécessite le recours à d'autres méthodes d'irrigation plus perfectionnées.

### Différents technique d'arrosages

Les quatre techniques les plus couramment utilisées sont:

- L'irrigation par aspersion
- L'irrigation de surface (ruissellement)
- L'irrigation au goutte à goutte
- L'irrigation par infiltration. [17]

#### • Irrigation par aspersion

L'irrigation par aspersion s'est rapidement développée dans les régions arides et semi-arides. L'eau est transportée dans des réseaux de conduites sous pression puis délivrée au niveau de la parcelle par des bornes qui régulent la pression et le débit. L'eau est ensuite dirigée dans d'autres conduites qui alimentent sous pression des asperseurs qui répandent l'eau en pluie. (Figure I.8)

Il existe deux types d'irrigation par aspersion. L'aspersion traditionnelle et l'aspersion mécanisée.[66]



**Figure I. 8 Irrigation par aspersion**

#### ❖ Avantages

- Possibilité d'arroser tous les types de sols.

- Possibilités de réaliser des installations mobiles, susceptible de déplacer suivant de la nature des cultures, ce qui facilite la rotation culturales.

- Avec les matériels entièrement automatiques, possibilité de réaliser des arrosages a Fable dose et a cadence rapide.

#### ❖ Inconvénients

- Difficultés d'utilisation et efficience réduite en région ventées possibilités réduite pour l'arrosage avec des eaux résiduaires (formation des aérosols).

- Déplacement des matériels difficile dans les zones a culture haute.

- Mauvaise adaptation aux sols.

#### • L'irrigation de surface (ruissellement)

L'irrigation de surface ou irrigation gravitaire consiste à repartir l'eau directement sur la parcelle cultivée par ruissellement sur le sol dans des sillons (méthode d'irrigation à la raie), par nappe (on parle d'irrigation par planche ou calant) ou encore par submersion contrôlée (irrigation par bassin). Il s'agit du mode d'irrigation le plus ancien (et donc assez rudimentaire) mais il est peu couteux en investissement et il s'agit de la méthode la plus utilisée à travers le monde.[66]

#### 1. Irrigation par planches

En agriculture, une planche désigne une portion longue et étroite d'un jardin ou d'un champ. Le principe de l'irrigation par planche et de faire couler une mince couche d'eau sur des planches longues et étroite pour un sol à pente faible (0.1 jusqu'à 5% selon les cultures).

[66] (Figure I.9)



Figure I. 9 Irrigation par planche

L'alimentation en eau des planches est faite de plusieurs façons : soit à l'aide de prises d'eau aménagées sur le canal d'amenée et équipées d'une vannette, soit par des siphons, ou bien par des tuyaux d'alimentation passant à travers les berges du canal d'amenée. La lame d'eau introduite ruisselle en descendant la pente de la planche.[17]

## 2. Irrigation par bassins

Les bassins sont constitués de cuvettes en terre, à fond à peu près plat, entourées de diguettes de faible hauteur ou levées. Ces levées sont conçues pour empêcher le passage de l'eau aux champs adjacents. Cette technique est utilisée, d'une façon générale, pour l'irrigation des rizières sur terrain plat, ou des terrasses à flanc de coteau. (Figure I.10)



**Figure I. 10 Alimentation des planches par siphon**

La méthode par bassins est aussi utilisée pour l'irrigation des arbres fruitiers; dans ce cas une petite cuvette (bassin) est aménagée autour de chaque arbre. En général, cette technique d'irrigation s'applique à toutes les cultures qui peuvent tolérer la submersion par les eaux pour une longue durée (12-24 heures). [66]

Ces techniques traditionnelles restent néanmoins très utilisées, et elles ont été modernisées ces dernières années, et sont utilisées pour les cultures semées à plat telles que les céréales, le bersim, la luzerne, des plantes fourragères etc. (Figure I.11)

## 3. Irrigation par sillons/à la raie

Elle consiste à couvrir partiellement le sol par l'eau qui, ensuite, s'infiltré latéralement et remonte par capillarité. Au lieu de s'étendre sur toute la surface, l'eau quittant le canal d'amenée ruisselle puis s'infiltré dans les rigoles bordant les billons sur lesquels sont implantées les cultures. S'infiltrant latéralement et remontant par capillarité, elle atteint les racines.

On l'utilise idéalement pour des sols composés de sable de texture grossière et de limon sableux avec une pente de 0.2 à 3 %. Cette technique est valable pour l'irrigation de toutes les cultures en lignes et pour toutes les cultures qui ne tolèrent pas la submersion par les eaux de leur feuillage ou de leur collet pour une longue durée (12-24 heures).[66]



**Figure I. 11 Irrigation par sillons**

❖ **Avantages**

- Coût d'investissement est relativement faible.
- Besoin en énergie faible ou nul.
- Technique éprouvée.

❖ **Inconvénients**

- Inadaptation aux sols très filtrants.
- Surface consommée par les canaux et rigoles.
- Planage nécessaire à la parcelle.

● **Irrigation au goutte à goutte**

Développée depuis une trentaine d'années, cette technique consiste à apporter de l'eau sous faible pression de façon intermittente et uniquement aux endroits où elle est nécessaire ,dans le voisinage immédiat des racines, ce qui se réalise à l'aide de fins tuyaux posés sur le sol ou enterrés. [51]

L'irrigation au goutte à goutte consiste à amener l'eau sous pression dans un système de canalisations, généralement en PVC; cette eau est ensuite distribuée en gouttes au champ par un grand nombre de goutteurs répartis tout le long des rangées des plantations. La zone humidifiée du sol est celle située au voisinage immédiat des racines des plantes. Par conséquent, cette méthode d'irrigation a un haut degré d'efficacité de distribution d'eau (Photo I.1). L'irrigation au goutte à goutte est aussi appelée micro-irrigation ou irrigation localisée.[17]



**Photo I. 1: Irrigation au goutte à goutte[Hafsi.M et Boudjema.S(2020)]**

#### ❖ **Avantages**

-Économie de l'eau: permet d'éviter l'évaporation superficielle et le ruissellement avec une efficacité de 95%.

-Économie et amélioration de la fertilisation: application directe de l'eau et des nutriments sur le système racinaire.

-Économie du coût énergétique par rapport à l'aspersion.

-Possibilité d'utiliser les eaux marginales (saline ou/et résiduelle). [51]

#### ❖ **Inconvénients**

-Le colmatage des ajutages par des débris physiques, des éléments chimiques et du matériel biologiques.

-L'équipement spécial utilisé pour contrôler le colmatage peut augmenter fortement le coût unitaire d'une installation.

-La limitation du volume de sol mouillé pourrait entraîner un stress hydrique pour la culture dans le cas de dysfonctionnement de l'installation d'irrigation

- L'installation du système requiert une attention toute particulière.[45]

#### • **L'irrigation souterraine**

L'irrigation souterraine peut être définie comme l'action de fournir l'eau aux plantes en dessous de la surface du sol, en maintenant une nappe d'eau artificiellement élevée, de façon à maintenir la meilleure combinaison d'eau et d'air dans la zone des racines pour des rendements maximaux .Il faut bien distinguer l'irrigation souterraine ("subirrigation") de la micro-irrigation localisée ("subsurface irrigation") qui est aussi un système qui fournit de l'eau sous la surface du sol, mais à chaque plan de façon individuelle, tel l'irrigation goutte à

goutte. L'irrigation souterraine peut se faire à l'aide de tuyaux perforés enterrés ou de canaux ouverts. [45] (Figure I. 12)

Parfois, dans ce cas on combine l'irrigation et le drainage, mais cela seulement dans un nombre très limité de cas particuliers.[24]

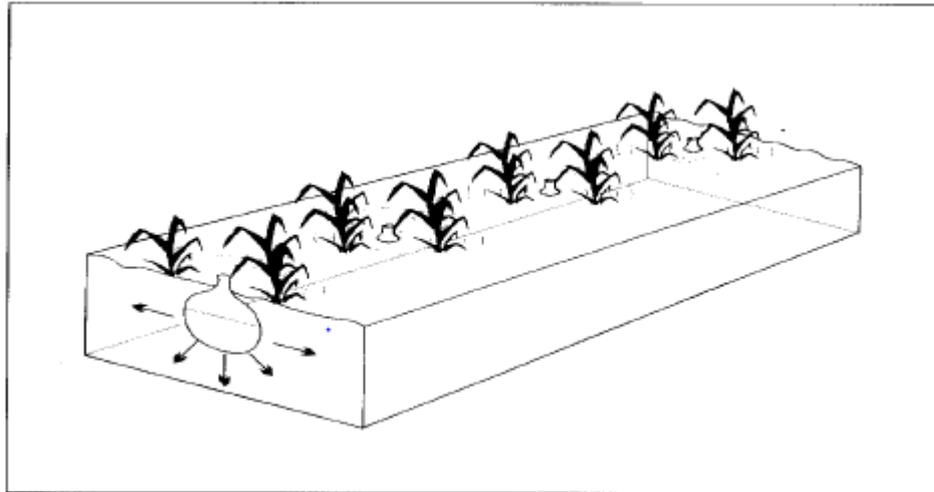


Figure I. 13 : Irrigation souterraine

### Nano-irrigation

La nano irrigation est une nouvelle technologie permettant d'humecter le sol en permanence en libérant lentement de très faible quantité d'eau.

En effet la nano irrigation permet de répartir les besoins en eau des cultures durant tout le cycle sans interrompre les apports. Ainsi les cultures n'auront pas à subir des stress hydriques.[34]



Photo I. 2 : Nano-Irrigation [Hafsi.M et Boudjema.S(2020)]

La membrane interne des conduits d'eau sont semi-perméables et repiqué de micropores invisibles. Ces derniers ont des diamètres d'environ 10 à 900 NM et disposés de manière à avoir 100000 micropores par Cm. L'écoulement se fait sous l'effet de leur énergie potentiel. L'eau passe dans la membrane directement sur les zones à faible énergie potentiel qui peuvent être potentiel du soluté, potentiel hydrique du sol, potentiel d'eau atmosphérique, potentiel hydrique des racines...[34]

Lorsque la nano irrigation est souterraine, elle permet la fourniture d'eau et d'engrais directement aux racines des plantes, elle empêche les pertes d'eau par évaporation, par ruissellement et par infiltration souterraine. Lors de l'apport, la quantité d'eau consommée correspond aux processus physiologiques de cultures. La plante utilise 95 % de l'eau pertes 5% nano- irrigation.[34]

### Description générale de coriandre

La coriandre est une plante annuelle élancée, ramifiée, mesurant généralement en floraison de 30 à 60 cm mais pouvant atteindre 1,4 m. Le feuillage et la tige sont vert ou vert clair tirant parfois sur le rouge ou le violet pendant la floraison, glabres, luisants (notamment les faces inférieures des feuilles). L'inflorescence, blanche ou rose-mauve très pale, est typique des Apaisées (Ombellifères) : petites fleurs pentamères disposées en ombelles composées. L'odeur de la plante est souvent décrite comme fétide, surtout en floraison ou début de fructification.[20]



**Photo I. 3 : Coriandre[Hafsi.M et Boudjema.S(2020)]**

La coriandre fait partie de famille des apaisées comme le fenouil, le cerfeuil, le persil, sa consommation remonte à 1500 ans avant Jésus-Christ. La coriandre présente de jolies feuilles découpées, parfumées et semi-persistantes. Elles peuvent se consommer fraîches ou

séchées et sont également utilisées en phytothérapie. La coriandre est aussi cultivée pour ses graines qui se forment en septembre, après les fleurs. La hauteur de la coriandre en pot est généralement comprise entre 60 cm et 1m(Photos I.3). [20]

La coriandre n'exige pas une dose d'irrigation importante et craint l'excès d'eau [20] L'essentiel est de l'arroser régulièrement, surtout pendant les fortes chaleurs. Un arrosage 2 fois par semaine devrait suffire à conserver une terre humide.

La coriandre pousse bien dans un sol léger, souple, friable et humifère sous une exposition chaude, très ensoleillée et abritée des courants d'air. [20]

### **Conclusion du chapitre I**

Pour estimer l'évapotranspiration, plusieurs formules ou méthodes ont été élaborées dans différents endroits de la planète et sous divers climats. Parmi ces formules, certaines ne nécessitent que des paramètres météorologiques disponibles. Celles de Blaney-Criddle, et Thornthwaite donnent de bonnes estimations sous les conditions arides.

Plusieurs méthodes de planification de l'irrigation sont disponibles et varient en complexité, soit de la simple perception d'un besoin en eau jusqu'à l'utilisation de modèles dynamiques de bilan hydrique du sol, combinée avec l'utilisation de mesures directes de l'humidité du sol. Au cœur de toutes ces méthodes, une nouvelle technique la « nano irrigation » qui permet la fourniture d'eau et d'engrais directement aux racines des plantes, et empêche les pertes d'eau par évaporation, par ruissellement et par infiltration souterraine.

La coriandre est cultivée dans les zones arides et semi-arides ne réclame pas d'arrosage particulier et ne doit être arrosée qu'en cas de sécheresse prolongée. La levée est assez rapide puisqu'elle a lieu environ quelques jours après le semis.

## *Chapitre II*

### *Présentation de la zone d'étude*

## Introduction

Le site expérimental et les caractéristiques climatiques jouent un rôle important pour le choix de la technique d'irrigation, la détermination de la quantité d'eau nécessaire pour avoir un bon rendement et pour la détermination de l'évapotranspiration.

Les données ont été fournies par l'office national de météo de Ouargla (ONM) en 2018, pour la période entre 2008 et 2017 (annexe 1)

## Situation géographique

Ouargla est située dans le sud-est algérien à 800 km environ de la capitale Alger (Figure II.1) couvrant une superficie de 163,230 Km<sup>2</sup>. Elle se trouve à une altitude de 157 m, sa latitude est de 32° 45' Nord et 31° 45' Sud ; la longitude est de 5° 20' Est et 5° 45' Ouest.

Cette ville, située au fond d'une vaste dépression dépourvue d'exutoire où la nappe phréatique est souvent à fleur de sol, est ainsi entourée de grandes étendues de sebkhas et de chotts .[40]

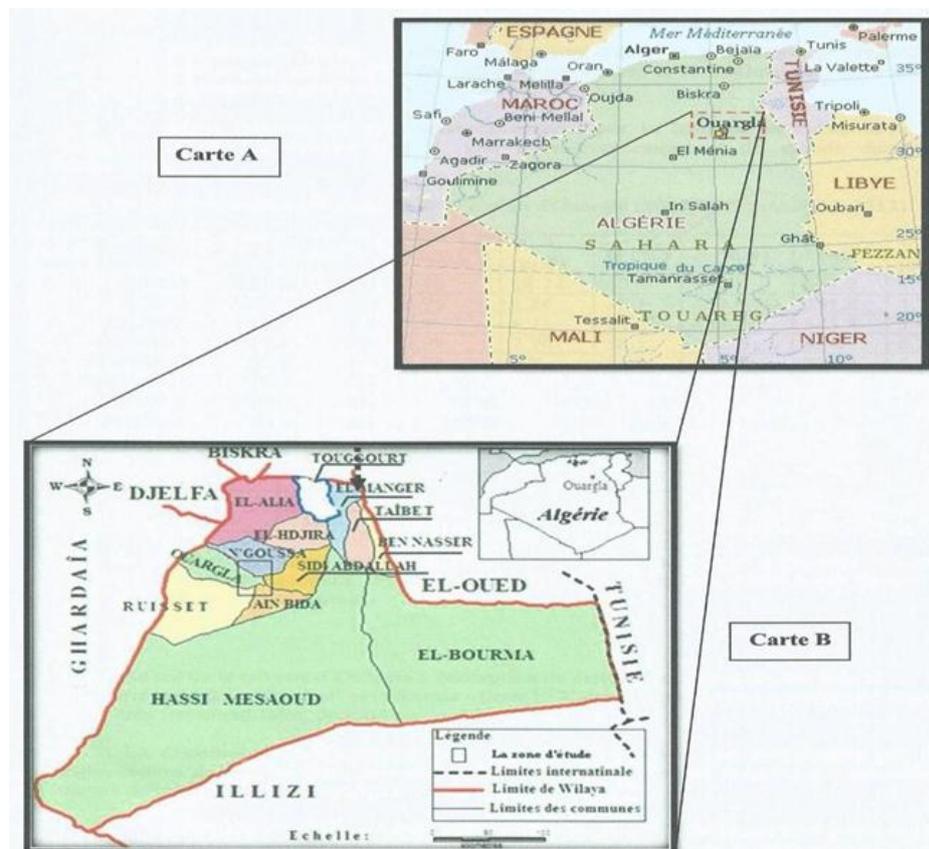


Figure II. 1 Situation géographique de Ouargla

La wilaya est limitée :

- Au Nord par les Wilayas de Djelfa et d'El-Oued.
- A l'Est par la Tunisie.
- Au Sud par les Wilayas de Tamanrasset et d'Illizi.
- A l'Ouest par la wilaya de Ghardaïa.

Elle compte 21 communes regroupées en 10 Daïras.

La zone d'étude se trouve à l'université « Kasdi Merbah » de Ouargla.

### Étude climatique de la région

Les paramètres météorologiques sont des facteurs clés dans la distribution saisonnière de l'irrigation et dans l'évaporation. Et certains d'entre eux on les retrouve dans toutes les formules de la détermination de la dose d'arrosage et dans la détermination de l'évaporation.

Les données climatiques considérées concernent essentiellement les précipitations, les températures et d'autres phénomènes climatiques (vent, insolation, humidité, etc.).

### Températures

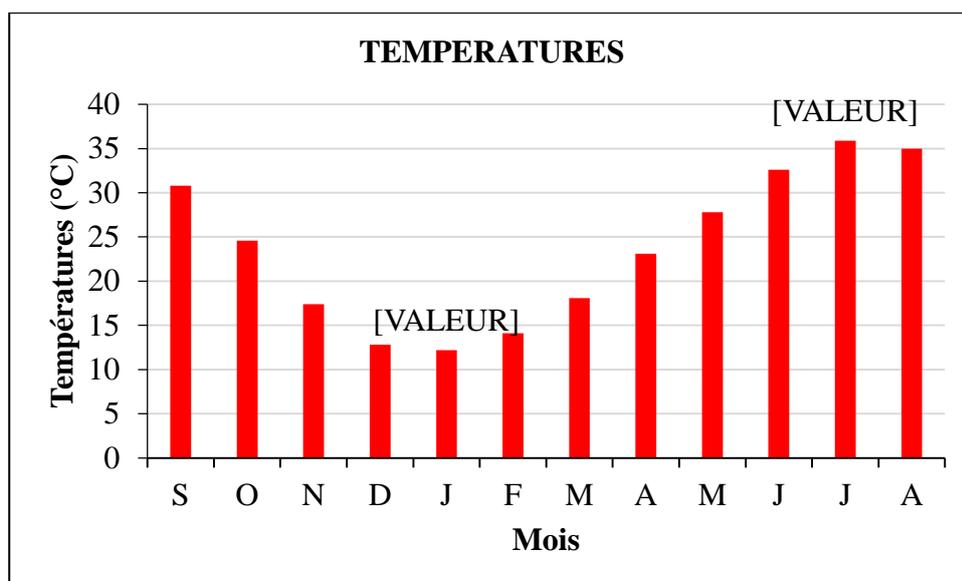
La température étant étroitement reliée au taux de radiation, lui-même directement corrélé à l'évaporation, il s'ensuit qu'une certaine relation existe entre l'évaporation et la température de la surface évaporant .[65]

L'unité internationale de température est le Kelvin (K), et le degré Celsius (°C) est une autre unité très répandue Europe.

Les températures mensuelles moyennes pour une période d'observation de 10ans (2008-2017) sont présentées dans le (Tableau II.1) qui suit :

**Tableau II. 1Températures moyennes mensuelles enregistrée dans la région de Ouargla entre (2008 –2017 O.N.M, 2018) [56]**

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	Moy
T(C°)	30,8	24,6	17,4	12,8	12,2	14,1	18,1	23,1	27,8	32,6	35,9	35	23,7



**Figure II. 2 : Températures moyennes mensuelles à Ouargla sur la période (2008–2017)**

Les températures à Ouargla sont caractéristiques du climat saharien avec des valeurs très élevées en été. la température moyenne est l'ordre de 23,7°C, avec une moyenne mensuelle du mois le plus chaud (juillet) dépasse 35,9°C et celle du mois le plus froid (janvier) est de 12,2°C.

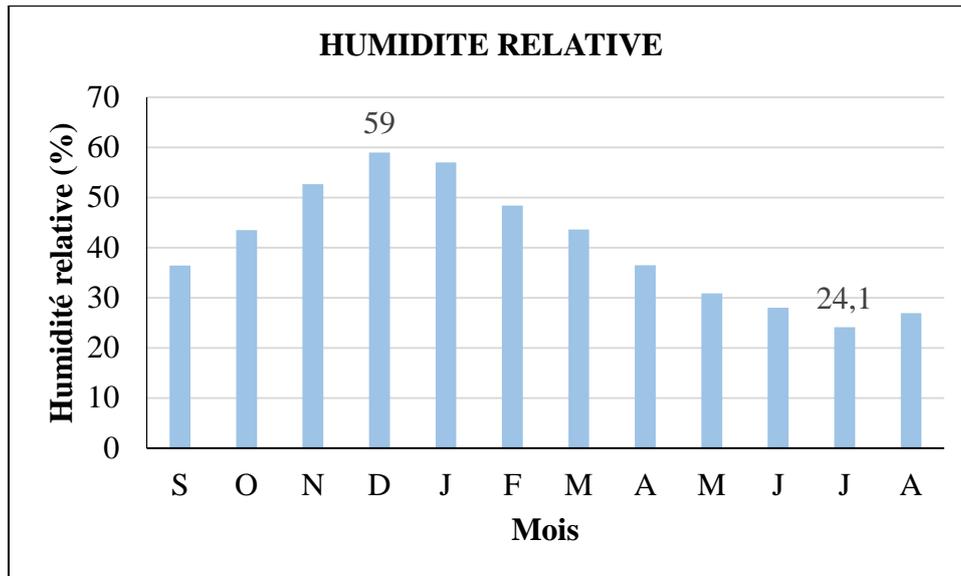
### **Humidité relative**

L'humidité relative du cycle hydrologique contrôle l'évaporation du sol et la couverture végétale, elle correspond au rapport de la pression partielle de la vapeur d'eau. [37]

Les données d'humidité relative mensuelles moyennes de la station de Ouargla sont présentées dans le (Tableau II.2) suivant :

**Tableau II. 2 : Humidités moyennes mensuelles enregistrée dans la région de Ouargla entre (2008 –2017 O.N.M, 2018) [56]**

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	Moy
H(%)	36,4	43,5	52,7	59	57	48,4	43,6	36,5	30,9	28	24,1	26,9	40,83



**Figure II. 3 : Humidité relative moyenne mensuelle à Ouargla sur la période (2008–2017)**

Les valeurs de l'humidité relative de la région d'étude sont relativement homogènes. Les moyennes mensuelles varient entre 24,1 % et 59 %, sachant que la moyenne annuelle est de l'ordre de 40,83%. Juillet est le mois le plus sec et décembre est le mois le plus humide.

### Vitesse du vent

Le vent joue un rôle essentiel sur les processus d'évaporation car c'est lui qui permet, par le mélange de l'air ambiant, de remplacer au voisinage de la surface évaporant, l'air saturé par de l'air plus sec. [65]

Les vents fréquents sont des vents NNE et SSE avec une vitesse pouvant atteindre et parfois dépasser 20 m/s. le sirocco (vent chaud et sec) peut être observé à toute époque de l'année.

**Tableau II. 3 : Vitesses moyennes mensuelles des vents enregistrés dans la région de Ouargla entre (2008 –2017 O.N.M, 2018) [56]**

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A
V(m/s)	9,17	7,89	7,25	7,06	7,97	8,81	9,33	10,07	10,39	9,94	8,84	8,61

Ce tableau montre qu'une vitesse moyenne annuelle de 8,8 m/s, un maximum de 10,39 m/s en mai et un minimum de 7,06 m/s en décembre.

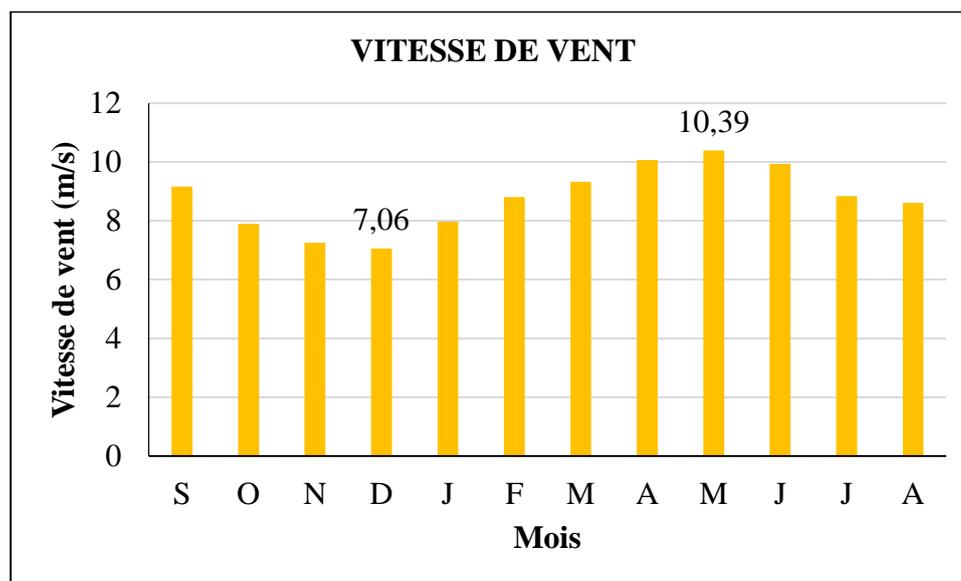


Figure II. 4 : Vitesses moyenne mensuelle de vent à Ouargla sur la période (2008–2017)

## Précipitations

Les précipitations jouent un rôle important dans l'irrigation et c'est en fonction de leurs quantités qu'on irrigue. Ce sont les eaux qui tombent sur la surface de la terre, tant sous forme liquide (bruine, pluie, averse) ou solide (neige, grésil, grêle).

Quelle que soit la forme de la précipitation, généralement on exprime la quantité d'eau mesurée tombée durant un certain de temps en millimètres (mm).

Les précipitations sont très rares et irrégulières (irrégularités mensuelles et annuelles), La période pluviale de l'année est très restreinte, elle est de 3 à 4 mois, par contre la période sèche s'étale sur le reste de l'année. Avec un maximum annuelle au mois de janvier de 8,51 mm. Le cumul des précipitations annuelles sur 10 ans (2008-2017) est de 39,19 mm le (Tableau II.4).

Tableau II. 4 : Précipitations moyennes mensuelles enregistrées dans la région de Ouargla entre (2008 –2017 O.N.M, 2018) [56]

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	Cumul
P(mm)	5,16	6,2	2,69	3,8	8,51	3,15	5,19	1,48	1,58	0,81	0,35	0,27	39,19

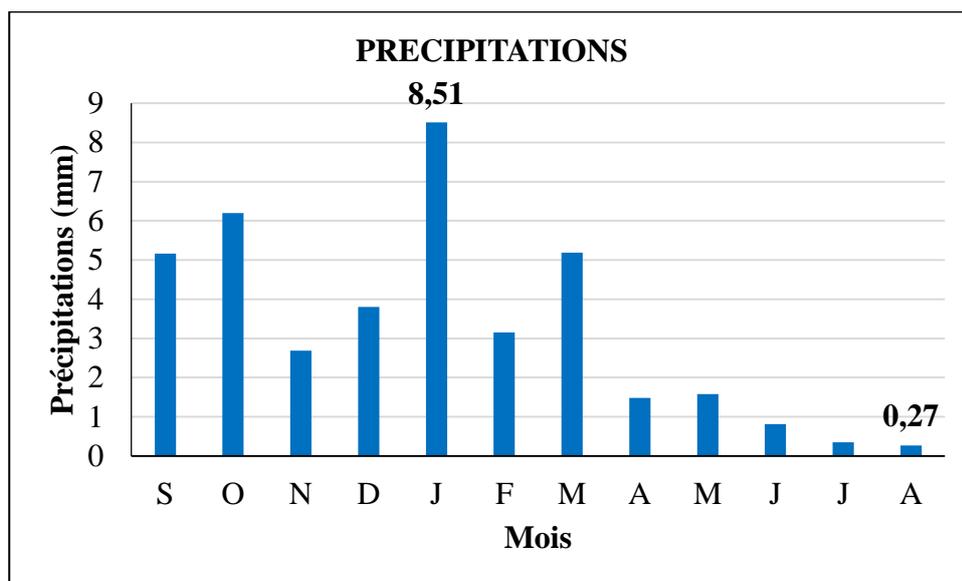


Figure II. 5 : Précipitations moyenne mensuelle à Ouargla sur la période (2008–2017)

### Insolation

La région de Ouargla est caractérisée par une forte insolation. Cette dernière correspond à la durée d'éclairement du sol par le soleil. Le maximum est atteint au mois d'Aout avec une durée de 340 heures et le minimum au mois de décembre avec une durée de 231 heures le (Tableau II.5).

Tableau II. 5 : Insolation moyenne mensuelle enregistrée dans la région de Ouargla entre (2008 –2017 O.N.M, 2018) [56]

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A
I (h)	264	267	250	231	248	241	268	289	309	234	320	340

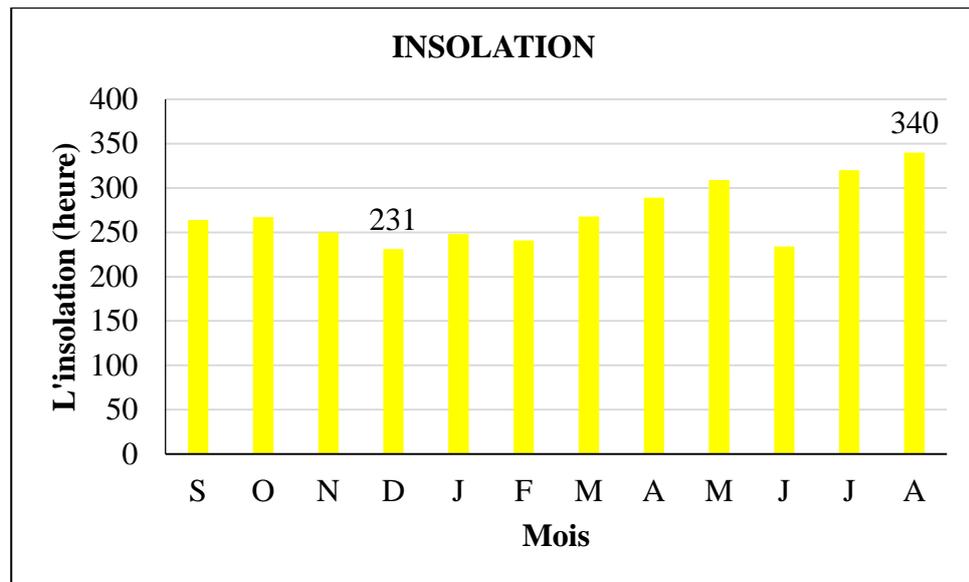


Figure II. 6 : Insolation moyenne mensuelle à Ouargla sur la période (2008–2017)

### Évaporation

La région de Ouargla est caractérisée par une évaporation importante est très forte surtout durant les mois les plus chauds. Avec une moyenne annuelle de 225,4 mm, le maximum remarqué pour le mois de Juillet (433 mm), le minimum pour le mois de décembre (83,4mm).

Tableau II. 6 : Évaporation moyennes mensuelles enregistrée dans la région de Ouargla entre (2008 – 2017 O.N.M, 2018)[56]

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	Moy
E(mm)	271	204	122	83,4	93,5	125	182	234	307	366	433	384	225,4

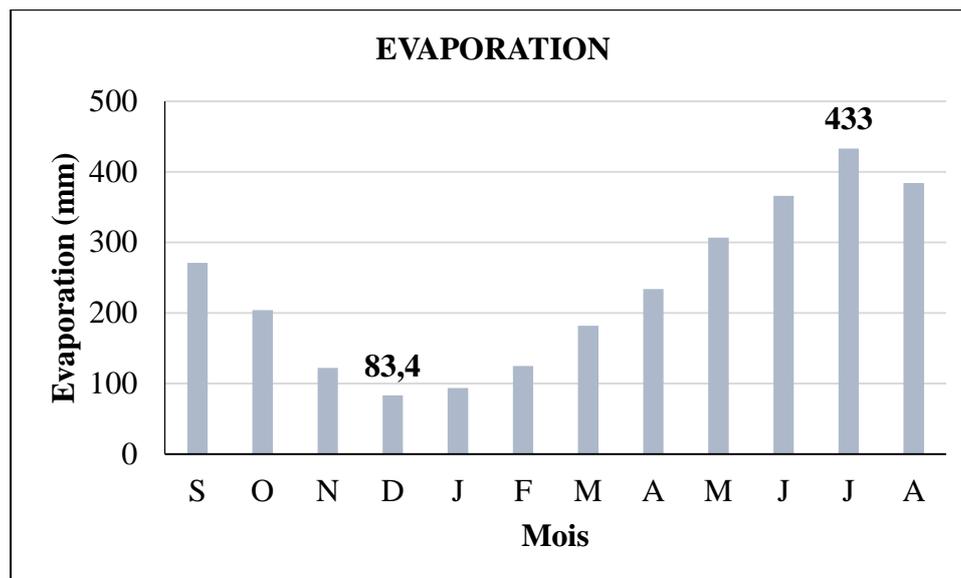


Figure II. 7 : Évaporation moyenne mensuelle à Ouargla sur la période (2008–2017)

### Synthèse climatique

La synthèse climatique est une étape indispensable pour l'irrigation et la détermination de l'évapotranspiration. Elle consiste à la détermination des indices climatiques afin d'aboutir aux tendances du climat, ses caractéristiques et décrire ces variations.[6] La littérature en la matière est très riche en indices climatiques, spécifique à chaque région. Pour les zones arides on fait souvent appel à l'utilisation de l'indice d'aridité de Martonne et diagramme ombrothermique de Gaussen et Bagnouls et celui d'Emberger qui illustre la relation existante entre la température et la précipitations pour la détermination des périodes de sécheresse.[38]

#### A. Indice d'aridité de Martonne

En se basant sur des considérations essentiellement géographiques, de Martonne a défini comme fonction climatologique nouvelle l'indice d'aridité du climat par le quotient  $IDM = P/(T+10)$ . Cet indice permet de caractériser le pouvoir évaporant de l'air à partir de la température, l'évaporation étant considérée comme une fonction linéaire de la température.[48]

- Pour le calculer l'indice d'aridité annuelles on utilise la formule suivante :

$$I = \frac{P}{T+10} \quad (II.1)$$

Où :

**P** : Précipitations totales annuelles en mm.

**T** : Température moyenne annuelle en °C.

- Pour calculer l'indice d'aridité mensuel on utilise la formule suivante :

$$I = \frac{P}{T+10} \quad (\text{II.2})$$

Où :

**P** : Précipitations totales mensuelle en mm.

**T**:Température moyenne mensuelle en °C

Cet indice prend des valeurs d'autant plus élevées que le climat est plus humide et d'autant plus faibles que le climat est plus sec.

De Martonne a proposé la classification des climats en fonction des valeurs de l'indice comme présentés dans le (Tableau II.7) suivant :

**Tableau II. 7 : Classification des climats selon l'indice de Martonne.[48]**

Valeur de l'indice d'aridité de Martonne	Type de climat	Type de végétation potentielle
0 à 5	Hyper aride	Désert absolu
5 à 10	Aride	Désert
10 à 20	Semi-aride	Steppe
20 à 30	Semi-humide	Prairies naturelles, forêts
30 à 40	Humide	Forêts
40 à 55	Humide	Forêts

### ➤ L'indice d'aridité annuel

A partir des données précédentes nous avons la température moyenne annuel dans région de Ouargla de la période 2008-2017est 23,7°C. La précipitation annuelle est de 39,19 mm, à partir de ces données on calcule l'indice d'aridité de Martonne :

$$I = \frac{P}{T+10} = \frac{39,19}{(23,7+10)}=1,16$$

L'indice d'aridité annuelle est compris entre 0 et 5, donc le climat de Ouargla est de type hyper aride.

### ➤ l'indice d'aridité mensuel

A partir des données précédentes nous avons utilisé l'indice d'aridité mensuel dans la région de Ouargla de la période 2008-2017, à partir de ces données on calcule l'indice d'aridité de Martonne par la formule suivante :

$$I = \frac{P}{T+10}$$

Le tableau II.8 représente les indices d'aridité de Martonne mensuelles calculés à partir des températures moyennes mensuelles et précipitations mensuelles citées précédemment.

**Tableau II. 8 : Indice d'aridité mensuel de Martonne**

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A
<b>Précipitation en mm</b>	5,16	6,2	2,69	3,8	8,51	3,15	5,19	1,48	1,58	0,81	0,35	0,27
<b>Température moyenne en ° C</b>	30,8	24,6	17,4	12,8	12,2	14,1	18,1	23,1	27,8	32,6	35,9	35
<b>l'indice d'aridité</b>	0,13	0,18	0,098	0,17	0,38	0,13	0,18	0,04	0,04	0,02	0,01	0,01

Après les résultats du (Tableau II.8) nous avons remarqué que les indices d'aridité mensuelle de Martonne sont tous compris entre 0 et 5 donc selon la classification de Martonne de l'aridité, tous les mois de l'année dans la région de Ouargla sont de type hyper aride

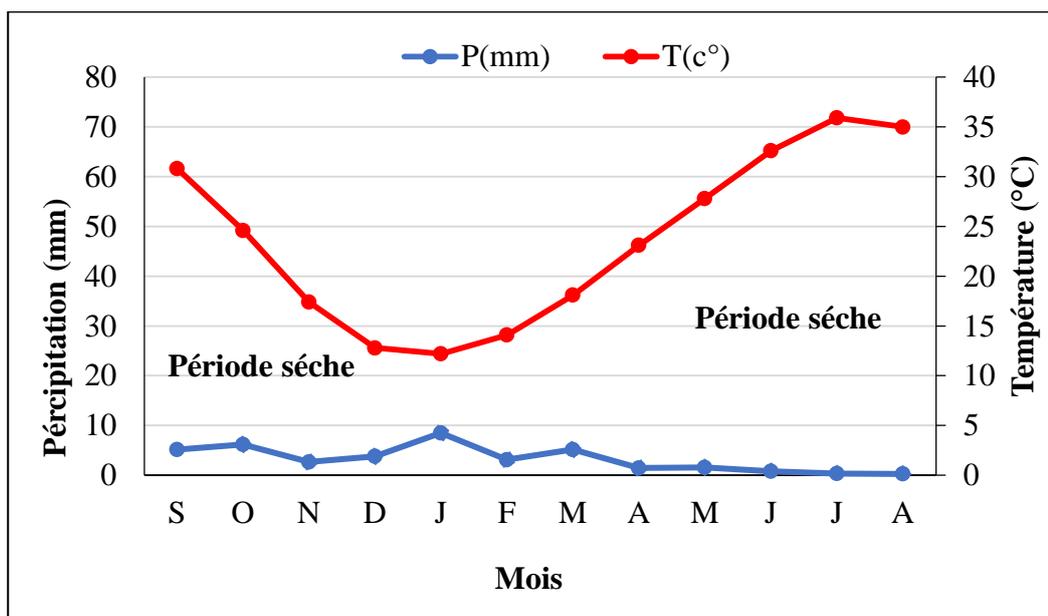
### B. Diagramme ombrothermique de Gaussen et Bagnouls

Le diagramme ombrothermique de Gaussen et Bagnouls est une méthode graphique qui permet de définir les périodes sèches et humides de l'année, où sont portés en abscisses les mois, et en ordonnées les précipitations (**P**) et les températures (**T**).

Si les précipitations moyennes mensuelles d'un mois sont inférieures ou égales au double de températures mensuelles de même mois ( $P \leq 2T$ ), la période est dite sèche. [22]

**Tableau II. 9 : les valeurs moyennes mensuelles des précipitations et des températures (2008-2017) [56]**

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A
<b>T(C°)</b>	30,8	24,6	17,4	12,8	12,2	14,1	18,1	23,1	27,8	32,6	35,9	35
<b>P(mm)</b>	5.16	6,2	2,69	3,8	8,51	3,15	5,19	1,48	1,58	0,81	0,4	0,27



**Figure II. 8** Diagramme ombrothermique de Gaussen de Ouargla dans la période (2008-2017)

D'après ce diagramme (Figure II.8) on remarque que de la région d'étude est caractérisée par une période sèche toute l'année.

### C. Le quotient pluviothermique d'EMBERGER

Emberger a établi un quotient pluviothermique « le Q2 » qui est spécifique au climat méditerranéen. Il est le plus utilisé en Afrique du Nord. Ce quotient a été formulé de la façon suivante  $Q2 = 2000P / M^2 - m^2$ . [11]

STEWART [71] a montré que pour l'Algérie et le Maroc, la dernière formule pouvait être simplifiée pour s'écrire :

$$Q3 = 3,43P / M - m$$

**P** : Précipitation moyenne annuelle en mm.

**M** : Moyenne des maxima du mois le plus chaud °C.

**m** : Moyenne des minima du mois le plus froid °C.

#### • Clima gramme d'Emberger

Emberger a devisé les étages bioclimatiques comme suit : [50]

- Étage saharien (ou per-aride)
- Étage aride
- Étage semi-aride (ou mieux subaride)
- Étage subhumide
- Étage humide (quelques fois appelé humide inférieur)

- Étage per-humide (quelque fois appelé humide supérieur)

**Tableau II. 10 : Températures moyennes des maximas et minimas (2008 à 2017) [56]**

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A
<b>Température moyenne minimale (°C)</b>	23,5	17,3	10,4	5,92	5,22	6,89	10,6	15,3	20,1	24,8	28	27,4
<b>Température moyenne maximale (°C)</b>	38,1	31,8	24,4	19,6	19,3	21,3	25,6	30,9	35,4	40,4	43,8	42,7
<b>Moyenne</b>	30,8	24,6	17,4	12,8	12,2	14,1	18,1	23,1	27,8	32,6	35,9	35

Le tableau (Tableau II.10) des températures moyennes mensuelles, montre que le mois le plus chaud est le mois de Juillet avec une température moyenne de 35,9° C et le mois le plus froid est le mois de Janvier 12,2° C.

La moyenne des maxima du mois le plus chaud °C est celle de juillet M=43,8°C et la moyenne des minima du mois le plus froid °C est celle de janvier m=5,22°C. Et la précipitation moyenne annuelle d'après le tableau est de P=39,19mm

**Remarque :** les températures en Kelvin( $T+273k$ ).

En appliquant la formule de Stewart pour le calcul du quotient pluviothermique pour l'Algérie nous obtenons  $Q_3$  est de 3,48 mm/k ,le résultat obtenu par croisement des valeurs des coordonnées (m,  $Q_3$ ) permet de déduire que Ouargla est caractérisé par un bioclimat hyperaride (Étage saharien) à hivers doux (Figure. II.9).

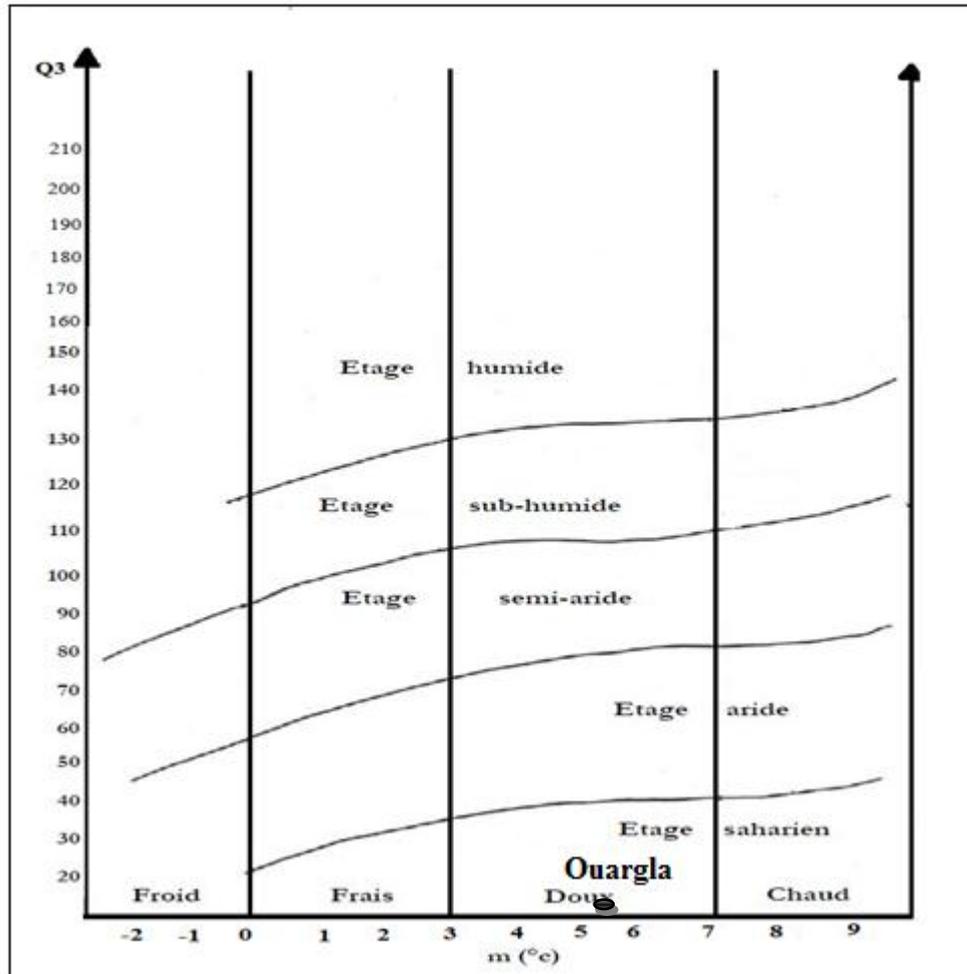


Figure II. 9 : Climagramme pluviothermique d'Emberger pour la station de Ouargla

## Hydrogéologie

Au Sahara, il existe deux ensembles aquifères séparés par d'épaisses séries évaporitiques ou argileuses de la base du crétacé supérieur : l'ensemble inférieur appelé le complexe intercalaire (CI) ou "Albien" et l'ensemble terminal « CT ». [68]

Dans les oasis de Ouargla, il y a des nappes souterraines captives et phréatiques, donc en peu dire que le grand bassin sédimentaire du Sahara septentrional contient trois principaux aquifères:

- A la base, se situe la nappe du continental intercalaire qui classe l'un des plus grands réservoirs captifs du monde (CI)
- Au milieu, se localise la nappe du complexe terminal (CT)
- Au sommet, s'installent les nappes phréatiques (non exploitées).

Les deux nappes, CI et CT sont actuellement, les deux principales ressources hydriques disponibles dans la région de Ouargla, mais la nappes phréatique (nappe superficielle) peut être considérée actuellement comme ressource hydrique à forte salinité non exploitées

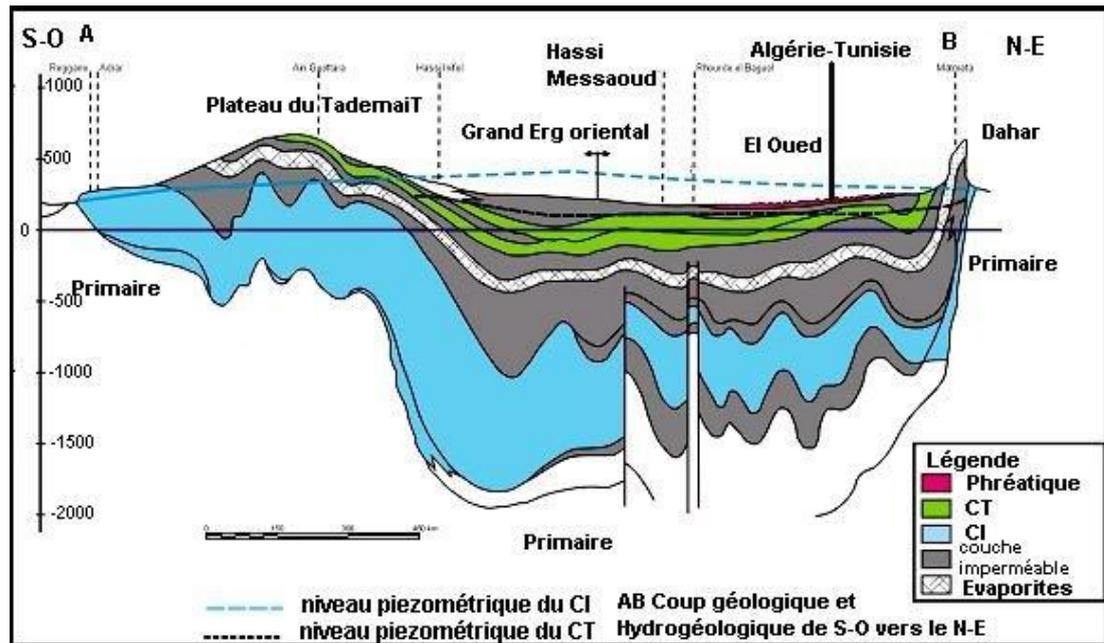


Figure II. 10 : Coupe hydrogéologique à travers le Sahara (d'après UNESCO 1972)

### Nappe du continental intercalaire

L'exploitation de cette nappe à Ouargla remonte à 1960. Les forages atteignent la nappe entre 1100 et 1400 m de profondeur, et leurs eaux sont faiblement minéralisés (de l'ordre de  $1,9 \text{ g.l}^{-1}$ ). Ils ont un débit de 250 à 400 l/s. [68]

### La nappe du complexe terminal (CT)

Les nappes du continental terminal sont moins profondes que celles du continental intercalaire (moins de 400m) et couvrent une superficie de 350000 km<sup>2</sup> leur eaux sont généralement plus chargées en sels. Ce complexe est constitué de deux nappes à savoir :

- ✓ La nappe du miopliocène.
- ✓ La nappe du sénonoien.

L'écoulement de ces deux aquifères s'effectue du Sud-ouest vers le Nord-est. [40]

### Nappe phréatique

La nappe phréatique repose sur une épaisse couche imperméable, qui s'étend tout au long de la vallée de l'Oued m'ya. Sa profondeur varie de 1 à 3 m dans les zones urbaines et de 0.5 à 0.9 m dans les zones agricoles. Elle affleure dans les zones hotteuses et peut atteindre 15 m de profondeur dans certaines zones, les parties les plus basses sont situées au sud et sous la ville de Ouargla et les parties les plus basses sont situées au niveau de Sebkhate Sefioune pour les plus basses. L'eau s'écoule librement des points hauts vers les points bas. C'est-à-dire, du Sud vers le Nord suivant la pente générale de la vallée. [63]

La qualité des eaux de la nappe phréatique est très dégradée, la conductivité est très forte. Elle augmente en allant du Sud vers le Nord. Les températures des eaux de cette nappe varient généralement entre 15 et 20°C.

### **Conclusion chapitre II**

La région de Ouargla occupe la partie basse au Nord-est des déserts du Sahara. Cette région désertique est caractérisée par un climat aride, marqué notamment par la faiblesse et l'irrégularité des précipitations d'une part, et les températures trop élevées d'autre part. Cette aridité se constate aussi par une forte évaporation qui constitue l'un des facteurs climatiques majeurs actuels qui règnent dans la ville de Ouargla.

L'indice d'aridité de Martonne mensuel et annuel nous conduit à des valeurs de 0 à 5 donc climat hyperaride. D'après le diagramme ombrothermique de Gaussen et Bagnouls la région d'étude est caractérisée par une période sèche toute l'année. Et le quotient pluviométrique d'Emberger Q3 égal à 3.48 mm/K, montre que Ouargla est caractérisée par un bioclimat hyperaride (saharien) à hivers doux.

La région de Ouargla actuellement exploite les sources hydriques de la nappe du continental intercalaire, et de la nappe du complexe terminal, mais la qualité des eaux de la nappe phréatique sont très dégradée.

*Chapitre III*  
*Matériels et méthodes*

## Introduction

La dose d'irrigation dépend de plusieurs facteurs. Le bilan hydrique est donné par l'équation « *Irrigation = pluie + ETP - Drainage ± ΔR* ». Les variations de réserve du sol ( $\Delta R$ ) sont négligeables en valeur relative car l'alimentation en eau est régulière, et la période de calcul est suffisamment longue (une semaine à dix jours au minimum 5 jours). Le drainage est la quantité d'eau perdue par infiltration et est facilement mesurable. Le facteur essentiel est l'évapotranspiration, car dans cette région à fortes températures, les pertes d'eau par évapotranspiration sont fortes, d'où le choix d'une technique d'irrigation économique du point de vue Eau qui est la « nano-irrigation ».

## Site expérimental

Le choix a porté sur le terrain de l'Exploitation de Université de Ouargla à cause de la disponibilité des moyens nécessaires pour l'expérimentation, à savoir la présence de parcelle à irriguer, et source d'eau. L'exploitation agricole de l'université de Ouargla (ex : Institut Technologique d'Agronomie Saharienne) a été créée en 1959, par le service colonial pour la mise en valeur, sous l'appellation de périmètre de "GARET- CHEMIA". Elle est située au sud-ouest de Ouargla, à six kilomètres environ du centre-ville. Le périmètre couvre une superficie de 32 hectares.

Quelques expérimentations (pesées, analyse granulométrique, humidité) ont été effectuées au sein du laboratoire de l'université de Kasdi Merbah de Ouargla, (faculté des sciences appliquées département génie civil et hydraulique) situé à 6.8 Km environ de l'Ouest du centre-ville et à une altitude de 135 m suivant les coordonnées 31°56' Nord et 5°17' Est.

## Granulométrie du sol

L'analyse granulométrique permet de déterminer la grosseur et les pourcentages des différents diamètres de grains constituant l'échantillon. On fait l'analyse granulométrique du sable et du gravier.

### ➤ Matériel nécessaire

- Une série des tamis (Figure III. 1)
- Une balance (Figure III. 2)
- Des récipients



Figure III.1 : Tamis



Figure III.2 : Balance

### ➤ Mode opératoire

L'essai consiste à classer les différents grains qui constituent l'échantillon en utilisant une série de tamis emboîtés les uns sur les autres dont les dimensions des ouvertures sont décroissantes du haut vers le bas. Le matériau analysé est placé dans le tamis supérieur et le classement des grains s'obtient par vibration de l'ensemble de la colonne des tamis. La pesée des refus des tamis permet de tracer la courbe granulométrique et de déterminer le type de sol.

Les masses des différents refus cumulés et tamisait sont rapportées à la masse totale de l'échantillon (500g sable , 4000g gravier ) .Les résultats des pourcentages de tamisait cumulés sont portés sur tableaux et graphes : voir en annexe 2 et3).

D'après le diamètre des particules, on discerne les groupes granulométries suivants :

(D'après Association Internationale)

Colloïdes.....	<. 2 $\mu$
Limon .....	2 $\mu$ <. 20 $\mu$
Sable fin .....	0.02 ÷ 0.2 mm
Sable grossier.....	0.2 ÷ 2 mm
Gravier.....	> 2 mm

D'après les résultats de tableaux (III-1 en annexe 2) donne le pourcentage des différents groupes granulométries, on déduit donc que le sol contient : 0% de gravier

69%de sable gros

31 %de sable fin

Le sol du site expérimental a donc une texture sableuse, caractérisée par un sol bien aéré, facile à travailler, mais emmagasinant difficilement l'eau et les éléments nutritifs.

### Coefficient d'uniformité

Le coefficient d'uniformité caractérise la répartition en taille des éléments qui composent l'échantillon. Il se calcule de la façon suivant :

$$Cu = \frac{D_{60}}{D_{10}}$$

Ou :

**D<sub>60</sub>**: Correspond au diamètre qui laisse passer 60 % de l'échantillon

**D<sub>10</sub>**: Correspond au diamètre qui laisse passer 10 % de l'échantillon

On tracé projection du point d'intersection de la courbe aux parentage

D'après graphes de l'analyse granulométriques, on trace la projection du point d'intersection de la courbe aux pourcentages de 60 % et 10 % sur l'axe (x), correspondant aux diamètres des tamis, et nous avons trouvé les valeurs suivantes :

$$D_{60} = 0.35, D_{10} = 0.14$$

Application numérique

$$Cu = \frac{0.35}{0.14} = 2.5$$

Selon la valeur du coefficient d'uniformité, classes comme suit :

Pour  $Cu \leq 2$  : granulométrie uniforme

Pour  $Cu > 2$  : granulométrie étalée

Donc le sol du site classe dans une répartition étalée

### Densité apparente

La densité apparente est nécessaire pour le calcul de la dose d'irrigation et de de l'évapotranspiration. Elle est égale au rapport de la masse de l'échantillon sec sur le volume apparent (c'est-à-dire il correspond à l'enveloppe externe de l'échantillon considéré).

Pour la détermination de la densité apparente, des échantillons ont été prélevés délicatement à l'aide de petits cylindres métalliques dans sol. La détermination de la densité apparente au Laboratoire des Travaux Publics du Sud a donné le résultat suivant :

La densité apparente moyenne :  $Da = 1.161 \text{ (g/cm}^3\text{)}$

### Méthodologie de travail

Sur le terrain, on effectue un réseau d'irrigation « nano- irrigation. (Photo III.1) Le réseau est composé de conduite (moistube) qu'on relie à la conduite principale à l'aide d'une vanne ( Photo III.2) pour régulariser l'alimentation en eau. (Photo III.3) Le débit est déterminé à l'aide d'une éprouvette graduée. (Photo III.4). On sème la coriandre (Photo III.5). La dose d'arrosage est égale au débit multiplié par le temps d'irrigation. On irrigue chaque cinq (5) jours. Sur le terrain, à côté du réseau, on remplit un bac de sable et on irrigue dans les conditions pour déterminer l'évapotranspiration. (Photo III.6).

Le travail consiste donc à déterminer l'évapotranspiration du bilan hydrique d'irrigation

$$\ll \text{Irrigation} = \text{pluie} + \text{ETP} - \text{Drainage} \pm \Delta R \gg$$

Le drainage sera égal à la quantité d'eau perdue par infiltration et récupérée dans un récipient gradué.



**Photo III. 1: Réseau d'irrigation**  
[Hafsi.M et Boudjema.S(2020)]



**Photo III. 2: Vanne**  
[Hafsi.M et Boudjema.S(2020)]



**Photo III. 3: Alimentation en eau**  
[Hafsi.M et Boudjema.S(2020)]



**Photo III. 4 : Mesure du débit**  
[Hafsi.M et Boudjema.S(2020)]



**Photo III. 5 : Semence de la coriandre**  
[Hafsi.M et Boudjema.S(2020)]



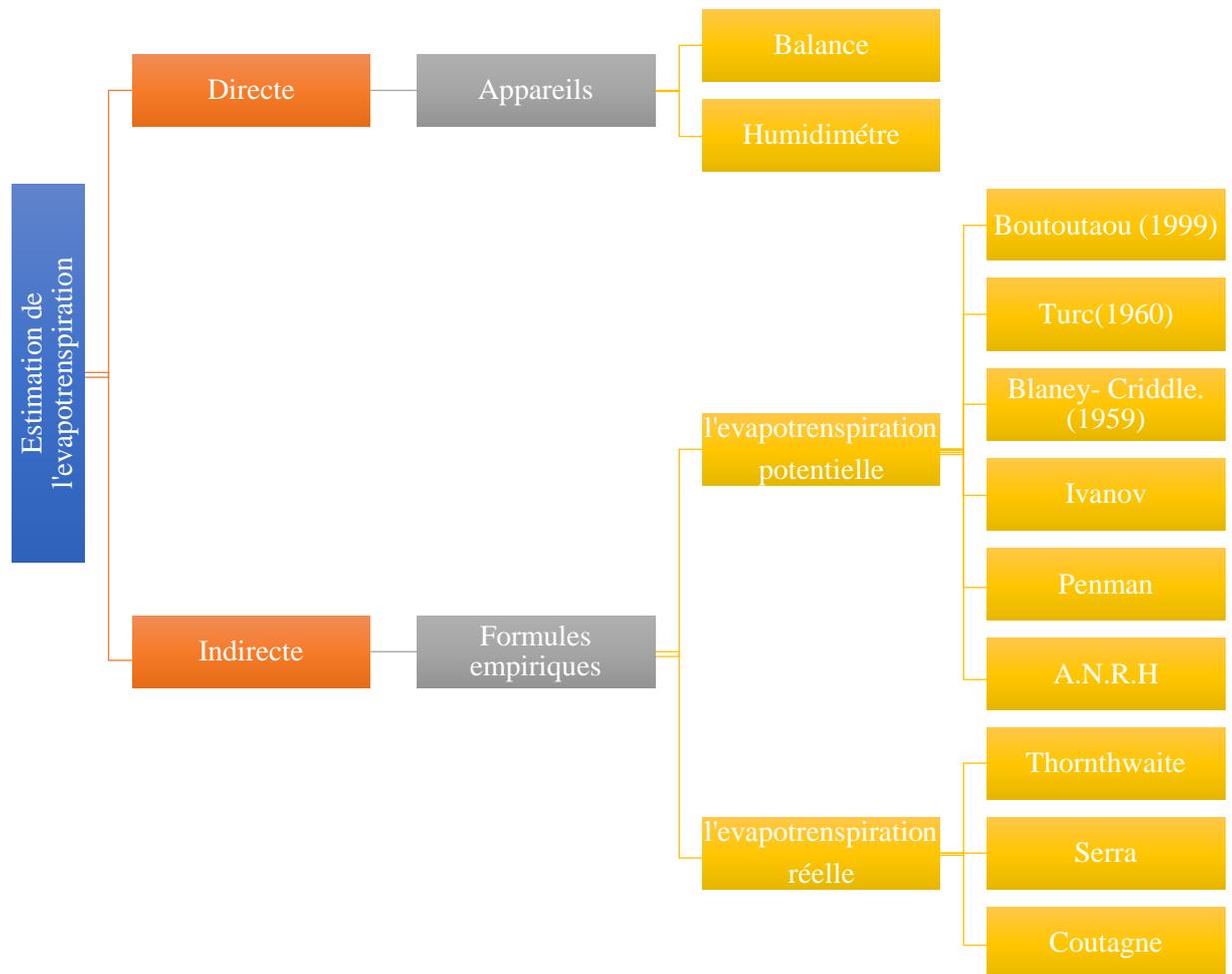
**Photo III. 6 : Evapotranpiromètre**  
[Hafsi.M et Boudjema.S(2020)]



**Photo III. 7 : Nano-irrigation [Hafsi.M et Boudjema.S(2020)]**

L'approche méthodologique consiste à déterminer l'évapotranspiration du sol expérimentalement par la méthode des pesées et à l'aide de l'humidimètre et analytiquement à l'aide de quelques formules. Les résultats seront comparés.

Le taux d'évapotranspiration est normalement exprimé en millimètres (mm) par unité de temps. Le taux exprime la quantité d'eau perdue d'une surface cultivée en unités de profondeur d'eau. L'unité de temps peut être une heure, un jour, une décennie, un mois ou même une période ou une année de croissance entière.[60]



**Figure III. 3 : Approche méthodologique**

### **Détermination de l'évapotranspiration du sol expérimentalement (méthode directe)**

On détermine expérimentalement l'évapotranspiration par deux (2) méthodes :

- Par pesées à l'aide d'une balance numérique (Photo III. 8)
- A l'aide de l'humidimètre (Photo III. 9)



**Photo III. 8 : Balance numérique**  
[Hafsi.M et Boudjema.S(2020)]



**Photo III. 9 : Humidimètre**  
[Hafsi.M et Boudjema.S(2020)]

### III.2.1.1 Détermination par pesée

#### a. Matériel

Le matériel utilisé dans ce travail est

- Cinq (5) bacs en plastique de section rectangulaire 24cm \*35.5 cm
- Une balance pour peser les bacs remplis
- Un morceau de moistube pour l'irrigation (Photo III.3)
- Gravier pour éviter l'obstruction des trous et faciliter l'infiltration
- Sable pour cultiver la plante
- Coriandre

#### b. Méthodologie

-On perce le fond du bac pour permettre la sortie de l'eau par infiltration. (Photo III.10)

L'eau récupérée donnera la quantité d'eau perdue par infiltration.

- Au fond des bacs on met une couche de gravier 2 cm d'épaisseur. Le gravier permet d'éviter l'obstruction des trous et facilite la sortie de l'eau par infiltration. On pèse le bac avec le gravier (Photo III.11)

- On remplit le bac d'une couche de sable de 20 cm hauteur de même nature que celui sur site expérimental, puis on sème la coriandre. (Photo III.12)

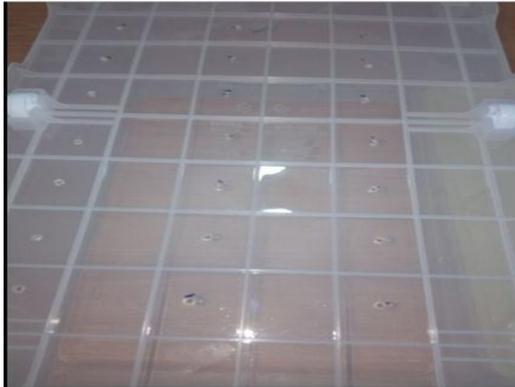
- On donne une quantité d'eau les bacs (même conditions) en irrigant à l'aide du moistube (nano-irrigation). (Photo III.7)

- On pèse les bacs après l'irrigation. On les laisse dans des conditions naturelles pendant cinq jours. Puis on les repese.

La différence entre les deux pesées est l'évapotranspiration du sol pendant cinq (5) jours.

On récupère la quantité d'eau sortante (pertes par infiltration) dans un couvercle.

Les résultats de calculs sont présentés dans le tableau IV.1 du chapitre quatre



**Photo III. 10: Fond du bac percé**

[Hafsi.M et Boudjema.S(2020)]



**Photo III. 11: Pesée du gravier**

[Hafsi.M et Boudjema.S(2020)]



**Photo III. 12: Pesée du sable [Hafsi.M et Boudjema.S(2020)]**

### III.2. 1.2. Détermination à l'aide d'un humidimètre

#### a. Matériel

Le matériel utilisé dans ce travail est le même que celui utilisé précédemment (par pesées) mais au lieu de la balance, on utilise un humidimètre.

L'humidimètre est conçu pour déterminer la quantité d'eau dans le sol ou d'un autre matériau similaire et a une plage de mesure de 0 à 50% avec une résolution de 0,1%. (Figure III.4)

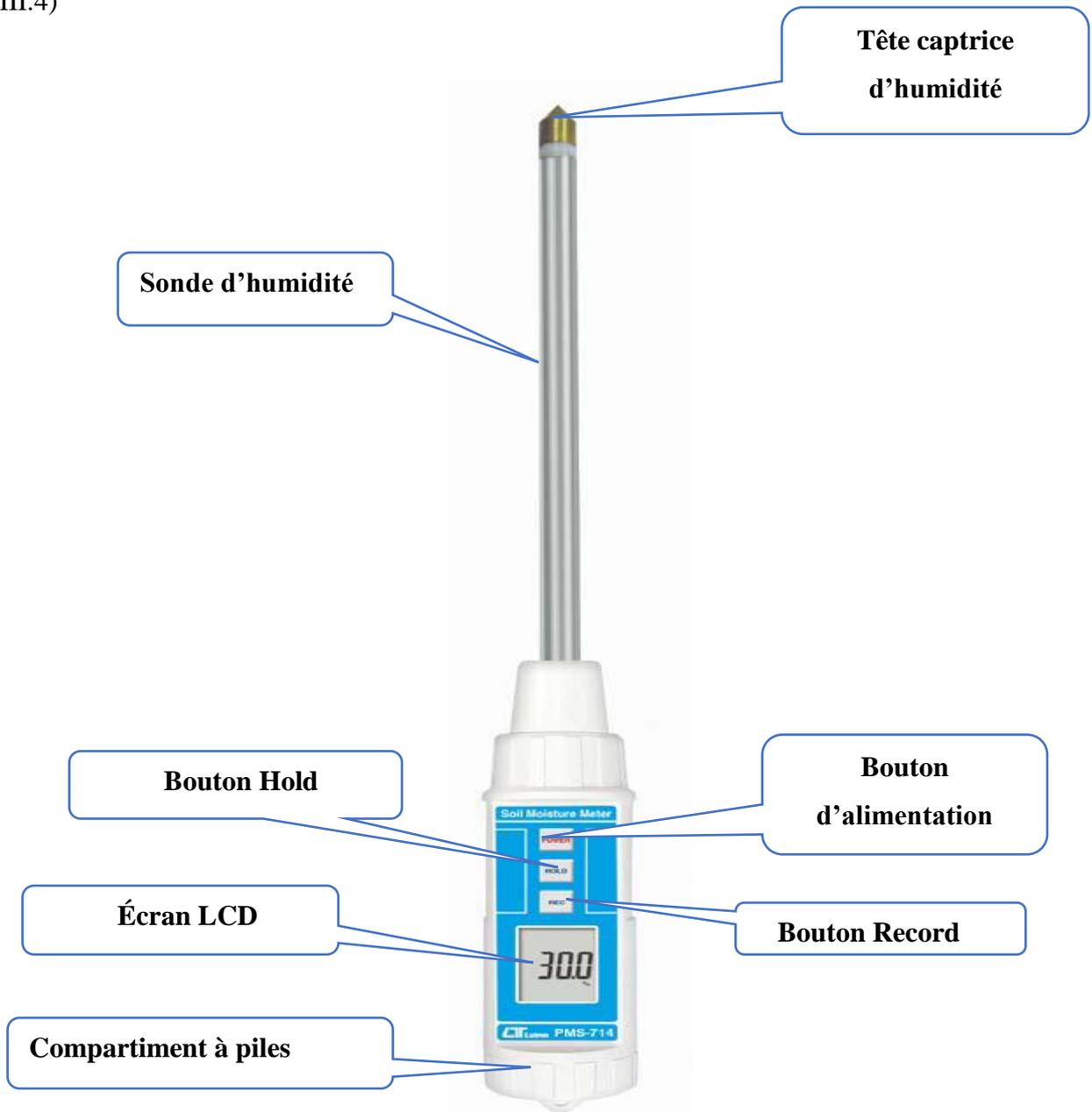


Figure III. 4 : Humidimètre

### **b. Méthodologie**

La procédure de mesure à l'aide de l'humidimètre est :

- On allume l'appareil en appuyant brièvement sur le bouton d'alimentation.
- On appuis sur le " Bouton d'alimentation " momentanément de nouveau pour éteindre l'appareil.
- On insère la tête " détection d'humidité " dans le sol.

Il est recommandé que la tête de la sonde soit insérée dans le sol d'au moins 10 cm du point de mesure.

- Pendant la mesure, on appuis sur la touche « hold » en la maintenant un moment jusqu'à la stabilisation de la valeur
- L'écran LCD affiche alors la valeur finale en %.
- On appuis sur la touche « Hold » de nouveau pour libérer la fonction de maintien de données.

Il est recommandé que la tête de sonde soit insérée dans le sol d'au moins 10 cm lors de la mesure.

Avant l'utilisation de l'appareil on fait son étalonnage. Pour cela, on prélève un nombre suffisant d'échantillons (10). On mesure l'humidité du sol de ces échantillons à l'aide de l'humidimètre et par la méthode de séchage avant et après irrigation. La différence entre avant et après arrosage donne l'humidité du sol mesurée à l'aide de l'appareil et celle par séchage.

Pour déterminer la de précision de l'appareil on utilise la formule suivante :

#### **Mesure avec l'appareil – mesure par séchage** **mesure avec l'appareil**

On récapitule les résultats dans le tableau en annexe 4.

D 'après les valeurs récapitulées sur le tableau en annexe 4, erreur varie de 0,2 à 0,4 avec une moyenne de 0.3.

A l'aide de l'humidimètre (Photo III.13), on mesure la quantité d'eau dans le sol après arrosage et cinq jours après. La différence entre les deux humidités donne l'humidité perdue par évapotranspiration.



**Photo III. 13 : Humidimètre[Hafsi.M et Boudjema.S(2020)]**

### **III.2.2 Détermination de l'évapotranspiration à l'aide de formule (méthode indirecte)**

Pour estimer l'évapotranspiration de référence on utilise des formules empiriques qui se basent sur des paramètres climatiques tels que la température, le rayonnement solaire, vitesse du vent, humidité relative,...). Celles-ci ont l'avantage d'être en général assez facilement mesurables et de plus disponibles immédiatement.

Dans des nombreuses régions. De telles formules représentent un outil commode pour le praticien.

Parmi les formules les plus utilisées citées dans le chapitre I, on a opté selon la disponibilité des données pour la détermination de l'évapotranspiration potentielle aux formules de :

- Boutoutaou (1999)
- Turc(1960)
- Blaney- Criddle. (1959)
- Ivanov
- Penman
- A.N.R.H

Et pour la détermination de l'évapotranspiration réelle aux formules de :

- Formule de Thornthwaite (1948, 1955)
- Formule de Serra
- Formule de Coutagne

### 1. Formule de BOUTOUTAOU

Pour les différentes zones climatiques de l'Algérie, Boutoutaou en 1999 a établi la formule qui relie l'évapotranspiration potentielle à la température et l'humidité de l'air. L'Évaporation potentielle mensuelle est donnée par la relation suivante: [16]

$$E_0 = 157 \beta (T + 15) \left(1 - \frac{H}{100}\right) \quad (\text{III. 1})$$

Où

- $E_0$  : Évapotranspiration potentielle annuelle, mm

- $T$  : température moyenne annuelle de l'air, C°

- $H$  : Humidité relative annuelle de l'air, %

- $\beta$  : coefficient correctif propre à chaque station météorologique, variant de 0,73 à 1,49 et tabulé en fonction des stations météorologiques ; (annexe 5)

La station la plus proche est celle de Touggourt,  $\beta = 1,02$

La formule donne évapotranspiration potentielle annuelle en mm, en prenant les paramètres climatiques annuels moyens. On a pensé dans ce travail à prendre les paramètres mensuels moyens et de diviser par 12.

### 2. Formule de TURC

Sur la base d'expériences au lysimètre, L.TURC (1961) considère que les principaux éléments qui régissent l'ETP sont essentiellement : La température, la radiation solaire, les précipitations, et la réserve en eau du sol. TURC distingue entre l'ETR et l'ETP aux pas de temps différents (journaliers, décadaires, mensuels, et annuels) ; En ce sens, il a suggéré pour chaque durée, la formule convenable ; Les plus simples étant celles qui concernent le pas mensuel calculé : [9]

$$ETP = 0.40 \frac{t}{t+15} (I_g + 50) \quad (\text{III.2})$$

Où :

$ETP$  : Evapotranspiration potentielle en mm/ mois.

$T$  : Moyenne mensuelle de la température mesurée sous abri en C°.

$I_g$  : Moyenne mensuelle de la radiation solaire globale, exprimé en cal/cm<sup>2</sup>/jours, qui s'exprime par la formule :

$$I_g = I_{ga} \left( 0.18 + 0.62 \frac{h}{H} \right)$$

**I<sub>ga</sub>**: radiation maximale donnée par des tables en fonction de la latitude. Annexe 6

**h / H** : insolation relative

**h**: durée d'insolation de la station considérée, en heures/mois.

**H** : durée mensuelle du jour, en heures/mois annexe 6

### 3. Formule de BLANEY- CRIDDLE 1959

En 1945, H. Blaney et W. Criddle ont établi une formule pour le calcul de l'ETP [ 9] :

$$ETP = K.F \quad (III.3)$$

Ensuite les recherches menées par la F.A.O., ont permis de modifier cette formule, et la suggérer pour les zones aride et semi-aride.

Cette formulation s'effectue en deux temps, le premier concerne uniquement le terme climatique de l'ETP, tandis que le second introduit les coefficients cultureux pour aboutir à l'ETP de cultures

La formule de l'ETP climatique s'écrit de manière suivante :

$$ETP_{clim.} = a.F + b \quad (III.4)$$

Où :

- **ETP** : L'évapotranspiration potentielle mensuelle en mm.

- **K** : Coefficient cultural qui varie de 0,50 à 1,20 pour différentes cultures et diverses zones climatiques.

- **F** : Force évaporante qui dépend de la température moyenne mensuelle et

$$F = (0.46 \times T + 8.13) \times P \quad (III.5)$$

Où T (°C) la méthode de Blaney et Criddle fait toujours références à des valeurs moyennes mensuelles.

$$T_{max} = \frac{\sum_1^n T_{max}}{n} \quad T_{min} = \frac{\sum_1^n T_{min}}{n} \quad T = \frac{T_{max} + T_{min}}{2}$$

**n** : est le nombre de jours du mois

**P** : le pourcentage de la durée d'éclairement pendant la période considérée en fonction de la latitude en% ( ou rapport d'éclairement h/H, défini comme pour la formule de TURC

,mais exprimé en %) . La latitude de Ouargla est de 32° 45' Nord et 31° 45' Sud. On lit sur le tableau en annexe les valeurs de P (annexe 7)

**a et b** : Coefficients de correction en fonction des trois paramètres climatiques : Humidité relative, vitesse de vent, et insolation effective moyenne (rapport des heures d'insolation et de la durée astronomique du jour

#### 4. Formule d'IVANOV

La formule d'IVANOV prend en considération la température et l'humidité de l'air et e est donnée par la relation suivant : [55]

$$E_p = 0.0018 (25+ T)^2 (100-H) \quad (III.6)$$

**E<sub>p</sub>**: l'évapotranspiration (mm/mois)

**T** : température mensuelle de l'air en C°

**H** : humidité mensuelle de l'air en %

#### 5. Formule de Penman

Nous avons proposé d'évaluer l'ETP Penman à partir des seules températures par la relation : [2]

$$ETP \text{ Penman} = K_r (H-187) * (0.032t+0.077) \quad (III.7)$$

Avec :

**ETP** en mm/mois , **H** durée théorique des jours en h/mois , **T** température mensuelle en C° et **K<sub>r</sub>** un coefficient régional .

#### 6. Formule dite ANRH

La relation de l'ETP de l'ANRH, qui permet d'évaluer l'évapotranspiration potentielle mensuelle a partir de la seule mesure de la température moyenne mensuelle correspondante de la position géographique. [2]

Elle est développée en 2002 sous la direction du Professeur J.P.Laborde et elle s'écrit sous la forme suivante :

$$ETP_{ANRH} = K_r \times K_m (H - 187) (0.032 T + 0.077) \quad (III.8)$$

Avec :

**ETP** : Évapotranspiration potentielle (mm/mois).

**K<sub>m</sub>** : Coefficient mensuel dont ses valeurs sont données dans l'annexe 8.

**K<sub>r</sub>** : Coefficient régional qu'on peut lire sur le tableau de l'annexe 9.

**T** : température moyenne mensuelle pour le mois considéré (C°).

**H** : Durée théorique mensuelle d'insolation (heures/mois) et elle est exprimée en fonction de l'ordonnée (Y) de Lambert. l'annexe 6.

### 7. Formule de Thornthwaite 1948

Thornthwaite détermine l'évapotranspiration potentielle à l'aide de la formule qui utilise un seul paramètre qui est la température. Cette formule est appliquée dans les régions arides : [9]

$$ET = 16 \left( \frac{10 T^a}{I} \right) K \quad (\text{III.9})$$

Où :

**ET** : est l'évapotranspiration en mm/mois

**T** : est la température moyenne mensuelle (C°)

**a** : est un coefficient calculé par la formule

$$a = 67,7(10^{-8} \cdot i^3) - 77,1(10^{-6} \cdot i^2) + 0,0179 \cdot i - 0,492$$

**i** : est l'indice thermique mensuel déterminé par la formule :

$$i = \left( \frac{t}{5} \right)^{1.514}$$

**I** : l'indice thermique annuel égal à la somme des douze (12) indices mensuels :

$$I = \sum_1^{12} i$$

**K** : est un coefficient de correction tabulé qui dépend du temps, du mois et de l'altitude du lieu.

### 8. Formule de Serra

L. SERA (1954) a proposé de simplifier la méthode de Thornthwaite en modifiant le coefficient a [54]

$$a = 1,6 \frac{i}{100} + 0,5$$

### 9. Formule de Coutagne

D'après A. Coutagne, une formule empirique pour déterminer l'évapotranspiration réelle est : [54]

$$ETR = P - \lambda * P^2 \quad (\text{III.10})$$

Avec :

**P** : est la précipitation moyenne annuelle (m)

**T** : est la température moyenne annuelle en (C°)

**λ** : est un coefficient déterminée par la formule

$$\lambda = 1/0.8 + 0.14T$$

Cette formule n'est applicable que si la condition :  $1/8 \lambda \leq P \leq 1/2 \lambda$  est vérifiée.

### **Conclusion du chapitre III**

Le but du choix d'une technique d'irrigation est l'économie de l'eau. On a opté pour une nouvelle méthode qui est la « Nano-irrigation ». Parmi les facteurs de détermination de la dose d'irrigation « évapotranspiration » qui dépend essentiellement des paramètres climatiques. Cette évapotranspiration est déterminée expérimentalement à l'aide de deux (2) méthodes et estimée à l'aide de quelques formules. L'évapotranspiromètre est cultivé et irrigué de façon identique au milieu environnant. Les formules élaborées pour les zones arides dépendent essentiellement des facteurs climatiques (la température moyenne de l'air et la durée relative du jour exprimée en %).

*Chapitre IV*  
*Résultat et discussion*

## Introduction

Récapitulons les résultats de la quantité d'eau perdue par évapotranspiration sur le site expérimental durant la période (28/02/2020 - 01/08/2020). Evapotranspiration est déterminée expérimentalement et estimée par quelques formules.

## Détermination la quantité d'eau perdue par évapotranspiration

L'évapotranspiration est la quantité d'eau perdue dans le sol. Elle est égale à la différence entre la réserve d'eau contenue dans le sol après arrosage ( $W_{ini}$ ) et la réserve d'eau contenue dans le sol  $n$  jours après ( $W_{fin}$ ) en mm.

$$ET = W_{in} - W_{fin} \quad (IV.1)$$

Après irrigation du bac, on détermine l'évapotranspiration à l'aide deux méthodes :

- Par pesées
- A l'aide de l'humidimètre

## Détermination par pesée

La méthode consiste à peser le bac après irrigation ( $P_{initial}$ ), et le repeser  $n$  jours après ( $P_{final}$ ). La différence entre le poids initial et le poids final est la quantité d'eau perdue (en litres) par évapotranspiration pendant  $n$  jours. On divise cette évapotranspiration par  $n$  jours pour avoir l'évapotranspiration en mm/jour.

Le nombre de jours  $n$  varie selon les conditions de l'expérimentation (possibilité de peser) et de la température.

Pour obtenir les résultats de quantité d'eau évapotranspirée en millimètre (mm), on divise le volume par la surface. Par exemple:

$$\text{Pour le volume } 1.80 \text{ litres} = 1,80 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$$

$$\text{La surface du bac est } 24\text{cm} \cdot 35,5\text{cm}$$

$$ET = 1.80 = \frac{1.80 \times 10^{-3}}{(24 \times 35,5) 10^{-4}} = 0.02 \text{ m/5jours} = 22.04 \text{ mm/5jours} = 4.40 \text{ mm/jour}$$

On récapitule les résultats de l'évapotranspiration en mm/j dans le tableau IV.1 suivant :

Tableau IV.1 Détermination de la quantité d'eau perdue par évapotranspiration par pesée .

Date	Dose d'arrosage (Litres)	Poids Initial (kg)	Poids final (Kg)	quantité d'eau perdue(l)	Evapotranspiration (mm/n jours)	Evapotranspiration (mm/j)	Moyenne (mm/j)
BAC 1							
Du 28/03/20 au 04/03/20	1,80	17,46	15,59	1,87	22,04/5jour	4,40	4,50
Du 04/03/20 au 09/03/20	1,87	17,46	15,83	1,63	19,22/5 jour	3,84	
Du 09/03/20 au 14/03/20	1,63	17,46	15,64	1,82	21,45/5 jour	4,29	
Du 14/03/20 au 19/03/20	1,82	17,46	15,42	2,04	24,03/5 jour	4,80	
Du 19/03/20 au 24/03/20	2,04	17,46	15,42	2,04	23,97/5 jour	4,79	
Du 24/03/20 au 29/03/20	2,04	17,46	15,40	2,06	24,27/5 jour	4,85	
Du 03/07/20 au 05/07/20	3	17,46	16,03	1,43	16,87/2jours	8,43	6,62
Du 05/07/20 au 08/07/20	1,43	17,46	15,58	1,88	22,11/3jours	7,37	
Du 08/07/20 au 11/07/20	1,88	17,46	15,76	1,70	19,98/3jours	6,66	
Du 11/07/20 au 15/07/20	1,70	17,46	15,61	1,85	21,75/4jours	5,43	
Du 15/07/20 au 17/07/20	1,85	17,46	16,27	1,19	14,05/2jours	7,02	
Du 17/07/20 au 19/07/20	1,19	17,46	16,64	0,81	9,61/2jours	4,80	
Du 01/08/20 au 06/08/20	3	17,46	14,87	2,59	30,43/5jours	6,08	5,07
Du 06/08/20 au 10/08/20	2,59	17,46	15,08	2,38	28,02/4jours	7,007	
Du 10/08/20 au 15/08/20	2,38	17,46	15,47	1,99	23,39/5jours	4,67	
Du 15/08/20 au 20/08/20	1,99	17,46	15,81	1,65	19,46/5jours	3,89	
Du 20/08/20 au 25/08/20	1,65	17,46	15,54	1,92	22,62/5jours	4,52	
Du 25/08/20 au 30/08/20	1,92	17,46	15,66	1,80	21,22/5jours	4,24	
BAC 2							
Du 28/03/20 au 04/03/20	1,99	17,46	15,56	1,90	22,39/5 jours	4,47	4,11
Du 04/03/20 au 09/03/20	1,90	17,46	15,81	1,65	19,46/5 jours	3,89	

Du09/03/20 au 14/03/20	1,65	17,46	15,69	1,77	20,86/5 jours	4,17	
Du14/03/20 au 19/03/20	1,77	17,46	15,51	1,95	22,88/5 jours	4,57	
Du19/03/20 au 24/03/20	1,95	17,46	15,51	1,95	22,98/5 jours	4,59	
Du24/03/20 au 29/03/20	1,95	17,46	15,44	2,02	23,74/5 jours	4,74	
Du03/07/20 au 05/07/20	3	17,46	16,09	1,37	16,15/2jours	8,07	6,62
Du05/07/20 au 08/07/20	1,37	17,46	15,61	1,85	21,72/3jours	7,24	
Du08/07/20 au 11/07/20	1,85	17,46	15,73	1,72	20,29/3jours	6,76	
Du11/0/720 au 15/07/20	1,72	17,46	15,48	1,98	23,30/4jours	5,82	
Du15/07/20 au 17/07/20	1,98	17,46	16,27	1,19	14,00/2jours	7,00	
Du17/07/20 au 19/07/20	1,19	17,46	16,64	0,82	9,66/2 jours	4,83	
Du01/08/20 au 06/08/20	3	17,46	14,70	2,76	32,48/5jours	6,49	5,23
Du06/08/20 au 10/08/20	2,76	17,46	15,10	2,36	27,79/4jours	6,94	
Du10/08/20 au 15/08/20	2,36	17,46	15,42	2,04	24 ,03/5 jours	4,80	
Du15/08/20 au 20/08/20	2,04	17,46	15,82	1,64	19,28/5 jours	3,85	
Du20/08/20 au 25/08/20	1,64	17,46	15,49	1,97	23,21/5 jours	4,64	
Du25/08/20 au 30/08/20	1,97	17,46	15,47	1,99	23,39/5 jours	4,67	
BAC 3							
Du 28/03/20 au 04/03/20	1,90	17,14	15,16	1,98	23,29/5jours	4,65	4,53
Du 04/03/20 au 09/03/20	1,98	17,14	15,50	1,64	19,30/5 jours	3,86	
Du 09/03/20 au 14/03/20	1,64	17,14	15,20	1,94	22,82/5 jours	4,56	
Du 14/03/20 au 19/03/20	1,94	17,14	15,73	1,41	16,54/5 jours	3,30	
Du 19/03/20 au 24/03/20	1,41	17,14	14,74	2,40	28,225 jours	5,64	
Du 24/03/20 au 29/03/20	2,40	17,14	14,94	2,20	25,88/5 jours	5,17	
Du 03/07/20 au 05/07/20	3	17,47	15,96	1,50	17,67/2jours	8,835	
Du 05/07/20 au 08/07/20	1,50	17,47	15,67	1,80	21,14/3jours	7,04	

Du 08/07/20 au 11/07/20	1,80	17,47	15,76	1,70	20,06/3jours	6,68	4,53
Du 11/07/20 au 15/07/20	1,70	17,47	15,58	1,88	22,15/4jours	5,53	
Du 15/07/20 au 17/07/20	1,88	17,47	16,26	1,21	14,25/2jours	7,12	
Du 17/07/20 au 19/07/20	1,21	17,47	16,52	0,94	11,14/2jours	5,57	
Du 01/08/20 au 06/08/20	3	17,14	14,31	2,83	33,27/5jours	6,65	5,19
Du 06/08/20 au 10/08/20	2,83	17,14	14,39	2,75	32,27/4jours	6,45	
Du 10/08/20 au 15/08/20	2,75	17,14	14,99	2,15	25,23/5jours	5,04	
Du 15/08/20 au 20/08/20	2,15	17,14	15,63	1,51	17,78/5jours	3,55	
Du 20/08/20 au 25/08/20	1,51	17,14	15,01	2,13	25,05/5jours	5,01	
Du 25/08/20 au 30/08/20	2,13	17,14	15,24	1,90	22,35/5jours	4,47	
BAC 4							
Du 28/03/20 au 04/03/20	1,82	16,15	13,58	2,53	29,69/5jour	5,93	5,50
Du 04/03/20 au 09/03/20	2,53	16,11	14,25	1,86	21,88/5 jour	4,37	
Du 09/03/20 au 14/03/20	1,86	16,11	13,67	2,44	28,63/5 jour	5,72	
Du 14/03/20 au 19/03/20	2,44	16,11	13,83	2,28	26,76/5 jour	5,35	
Du 19/03/20 au 29/03/20	2,28	16,11	13,61	2,49	29,29/5 jour	5,85	
Du 17/03/20 au 19/03/20	2,49	16,11	13,66	2,45	28,81/5 jour	5,76	
Du 03/07/20 au 05/07/20	3	16,46	15,03	1,43	16,81/2jour	8,40	7,16
Du 05/07/20 au 08/07/20	1,50	16,53	14,03	2,50	29,38/3jour	9,79	
Du 08/07/20 au 11/07/20	2	16,03	14,05	1,979	23,22/3jour	7,74	
Du 11/07/20 au 15/07/20	1,50	15,55	13,48	2,06	24,22/4jour	6,05	
Du 15/07/20 au 17/07/20	1,50	14,98	13,90	1,08	12,72/2jour	6,36	
Du 17/07/20 au 19/07/20	1,094	14,99	14,20	0,79	9,29/2 jour	4,64	
Du 01/08/20 au 06/08/20	3	16,15	13,74	2,41	28,34/5jour	5,66	5,75
Du 06/08/20 au 10/08/20	2,41	16,15	13,41	2,74	32,21/4jour	8,05	

Du 10/08/20 au 15/08/20	2	16,15	13,29	2,82	33,15/5jour	6,63	
Du 15/08/20 au 20/08/20	2,82	16,15	14,51	1,60	18,83/5jour	3,76	
Du 20/08/20 au 25/08/20	1,60	16,15	13,50	2,61	30,69/5jour	6,13	
Du 25/08/20 au 30/08/20	2,61	16,15	14,29	1,82	21,42/5jour	4,28	
BAC 5							
Du 28/03/20 au 04/03/20	2,29	16	14,67	1,99	23,41/5jour	4,68	5,31
Du 04/03/20 au 09/03/20	1,99	16	13,79	2,21	25,93/5 jour	5,18	
Du 09/03/20 au 14/03/20	2,21	16	13,94	2,06	24,17/5 jour	4,83	
Du 14/03/20 au 19/03/20	2,06	16	13,46	2,54	29,81/5 jour	5,96	
Du 19/03/20 au 24/03/20	2,54	16	13,73	2,26	26,58/5 jour	5,31	
Du 24/03/20 au 29/03/20	2,26	16	13,47	2,52	29,63/5 jour	5,92	
Du 03/07/20 au 05/07/20	3	16,47	14,67	1,79	21,12/2jour	10,56	8,13
Du 05/07/20 au 08/07/20	1,79	16,47	13,97	2,49	29,29/3jour	9,76	
Du 08/07/20 au 11/07/20	2	15,97	14,00	1,97	23,13/3jour	7,71	
Du 11/0/720 au 15/07/20	1,5	15,50	13,42	2,08	24,45/4jour	6,11	
Du 15/07/20 au 17/07/20	2,08	15,50	14,18	1,31	15,48/2jour	7,74	
Du 17/07/20 au 19/07/20	1,31	15,50	14,32	1,18	13,88/2jour	6,94	
Du 01/08/20 au 06/08/20	3	16	13,74	2,26	26,52/5jour	5,30	5,63
Du 06/08/20 au 10/08/20	2,26	16	13,35	2,65	31,10/4jour	7,77	
Du 10/08/20 au 15/08/20	2,65	16	13,78	2,22	26,05/5jour	5,21	
Du 15/08/20 au 20/08/20	2,22	16	13,8	2,2	25,82/5jour	5,16	
Du 20/08/20 au 25/08/20	2,20	16	13,88	2,11	24,82/5jour	4,96	
Du 25/08/20 au 30/08/20	2,11	16	13,70	2,29	26,93/5jour	5,38	

D'après ce tableau IV.1 l'évapotranspiration mensuelle est :

ETP= 4,85 mm/jour pour le mois de Mars

ETP= 7,07mm/jour pour le mois de Juillet

ETP= 5,38mm/jour pour le mois d' Août

### Détermination à l'aide d'un humidimètre

A l'aide après arrosage de l'humidimètre on mesure l'humidité après arrosage ( $H_{in}$ ) et  $n$  jours après ( $H_{fin}$ ).

L'évapotranspiration en (mm) est déterminée par la formule :

$$ET = W_{in} - W_{fin} \quad (IV.2)$$

$$ET = Da P (H_{in} - H_{fin}) \quad (IV.3)$$

$Da \rightarrow$  est la densité apparente. Dans le cas de ce type de sol  $Da = 1,161$

$P \rightarrow$  est l'épaisseur de la couche active du sol. Dans le cas de la coriandre  $P=200\text{mm}$

$H_{in}$  et  $H_{fin}$  sont l'humidité du sol après arrosage et l'humidité jours après.

Cette évapotranspiration est pendant  $n$  jours. On divise cette évapotranspiration par  $n$  jours pour avoir l'évapotranspiration en mm/jour.

Le nombre de jours  $n$  varie selon les conditions de l'expérimentation (possibilité de peser) et de la température.

Exemple de calcul :  $200 * 1,116 (23\% - 22,1\%) = 2,00 \text{ mm} / 4 \text{ jours} = 0,50 / \text{jours}$

On récapitule l'évapotranspiration en mm/jour dans le tableau suivant IV.2.

**Tableau IV. 2: Détermination de l'évapotranspiration à l'aide de l'humidimètre du mois de mars**

Date	Humidité Initiale(%)	Humidité finale (%)	Evapotranspiration (mm/n jours)	Nombre de jours	Evapotranspiration (mm/jour)
Bac 1					
Du 04/03/20 au 09/03/20	23	22,1	2,00	4	0,50
Du 09/03/20 au 14/03/20	26,2	25	2,67	5	0,53
Du 14/03/20 au 19/03/20	23,6	20,8	6,24	5	1,24
Du 19/03/20 au 24/03/20	24,9	24,3	1,33	5	0,26
Du 24/03/20 au 29/03/20	40,4	22,8	39,28	5	7,85
Du 29/03/20 au 03/04/20	26,7	25,4	2,90	5	0,58

Bac 2					
Du04/03/20 au 09/03/20	32,6	25	16,96	4	4,24
Du09/03/20 au 14/03/20	26,2	24,3	4,24	5	0,84
Du14/03/20 au 19/03/20	30,9	21,5	20,98	5	4,19
Du19/03/20 au 24/03/20	26,6	24,2	5,35	5	1,07
Du24/03/20 au 29/03/20	49,6	22,8	59,81	5	11,96
Du29/03/20 au 03/04/20	47,2	25,4	48,65	5	9,73
Bac 3					
Du04/03/20 au 09/03/20	30,4	20,7	21,65	4	5,41
Du09/03/20 au 14/03/20	41,6	24,1	39,06	5	7,81
Du14/03/20 au 19/03/20	29,8	22,2	16,96	5	3,39
Du19/03/20 au 24/03/20	27,5	22,1	12,05	5	2,41
Du24/03/20 au 29/03/20	24,6	24,3	0,66	5	0,13
Du29/03/20 au 03/04/20	25,6	22,9	6,02	5	1,20
Bac 4					
Du04/03/20 au 09/03/20	22,4	12	23,21	4	5,80
Du09/03/20 au 14/03/20	23	14,93	18,01	5	3,60
Du14/03/20 au 19/03/20	17,8	17	1,78	5	0,35
Du19/03/20 au 24/03/20	20,8	10,9	22,09	5	4,41
Du24/03/20 au 29/03/20	20,1	13	15,84	5	3,16
Du29/03/20 au 03/04/20	18,3	11,43	15,33	5	3,06
Bac 5					
Du04/03/20 au 09/03/20	22,9	10,6	27,45	4	6,86
Du09/03/20 au 14/03/20	24,6	12,4	27,23	5	5,44
Du14/03/20 au 19/03/20	24,7	16	19,41	5	3,88
Du19/03/20 au 24/03/20	22,6	10,9	26,11	5	5,22
Du24/03/20 au 29/03/20	19,8	14,3	12,27	5	2,45
Du29/03/20 au 03/04/20	18,8	14,8	8,92	5	1,78

**Tableau IV. 3 Détermination de l'évapotranspiration à l'aide de l'humidimètre du mois de Juillet**

Date	Humidité Initiale(%)	Humidité finale (%)	Evapotranspiration (mm/n jours)	Nombre de jours	Evapotranspiration (mm/jour)
<b>Bac 1</b>					
Du 05/07/20 au 08/07/20	23,5	9	32,36 mm	3	10,78
Du 08/07/20 au 11/07/20	47,2	14,1	73,87	3	24,62
Du 11/0/720 au 15/07/20	25 ,9	18,9	15,62	4	3,90
Du 15/07/20 au 17/07/20	25,9	11,8	31,47	2	15,73
Du 17/07/20 au 19/07/20	24,8	13	26,33	2	13,16
<b>Bac 2</b>					
Du 05/07/20 au 08/07/20	23,5	13,5	22,32	3	7,44
Du 08/07/20 au 11/07/20	49,5	15,3	76,33	3	25,44
Du 11/0/720 au 15/07/20	24,3	17,6	14,95	4	3,73
Du 15/07/20 au 17/07/20	29,4	18	25,44	2	12,72
Du 17/07/20 au 19/07/20	24,6	14	23,65	2	11,82
<b>Bac 3</b>					
Du 05/07/20 au 08/07/20	23,5	10,3	29,46	3	9,82
Du 08/07/20 au 11/07/20	24	16,8	16,07	3	5,35
Du 11/0/720 au 15/07/20	20,8	15	12,94	4	3,23
Du 15/07/20 au 17/07/20	26,6	12,3	31,91	2	15,95
Du 17/07/20 au 19/07/20	26,5	12,5	31,24	2	15,62
<b>Bac 4</b>					
Du 05/07/20 au 08/07/20	23,5	18,7	10,71	3	3,57
Du 08/07/20 au 11/07/20	23	13,3	21,65	3	7,21
Du 11/0/720 au 15/07/20	22,7	13,3	20,98	4	5,24
Du 15/07/20 au 17/07/20	20,7	4,3	36,60	2	18,30
Du 17/07/20 au 19/07/20	23,5	10	30,13	2	15,00
<b>Bac 5</b>					
Du 05/07/20 au 08/07/20	23,5	17,6	13,16	3	4,38
Du 08/07/20 au 11/07/20	23,2	16	16,07	3	5,35

Du 11/07/20 au 15/07/20	24,9	17,8	15,84	4	3,96
Du 15/07/20 au 17/07/20	23,9	9,2	32,81	2	16,40
Du 17/07/20 au 19/07/20	23,9	10,4	30,13	2	15,06

**Tableau IV. 4 Détermination de l'évapotranspiration à l'aide de l'humidimètre du mois d'Août**

Date	Humidité Initiale(%)	Humidité finale (%)	Evapotranspiration (mm/n jours)	Nombre de jours	Evapotranspiration (mm/jour)
Bac 1					
Du06/08/20 au 10/08/20	47,7	22,5	56,24	5	11,24
Du10/08/20 au15/08/20	34,3	24,9	20,98	5	4,19
Du15/08/20 au20/08/20	40,1	27,4	28,34	5	5,66
Du20/08/20 au 25/08/20	47,6	26,8	46,42	5	9,28
Du25/08/20 au 30/08/20	47,1	24,5	50,44	5	10,08
Bac 2					
Du06/08/20 au 10/08/20	48	26,1	48,88	5	9,762
Du10/08/20 au 15/08/20	39,2	24,7	32,36	5	6,47
Du15/08/20 au 20/08/20	46,2	23,4	50,88	5	10,17
Du20/08/20 au 25/08/20	38,9	28,4	23,43	5	4,68
Du25/08/20 au 30/08/20	43,9	23,4	45,75	5	9,15
Bac 3					
Du06/08/20 au 10/08/20	45,6	23,4	49,55	5	9,91
Du10/08/20 au15/08/20	39,7	25,8	31,024	5	6,20
Du15/08/20 au20/08/20	54,8	23,3	70,30	5	14,06
Du20/08/20 au 25/08/20	46,1	41,1	11,16	5	2,23
Du25/08/20 au 30/08/20	41,1	25,2	35,48	5	7,09
Bac 4					
Du06/08/20 au 10/08/20	23,9	17,9	13,39	5	2,67
Du10/08/20 au15/08/20	19,1	11,4	17,18	5	3,43
Du15/08/20 au20/08/20	20,4	13,1	16,29	5	3,25

Du20/08/20 au 25/08/20	16,2	12,4	8,48	5	1,69
Du25/08/20 au 30/08/20	22,6	11,3	25,22	5	5,04
Bac 5					
Du06/08/20 au 10/08/20	21,6	18,9	6,02	5	1,20
Du10/08/20 au 15/08/20	19	14,4	10,26	5	2,05
Du15/08/20 au 20/08/20	21,9	11,4	23,43	5	4,68
Du20/08/20 au 25/08/20	18,4	14,3	9,15	5	1,83
Du25/08/20 au 30/08/20	24,1	13,2	24,32	5	4,86

D'après ces tableaux (IV.2, IV.3, IV.4) l'évapotranspiration mensuelle est :

ETP= 3,64 mm/jour pour le mois de Mars

ETP= 10,95 mm/jour pour le mois de Juillet

ETP= 6,04 mm/jour pour le mois d'Août

### **Estimation de l'évapotranspiration à l'aide de formules (Méthode indirecte)**

On estime l'évapotranspiration potentielle à l'aide des formules suivantes :

- Boutoutaou
- Formule de Turc
- Formule de Blaney et Criddle
- Formule d'Ivanov
- Penman
- ANRH

Et celles de l'évapotranspiration réelle à l'aide des formules suivantes :

- Thorthwaite
- Serra
- Coutagne

On récapitule les résultats de l'évapotranspiration par toutes les formules dans les tableaux suivants (IV.5 à IV.15)

### **Evapotranspiration potentielle**

**Tableau IV. 5 : Calcul de l'évapotranspiration annuelle et mensuelle par la formule de Boutoutaou**

Mois	température moyenne T (°C)	Humidité de l'air H (%)	Evapotranspiration (mm/an)	Evapotranspiration (mm/jour)
Mars	18,1	43,6	2930,94	7,88
Juillet	35,9	24,1	6065,40	16,30
Août	35	26,1	5738,35	15,43
Annuelle	23,4	40,83	3595,11	9,66

**Tableau IV. 6 : Estimation de l'évapotranspiration mensuelle et journalière avec la formule de Turc**

Mois	Température moyenne	Durée d'insolation (h/mois)	Durée mensuelle du jour	Radiation maximale	radiation globale cal/cm <sup>2</sup> /jour	Evapotranspiration (mm/mois)	Evapotranspiration (mm/j)
Mars	18,1	268	380	783	483,32	116,65	3,76
Juillet	35,9	320	322	473	376,58	120,35	3,88
Aout	35	340	343	586	465,62	144,37	4,66

**Tableau IV. 7 : Estimation de de l'évapotranspiration mensuelle et journalière avec la formule de Blaney- Criddle**

Mois	T <sub>max</sub>	T <sub>min</sub>	Température moyenne (°C)	Pourcentage d'heures diurnes	Evapotranspiration (mm/jour)
Mars	25,6	10,6	18,1	0,27	4,44
Juillet	43,8	28,2	35,9	0,32	7,89
Aout	42,7	27,4	35	0,3	7,27

**Tableau IV. 8 : Estimation de l'évapotranspiration mensuelle et journalière avec la formule d'Ivanov**

Mois	Température moyenne (°C)	Humidité mensuelle (%)	Evapotranspiration (mm/mois)	Evapotranspiration (mm/jour)
Mars	18,1	43,6	188,58	6,08
Juillet	35,9	24,1	506,70	16,18
Aout	35	26,6	475,63	15,34

**Tableau IV. 9 : Détermination de l'évapotranspiration mensuelle et journalière d'après la méthode de Penman**

Mois	Kr	Km	Durée mensuelle d'insolation H (heures/mois)	Température T (°C)	ET (mm/mois)	(ET mm/j)
Mars	0,99	1,11	380	18,1	139,17	4,49
Juillet	0,99	0,97	322	35,9	158,91	5,13
Aout	0,99	0,92	343	35	170,07	5,49

**Tableau IV. 10 : Détermination de l'évapotranspiration mensuelle et journalière d'après la méthode de ANRH**

Mois	Kr	Km	Durée mensuelle d'insolation H (heures/mois)	Température T (°C)	ET(mm/mois)	(ET mm/j)
Mars	0,99	1,11	380	18,1	139,17	4,49
Juillet	0,99	0,97	322	35,9	158,91	5,13
Aout	0,99	0,92	343	35	170,08	5,49

### L'évapotranspiration réelle

Tableau IV. 11 : Détermination de l'indice thermique annuel de la formule de Thornthwaite

Mois	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	I= $\sum i$
T °c	12,2	14,1	18,1	23,1	27,8	32,6	35,9	35	30,8	24,6	17,4	12,8	
I	3,86	4,80	7,01	10,15	13,43	17,09	19,78	19,03	15,68	11,16	6,61	4,15	132,75

Tableau IV. 12: Détermination de l'évapotranspiration mensuelle et journalière d'après la méthode de Thornthwaite

Mois	T	A	I	I	ET (mm/mois)	ET (mm/j)
Mars	18,1	0,61	7,01	132,75	7,05	0,23
Juillet	35,9	0,82	19,78		22,17	0,72
Aout	35	0,82	19,03		22,24	0,72

Tableau IV. 13: Détermination de l'évapotranspiration mensuelle et journalière d'après la méthode de Serra

Mois	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	I= $\sum i$
T °c	12,2	14,1	18,1	23,1	27,8	32,6	35,9	35	30,8	24,6	17,4	12,8	
I	3,84	4,77	6,93	9,99	13,19	16,75	19,36	18,64	15,38	10,98	6,53	4,12	130,48

Tableau IV. 14 : Détermination de l'évapotranspiration mensuelle et journalière d'après la méthode de Serra

Mois	T	A	I	I	ET (mm/mois)	ET (mm/j)
Mars	18,1	0,62	6,93	130,48	19,60	0,63
Juillet	35,9	0,82	19,35		36,69	1,18
Aout	35	0,82	12,42		35,93	1,16

Tableau IV. 15 Détermination de l'évapotranspiration d'après la méthode de Coutagne

Mois	T	$\Lambda$	$1/8 \lambda$	P	$1/2 \lambda$		ET (mm/mois)	ET (mm/j)
Mars	18,1	3,78	0,47	5,19	1,89		Condition non vérifiée	
Juillet	35,9	6,28	0,78	0,35	3,14		Condition non vérifiée	
Aout	35	6,15	0,77	0,27	3,06		Condition non vérifiée	

## Discussion

Les résultats de calcul de l'évapotranspiration sont récapitulés dans le tableau IV.16 suivant

**Tableau IV. 16 Résultats de calcul de l'évapotranspiration**

<b>Evapotranspiration en mm/jour</b>					
<b>Mois</b>		<b>Mars</b>	<b>Juillet</b>	<b>Aout</b>	
<b>Méthodes directes</b>	Pesées	4,85	7,07	5,38	
	Humidimètre	3,64	10,95	6,04	
<b>Evapotranspiration potentielle en mm/jour</b>					
<b>Méthodes indirectes</b>	Boutoutaou	7,88	16,30	15,43	
	Turc	3,76	3,88	4,66	
	Blaney- Criddle	4,44	7,89	7,27	
	Penman	4,49	5,13	5,49	
	ANRH	4,49	5,13	5,49	
	Ivanov	6,08	16,18	15,34	
	<b>Evapotranspiration réelle en mm/jour</b>				
	Thornthwaite	0,23	0,72	0,72	
	Serra	0,63	1,18	1,16	
	Coutagne	Condition non vérifiée			

Les résultats expérimentaux et calculés montrent l'évapotranspiration croît avec la température.

- Pour l'évapotranspiration potentielle :

Les résultats obtenus par formule d'Ivanov et celle de Boutoutaou sont presque égaux mais légèrement supérieurs aux résultats expérimentaux.

La formule de Blaney-Criddle, la formule de Turc, la formule de Penman, et la formule de l'ANRH donnent des résultats très proches aux résultats expérimentaux.

- Pour l'évapotranspiration réelle :

Formule de Coutagne n'est pas applicable car la condition :  $1/8 \lambda \leq P \leq 1/2 \lambda$  n'est pas vérifiée. La formule de Serra et celle de Thornthwaite donnent des résultats très proches à l'évapotranspiration réelle des régions arides en Algérie.

-Déterminons l'erreur entre les valeurs mesurées et valeurs expérimentales de l'évapotranspiration potentielle. Par la formule :

$$\text{Erreur (\%)} = \left( \frac{E_{\text{humidimètre}} - E_{\text{pesée}}}{E_{\text{humidimètre}}} \right) 100 \quad (\text{IV.4})$$

**Tableau IV. 17 Résultats de l'erreur entre les deux méthodes expérimentales**

<b>Evapotranspiration potentielle expérimentale</b>				
<b>Pesées</b>	4,85	7,07	5,38	
<b>Humidimètre</b>	3,64	10,95	6,04	
<b>Erreur (%)</b>	-33 ,24	35,43	10 ,93	<b>4</b>

L'erreur est égale à 4%. Les résultats expérimentaux sont donc acceptables.

-Déterminons l'erreur entre les valeurs calculées et valeurs expérimentales pour l'évapotranspiration potentielle déterminée par la formule :

$$\text{Erreur (\%)} = \left( \frac{E_{\text{expérimental}} - E_{\text{formule}}}{E_{\text{Formule}}} \right) 100 \quad (\text{IV.5})$$

**Tableau IV. 18: Erreur entre les valeurs expérimentales et les valeurs calculées de l'évapotranspiration potentielle**

<b>Evapotranspiration potentielle en mm/jour</b>					<b>Moyenne de l'erreur (%)</b>	
<b>Mois</b>	<b>Mars</b>	<b>Juillet</b>	<b>Aout</b>			
	Pesées	4,85	7,07	5,38		
	Humidimètre	3,64	10,95	6,04		
	Blaney- Criddle	4,44	7,89	7,27		
1	Erreur avec Pesée	9,32	-10,37	-25,98	<b>9,01</b>	
	Erreur avec Humidimètre	-18,01	38,78	-16,91	<b>1,28</b>	
2	Boutoutaou	7,88	16,30	15,43		
	Erreur avec Pesée	38,40	56,62	65 ,13		<b>53,38</b>
	Erreur avec Humidimètre	53,81	32,82	60,85		<b>49,16</b>
3	Turc	3,76	3,88	4,66		

	Erreur avec Pesée	22,53	45,12	13,38	<b>27,01</b>
	Erreur avec Humidimètre	-3,30	64,57	22,85	<b>28,04</b>
4	Penman	4,49	5,13	5,49	
	Erreur avec Pesée	7,50	27,44	-2,04	<b>10,96</b>
	Erreur avec Humidimètre	-23,35	53,15	9,11	<b>12,97</b>
5	ANRH	4,49	5,13	5,49	
	Erreur avec Pesée	7,50	27,44	-2,04	<b>10,96</b>
	Erreur avec Humidimètre	-23,35	53,15	9,11	<b>12,97</b>
6	Ivanov	6,08	16,18	15,34	
	Erreur avec Pesée	20,17	56,30	64,93	<b>47,13</b>
	Erreur avec Humidimètre	40,13	32,32	60,63	<b>44,36</b>

L'erreur des résultats expérimentaux par pesée et ceux déterminés par la formule de Blaney-Criddle, est de 9% et ceux avec l'humidimètre sont de 1.28%

L'erreur des résultats expérimentaux par pesée et ceux déterminés par la formule de Boutoutaou, est de 53,38 % et ceux avec l'humidimètre sont de 49,16%

L'erreur des résultats expérimentaux par pesée et ceux déterminés par la formule de Turc, est de 27,01% et ceux avec l'humidimètre sont de 28,04%

L'erreur des résultats expérimentaux par pesée et ceux déterminés par la formule de Penman, est de 10,96% et ceux avec l'humidimètre sont de 12,97%

L'erreur des résultats expérimentaux par pesée et ceux déterminés par la formule de ANRH, est de 10,96% et ceux avec l'humidimètre sont de 12,97%

L'erreur des résultats expérimentaux par pesée et ceux déterminés par la formule de Ivanov, est de 47,13% et ceux avec l'humidimètre sont de 44,36%

### Conclusion du chapitre IV

Pour la détermination la dose d'arrosage dans le cas de nano-irrigation, l'évapotranspiration est déterminée expérimentalement à l'aide de deux méthodes (par pesée et à l'aide de l'humidimètre) et à l'aide des formules en fonction des facteurs météorologiques.

L'erreur des résultats expérimentaux des deux méthodes est égale à 4%. Les résultats expérimentaux sont donc acceptables.

Pour l'évapotranspiration potentielle les formules de Blaney-Criddle, Turc, Penmam, et ANRH donnent des résultats très proches aux résultats expérimentaux. Les résultats

obtenus par formule d'Ivanov et celle de Boutoutaou sont presque égaux mais légèrement supérieurs aux résultats expérimentaux.

L'erreur des résultats expérimentaux et calculées pour les différentes méthodes est 51,27% pour Boutoutaou, 27,53% pour Turc, 5,15% pour Blaney et Criddle, 45,75% pour Ivanov, 11,97% Penman et 11,97% ANRH.

Pour l'évapotranspiration réelle, la formule de Coutagne n'est pas applicable. La formule de Serra et celle de Thornthwaite donnent des résultats très proches à l'évapotranspiration réelle des régions arides en Algérie.

# *Conclusion générale*

## Conclusion générale

L'eau est une denrée rare en particulier dans les régions arides et semi arides, où sa gestion optimale paraît indispensable pour la préserver et la mieux exploiter. Pour mieux gérer l'irrigation, il est indispensable de bien connaître les quantités à apporter aux plantes. Pour atteindre ce but, il faut bien estimer les quantités perdues. Donc une connaissance de l'évapotranspiration paraît indispensable, car l'évapotranspiration conditionne le bilan hydrique du sol.

Dans une recherche bibliographique on a présenté les caractéristiques essentielles de l'évapotranspiration, les méthodes d'irrigation en particulier la nano-irrigation et la coriandre. D'après cette étude bibliographique les méthodes du bilan hydrique pour déterminer l'ETP sont les mêmes que les méthodes pour déterminer l'évaporation d'une surface humide ou d'une nappe d'eau libre. On a cité quelques techniques courantes de mesure: les bacs à évaporation, l'évaporimètre, Piche et les mesures lysimétriques. Au travers de cette synthèse bibliographique on a aussi montré que toutes les méthodes d'irrigation ont des avantages et inconvénients. Dans cette étude on a opté pour la nano-irrigation, qui est une nouvelle technique qui permet de diminuer les pertes d'eau par évaporation, ruissellement et infiltration. Comme culture, on a utilisé la coriandre qui peut être cultivée dans les zones arides et semi-arides, ne réclame pas d'arrosage particulier et ne doit être arrosée qu'en cas de sécheresse prolongée. La levée est assez rapide puisqu'elle a lieu environ quelques jours après le semis.

Le site expérimental est à l'université Kasdi Merbah de Ouargla. La région de Ouargla occupe la partie basse au Nord-est des déserts du Sahara. Cette région désertique est caractérisée par un climat aride, marqué notamment par la faiblesse et l'irrégularité des précipitations d'une part, et les températures trop élevées d'autre part. Cette aridité se constate aussi par une forte évaporation qui constitue l'un des facteurs climatiques majeurs actuels qui règnent dans la ville de Ouargla.

L'évapotranspiromètre est le dispositif mis en place dont la forme et les dimensions ont été conçus pour une mesure de l'évapotranspiration. Il permet de suivre les pertes en eau d'une surface de sol semée de coriandre et placée en conditions climatiques naturelles, et la même l'alimentation hydrique qui est assurée par des irrigations chaque cinq (5) jours.

Cet évapotranspiromètre est un bac parallélépipédique de 24 x 35.5 centimètres carrés de surface et de 25 centimètres de profondeur. La profondeur est suffisante pour que les racines puissent se développer. Il est rempli de bas en haut de gravier et de sable dont le poids

moyen est de l'ordre de 20 Kilogrammes. Le gravier permet d'éviter l'obstruction des trous et facilite la sortie de l'eau par infiltration.

L'eau de drainage est recueillie et versée dans une éprouvette graduée. Cette eau de drainage correspond aux pertes par infiltration.

Pour la détermination la dose d'arrosage dans le cas de nano-irrigation, l'évapotranspiration est déterminée expérimentalement à l'aide de deux méthodes (par pesée et à l'aide de l'humidimètre) et à l'aide des formules en fonction des facteurs météorologiques.

La première méthode expérimentale consiste à effectuer une pesée du bac après irrigation et cinq (5) jours après, et la deuxième méthode dans les mêmes conditions mais à l'aide d'un humidimètre. La perte de poids du système est égale à l'évapotranspiration.

L'évapotranspiration obtenue expérimentalement par la méthode de pesée est égale à 4.9 pour le mois de mars, 7.07 pour juillet 5.4 pour Aout. Et par la méthode de l'humidimètre est égale à 3.64 pour le mois de mars, 10.95 pour juillet 6.4.4 pour Aout. L'erreur des résultats expérimentaux des deux méthodes est égale à 4%. Les résultats expérimentaux sont donc acceptables.

Ces résultats expérimentaux sont très proches de ceux calculés à l'aide des formules les plus utilisées dans les régions arides. L'erreur pour les différentes méthodes est 51.27% pour Boutoutaou, 27.53 % pour Turc , 5.15 % pour Blaney et Criddle , 45.75 % pour Ivanov 11,97 % pour Penman et 11,97 % pour ANRH.

Les meilleurs résultats obtenus sont en appliquant la formule de Blaney et Criddle.

Pour l'évapotranspiration réelle, la formule de Coutagne n'est pas applicable. La formule de Serra et celle de Thornthwaite donnent des résultats très proche à l'évapotranspiration réelle des régions arides en Algérie..

Cette étude est avant tout expérimentale et a pour ambition de détermination de l'évapotranspiration potentielle dans le cas de nano-irrigation dans les régions arides.

Il est nécessaire de poursuivre les expérimentations avec plusieurs autres combinaisons des doses et fréquences d'arrosage pour arriver à une méthodologie technico-économique hydrique et environnementale qui s'adapte aux conditions locales.

Afin de compléter cette étude et de cerner de près les lois qui réagissent la détermination des doses d'irrigation et de l'évapotranspiration, on recommande pour le futur d'améliorer cette méthode d'irrigation qui utilise une quantité d'eau nécessaire à la plante et évite la remontée de la nappe.

## *Références bibliographiques*

## Références bibliographiques

- [1] **A. D. E. S. Matieres**, “Evaporation et interception.”
- [2] **A.N.R.H** :2002.Notice explicative de la carte des évapotranspirations potentielles de l’Algérie du nord au 1/500000. Agence national des ressources hydrauliques : projet coopération algero-allemande N°94 21 83 5.
- [3] **ADEBOYE O,B;OSUNBITAN J,A, ADEKALU K.Oe t OKUNADE D.A** (2009) - Evaluation of FAO-56 Penman-Monteith and temperature based models in estimating Reference evapotranspiration. *Agricultural Engineering International: the Cigrejournal* manuscrit n° 1291, vol. XI, 25 p. 2009
- [4] **AHOOGHALANDARI M., KHIADANI M. et JAHROMI W.E.** (2016) Calibration of Valiantzas' reference evapotranspiration equations for the Pilbara region, Western Australia. *Theoretical and Applied Climatology*, 12 p.
- [5] **ALEXANDRIS S., STRICEVIC R. et PATKOVIC S.** (2008) Comparative analysis of reference evapotranspiration from the surface of rainfed grass in central Serbia, calculated by six empirical methods against the Penman-Monteith formula. *European Water*, vol. 21, n°22, p. 17-28.
- [6] **ALLAM, Salah.** Contribution à une étude écologique de genre *Phillyrea* Dans la région de Tlemcen. 2014.PhDThesis.
- [7] **ALLIES, Aubin.** Estimation de l’évapotranspiration par télédétection spatiale en Afrique de l’Ouest: vers une meilleure connaissance de cette variable clé pour la région. 2018. PhD Thesis.
- [8] **BAKHTIARI B, GHLIRMAN N, LIAGHAT A.M , HOOGENBOOM G** (2011) - Evaluation of reference evapotranspiration models for a semi-arid environment using lysimeter measurements. *Journal of Agricultural Science and Technology*, vol. 13, n° 2, p. 223-237.
- [9] **BELLA ,N** . Aptitude aux écoulements dans l’impluvium de la ville de Batna et les problèmes d’inondations.Thèse de Magister, Inst science de la terre, Université de Batna.2005.
- [10] **BEN MANSOUR, Siham; KORICHI, Rahila.** Etude de l’évapotranspiration réelle liée à l’évapotranspiration potentielle et à la production agricole phœnicicole à l’échelle de l’écosystème de l’ITAS. Mise au point d’un modèle basé sur la consommation de l’eau et la production agricole. 2013. PhDThesis.

- [11] **BENABADJI, N; BOUAZZA, M.** Quelques modifications climatiques intervenues dans le Sud-Ouest de l'Oranie (Algérie-occidentale). *Rev. Energ. Ren*, 2000, 3: 117-125.
- [12] **BERREGUI, Asma.** Les ressources en eaux et leurs conséquences sur l'environnement oasien: cas région de Ouargla. mémoire de magister, Université de Ouargla, 2013.
- [13] **BODIAN, A., Ndiaye, O., &Dacosta, H. (2016).** Evolution des caractéristiques des pluies journalières dans le bassin versant du fleuve Sénégal:Aavant et après rupture. *Hydrological Sciences Journal*, 1–9. doi:10.1080/02626667.2014.950584
- [14] **BOUDJELLAL ,Lazhar,.** Rôle de l'oasis dans la création de l'îlot de fraîcheur dans les zones chaudes et arides « Cas de l'oasis de chetma -Biskra -Algérie ». 2009.
- [15] **BOUDJERADA ,Idriss .** Estimation et Cartographie de L'évapotranspiration potentielle.Mémoire de Master, école nationale supérieure d'hydraulique Arbaoui ABDELLAH.2015.
- [16] **BOUTOUTAOU (D) 2006 .**Méthode e calcul des débits de crues en Algérie Septentrional. Séminaire national sur « Les ressources en eau et leurs utilisations ».
- [17] **BROUWER, C., et al.** Méthodes d'irrigation. Gestion des Eaux en Irrigation. Manuel de Formation, 1990.
- [18] **BRUNEL, Jean-Pierre, et al.** Evaporation des nappes d'eau libre en Afrique sahélienne et tropicale. 1992.
- [19] **C. A. P. G. Iii.**Classification de Cronquist (1981), no. 2009, pp. 1–13, 1981.
- [20] **C.T.G.R.E.F,** “Evaluation des quantités d'eau nécessaires aux irrigations,” p. 200, 1979.
- [21] **CHARLES, Riou.** La détermination pratique de l'évaporation. Application à, 1975.
- [22] **CHARRE, Joël.** Dessine-moi un climat. Que penser du diagramme ombrothermique. *Mappemonde*, 1997, 2.97: 29-31.
- [23] **CHATZITHOMAS C.D. et ALEXANDRIS S.G. (2015)** - Solar radiation and relative humidity based, empirical method, to estimate hourly reference evapotranspiration. *Agricultural Water Management*, vol. 152, p. 188-197. DOI : [10.1016/j.agwat.2015.01.019](https://doi.org/10.1016/j.agwat.2015.01.019)
- [24] **CHIALI .G .** L'irrigation, Matériel Hydraulique Tubes et Accessoires Pvc, p2.
- COSANDEY C. et ROBINSON M. (2000) - Hydrologie continentale. Édit. Armand Colin, Paris, 353 p. DOI : [10.3917/arco.cosan.2012.01](https://doi.org/10.3917/arco.cosan.2012.01)

- [25] **COSANDEY C. et ROBINSON M. (2000)** *Hydrologie continentale*. Édit. Armand Colin, Paris, 353 p. DOI : [10.3917/arco.cosan.2012.01](https://doi.org/10.3917/arco.cosan.2012.01)
- [26] **DALTON, J.** Experimental essays on the constitution of mixed gases. Manchester Lit. Philos. Soc. Mere. 1802. Proc., 5: 556---602.
- [27] **DIOP L., BODIAN A. et DIALLO D. (2015)** Use of atmometers to estimate reference evapotranspiration in Arkansas. African Journal of Agricultural Research, vol. 10, n° 48, p. 4376-4683.
- [28] **DIOUF O.C., WEIHERMÜLLER L., BA K., FAYE S.C., FAYE S. et VEREECKEN H. (2016)** Estimation of Turc reference evapotranspiration with limited data against the Penman-Monteith Formula in Senegal. Journal of Agriculture and Environment for International Development, vol. 110, n°1, p. 117-137.
- [29] **DJAMAN K., BALDE A.B., SOW A., MULLER B., IRMAK S., NDIAYE M.K., MANNEH B., MOUKOUMBI Y.D., FATAKUCHI K. et SAITO K. (2015)** Evaluation of sixteen reference evapotranspiration methods under sahelian conditions in the Senegal River Valley. Journal of Hydrology: Regional Studies, vol. 3, p. 139-159.
- [30] **DJAMAN K., IRMAK S., ASCE M., KABENGA I. et FUTAKUCHI K. (2016-a)** Evaluation of FAO56 Penman-Monteith' model with limited data and the Valiantzas models for estimating cross reference evapotranspiration in sahelian conditions. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, vol. 142, n° 11, p. 1-14.
- [31] **Djaman, K., Tabari, H., Balde, A. B., Diop, L., Futakuchi, K., & Irmak, S. (2016)**. Analyses, calibration and validation of evapotranspiration models to predict grass-reference evapotranspiration in the Senegal river delta. Journal of Hyd.
- [32] **DJERBI, M.** Récolte des dattes. Précis de phéniciculture, FAO, Tunis, 1994, 101-109.
- [33] **DJIKOU S. (2006)** Calcul de l'ETP Penman-Monteith à différents pas de temps sur quatre sites du haut bassin de l'Ouémé. Mémoire de stage, Institut de Recherche pour le Développement (IRD), Montpellier, 35 p.
- [34] **ELHAJOUJI, Brahim.** Nano irrigation : irrigation par nanoutube .agriculture du maghreb N°97.2016.
- [35] **FAO** , Organisation des nations unies pour l'alimentation et l'agriculture Rome, 191p [i3]

- [36]FISHER D.K. , PRINGLE III H.C. (2013) Evaluation of alternative methods for estimating reference evapotranspiration. Agricultural Sciences, vol. 4, n° 8A, p. 51-60. DOI : [10.4236/as.2013.48A008](https://doi.org/10.4236/as.2013.48A008)
- [37]HADJOU, Smir ; CHOGUEUR, Amine. Etude technico-économique de l'irrigation par pompage solaire photovoltaïque, d'une palmeraie de palmiers. Etude de cas.2018. PhDThesis.
- [38]HAFIANE, Ahmed Amine ; HADJRIOUA Bilal. Ressource en eau et aménagement hydroagricole dans la zone de Sidi-Khouiled. mémoire de master, Université de Bejaia ,2015.
- [39]HEYDARI M.M, AGHAMAJIDI R, BEYGIPOOR G.H. et HEYDARI M (2014) - Comparison and evaluation of 38 equations for estimating reference evapotranspiration in an arid region. Fresenius Environmental Bulletin, vol. 23, n° 8, p. 1985-1996.
- [40]IDDER, Med T. Contribution à l'étude des principaux facteurs de dégradation de l'oasis du Ksar de Ouargla. Mémoire de fin d'étude, université de Ouargla, Faculté des Sciences et Sciences de l'Ingénieur, 79p, 2005.
- [41]IDDER, Tahar, et al. Les oasis du Sahara algérien, entre excédents hydriques et salinité. L'exemple de l'oasis de Ouargla. Revue des sciences de l'eau/Journal of Water Science, 2014, 27.2: 155-164.
- [42]Jia, X. (2013) Comparison of Reference Evapotranspiration Calculations for Southeastern North Dakota. Irrigation & Drainage Systems Engineering, 2(3). doi:10.4172/2168-9768.1000112 url to share this paper: [sci-hub.tw/10.4172/2168-9768.1000112](https://sci-hub.tw/10.4172/2168-9768.1000112)
- [43]LADLANI, Ibtissem. Contribution à la gestion optimale de la ressource en eau mobilisée «choix de formule empirique pour l'estimation de l'évapotranspiration potentielle" ETP" dans les régions de Tébessa et Annaba». 2007. PhDThesis. Université de Batna 2.
- [44]LAROUCI, N. Contribution à la conception d'un évaporomètre a surface Poreuse. 1991. PhDThesis. ThèseIng. Agr., INA, Al harrach.

- [45]MAILHOL, J. C., et al Systèmes d'irrigation et économies d'eau sous climat méditerranéen: Etude expérimentale et modélisation. In: Symposium international" Agriculture durable en région Méditerranéenne (AGDUMED). 2009. p. 156-165.
- [46]MAKHLOUFI A. Calibrage spatial et temporel de quelques relations d'usage courant pour l'estimation de l'évapotranspiration de l'Algérie du Nord. Mémoire de Magistère, Université Hadj Lakhdar (Batna, Algérie), 117 p. 2010.
- [47]Martí, P., Zarzo, M., Vanderlinden, K., &Girona, J. (2015).Parametric expressions for the adjusted Hargreaves coefficient in Eastern Spain. Journal of Hydrology, 529, 1713–1724. doi:10.1016/j.jhydrol.2015.07.054
- [48]MEDJERAB, A. Les situations météorologiques extrêmes, signe d'un éventuel changement climatique : cas des vagues de froid sur le nord de l'Algérie .2013.
- [49]MJEJRA, Mustapha. Étude de l'évapotranspiration dans le bassin versant de Mejerda (en Tunisie): apport de la télédétection satellitaire et des Systèmes d'Information Géographique. 2015. PhDThesis.
- [50]MOKHTARI, Nouredine, et al. Spatialisation des bioclimats, de l'aridité et des étages de végétation du Maroc. Revue Marocaine des Sciences Agronomiques et Vétérinaires, 2014, 2.1: 50-66.
- [51]MOSHE,Sné. L'IRRIGATION AU GOUTTE A GOUTTE. Edition Ministère de l'agriculture et du développement rural, Centre de coopération internationale pour le développement agricole, 2007.
- [52]MUSY, André; HIGY, Christophe. Hydrologie: Une science de la nature. PPUR presses polytechniques, 2004.
- [53]NAOREM N,DEVI T.K (2014) Estimation of potential evapotranspiration using empirical models for Imphal. International Journal of Innovative and Exploring Engineering, vol. 4, n° 7, p. 119-123.
- [54]NOFAL, Salah. Etude hydrogéologique à la confluence Rhône-Durance (Secteur d'Avignon). 2009. PhDThesis. Université d'Avignon et des Pays de Vaucluse (UAPV), Avignon,FRA.
- [55]MASMOUDI ,Charfi, Chiraz (2017)Utilisation des Fonctions de Répartition de la Pluie pour la Détermination des Besoins en Eau d'Irrigation de l'Olivier. Maître de Conférences.

- [56]O.N.M , National de Météorologie, données climatiques de la période 2008-2017station de Ouargla.
- [57]OMM (1994) Guides des pratiques hydrologiques : acquisition et traitement des données, analyses, prévision et autres applications. Édit. Organisation Météorologique Mondiale, Genève (Suisse), vol.°168, 5<sup>ème</sup> édition, 793 p.
- [58]OULHACI, Dalila . Ruissellement inter-annuel en Algérie septentrionale (Relation entre , Ruissellement Pluie et Evaporation ) . PhDThesis. 2016.
- [59]PÉGUY, Ch-P. Précis de climatologie. 2eme édition, ed. Masson et cie.
- [60]Richard G. Allen, Luis S. Pereira, Dirk Raes& Martin Smith. Crop Evapotranspiration – Guidelines for Computing Crop Water Requirements. FAO Irrigation and drainage paper 56 .1998.
- [61]RIOU C. (1975) La détermination pratique de l'évaporation ; application à l'Afrique Centrale. Édit. ORSTOM, Paris, 234 p.
- [62]ROCHE M. (1963) Hydrologie de surface. Édit. Gauthier-Villars / ORSTOM, Paris, 431 p.
- [63]ROUVILLOIS-BRIGOL M. Le pays de Ouargla (Sahara algérien). Variations et organisation d'un espace rural en milieu désertique. Thèse pour le Doctorat de Géographie. Publication n°2 de Département de Géographie. Université Paris-Sorbonne, 389p. 1975.
- [64]S, Crid ; E, Floride. Irrigation souterraine 9.1, no. 1962, 1967.
- [65]SAGGAÏ, Sofiane. Réduction de l'évaporation des plans d'eau par les films monomoléculaires en zones arides. Mémoire de Magistère, Université de Ouargla ,2008 .
- [66]SAIYOURI, Nadia.Méthodes d'irrigation en milieu aride.2012.
- [67]SELTZER, Paul, et al. Le climat de l'Algérie. Carbonel, 1946. p219.
- [68]SIBOUKEUR, Abdellah. L'eau et l'espace agraire dans la cuvette de Ouargla: cas de la palmeraie du Ksar. 2016. PhDThesis.
- [69]SKHIRI, Ahmed. Les bases de l'irrigation : calcul des besoins en eau .2017.
- [70]Tabari, H., &Talaee, P. H. (2011). Local Calibration of the Hargreaves and Priestley-Taylor Equations for Estimating Reference Evapotranspiration in Arid and Cold Climates of Iran Based on the Penman-Monteith Model. Journal of Hydrologic Engineering, 16(10), 837–845. doi :[10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0000366](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000366)
- [71]TABET, Slimane; BENDERRADJI, Med EL. Le changement climatique en Algérie orientale et ses conséquences sur la végétation forestière. 2008.

- [72]TETBIRT, Zahra;CHEMANI,Amel .Les méthodes de l'estimation de l'évapotranspiration dans la région du Haut et Moyen Cheliff. 2017. Mémoire de master. Université Djilali .
- [73]TOUTAIN, Georges. Eléments d'agronomie saharienne. De la recherche au développement. Imp. JOUVE, Paris, 276p. Annexe a Annexe a Annexe b, 1979.
- [74]TRAORE, Farid. Méthodes d'estimation de l'évapotranspiration réelle à l'échelle du bassin versant du Kou au Burkina Faso. 2007. PhDThesis. Université de Liège, Arlon, Belgique.
- [75]TURC L. (1961) Évaluation des besoins en eau d'irrigation, évapotranspiration potentielle, formule climatique simplifiée et mise à jour. AnnalesAgronomiques, vol. 12, p. 13-49.
- [76]VALIANTZAS J.D (2012-a) - Simple ET forms of Penman's equation without wind and/or humidity data. I: Theoretical development. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, vol. 139, n° 1, p. 1-8.
- [77]VALIANTZAS J.D (2012-b) Simple ET forms of Penman's equation without wind and/or humidity data. II: comparisons with reduced set-FAO and other methodologies. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, vol. 139, n° 1, p. 9-19.
- [78]VALIANTZAS J.D (2012-c) Simplified reference evapotranspiration formula using an empirical impact factor for Penman's aerodynamic term. *Journal of Hydrologic Engineering*, vol. 18, p. 108-114.DOI :[10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0000590](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000590)
- [79]VALIPOUR M. (2015) Calibration of mass transfer-based methods to predict reference crop evapotranspiration. *Applied Water Science*, vol. 1, n° 1, p. 1-11.
- [80]Xu, C.-Y., & Singh, V. P. (1998) Dependence of evaporation on meteorological variables at different time-scales and intercomparison of estimation methods. *Hydrological Processes*, 12(3), 429–442. doi:10.1002/(sici)1099-1085(19980315)12:3<429::aid-hyp581>3.0.co;2-a url to share this paper:[sci-hub.tw/10.1002/\(SICI\)10991085\(19980315\)12:3<429::AID-HYP581>3.0.CO;2-A](https://doi.org/10.1002/(SICI)10991085(19980315)12:3<429::AID-HYP581>3.0.CO;2-A)
- [81]Xu, C.-Y., & Singh, V. P. (2000).Evaluation and generalization of radiation-based methods for calculating evaporation. *Hydrological Processes*, 14(2), 339–349. doi: [10.1002/\(SICI\)1099-1085\(20000215\)14:2<339::AID-HYP928>3.0.CO;2-O](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1085(20000215)14:2<339::AID-HYP928>3.0.CO;2-O)

[82] **Xu, C.-Y., & Singh, V. P. (2001).** Evaluation and generalization of temperature-based methods for calculating evaporation. *Hydrological Processes*, 15(2), 305–319. doi:10.1002/hyp.119 .

# *Annexes*

## Annexe 1

**Données climatologiques enregistrées au niveau de la station météorologique de  
Ouargla sur la période (2008 – 2017 O.N.M, 2018)**

**1. Température moyenne minimale en °C**

Années	Mois											
	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
2008	5.49	6.15	10.88	15.71	21.06	23.93	29.04	27.96	24.60	18.68	9.79	5.42
2009	6.78	7.22	10.11	12.08	18.48	25.35	28.73	27.17	22.05	15.70	9.42	7.73
2010	6.56	9.63	12.87	17.05	18.67	25.34	28.39	28.15	22.79	16.18	9.74	6.61
2011	4.83	5.56	9.70	14.84	18.63	23.15	27.73	26.27	25.10	15.05	10.19	5.19
2012	3.55	3.38	8.82	14.46	19.65	27.39	28.62	26.96	21.69	18.16	11.87	3.69
2013	4.92	5.31	11.91	15.43	19.15	23.42	27.84	26.15	23.23	19.49	10.05	6.26
2014	6.24	8.23	10.12	15.11	20.20	23.80	28.47	27.93	25.80	16.97	12.10	5.90
2015	4.00	6.85	10.11	16.27	20.70	24.74	26.48	29.08	23.89	17.60	10.90	4.85
2016	6.46	8.06	9.67	16.74	21.30	24.95	27.37	26.95	24.26	19.38	10.49	8.13
2017	3.36	8.54	11.54	15.15	22.91	25.48	27.28	27.14	21.93	16.08	9.37	5.40

**2. Température moyenne maximale en °C**

Années	Mois											
	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
2008	18.25	21.30	26.27	31.93	35.98	39.07	44.89	43.30	38.54	30.09	22.13	18.60
2009	17.78	20.32	24.74	27.52	34.38	40.94	44.59	42.96	36.07	30.78	25.48	22.94
2010	21.56	25.36	28.06	31.26	33.60	41.31	43.85	43.60	36.88	30.71	24.90	21.33
2011	20.50	20.52	23.88	30.74	33.71	38.30	43.99	42.29	40.33	29.08	24.27	19.66
2012	18.00	17.31	24.46	30.37	35.49	43.18	44.84	43.15	38.21	33.43	26.27	19.95
2013	20.24	21.23	28.58	30.91	35.50	39.83	43.55	40.69	38.31	35.82	23.42	17.32
2014	19.40	22.83	23.79	31.40	35.25	39.71	44.56	44.15	40.62	32.93	25.74	19.01
2015	18.34	18.83	24.65	32.11	37.04	39.81	42.03	42.81	37.92	31.81	24.28	19.98
2016	21.22	22.70	25.65	32.76	36.03	41.02	42.57	41.26	37.98	34.22	24.52	19.52
2017	17.49	23.09	26.09	29.93	37.45	40.36	43.06	42.92	36.58	29.41	22.88	18.17

**3.Humidité de l'air relative minimale en %**

Années	Mois											
	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
2008	43.61	30.69	25.74	18.97	18.68	21.20	15.87	19.03	25.10	39.10	39.17	38.16
2009	47.97	31.89	27.19	24.73	24.23	17.03	15.48	16.26	28.00	28.32	36.17	29.87
2010	31.48	29.93	22.71	26.17	21.13	18.90	17.77	19.77	28.93	26.35	34.13	29.03
2011	39.61	32.79	29.81	23.93	24.35	23.13	18.35	20.16	21.00	36.90	36.27	47.03
2012	43.55	38.38	32.52	24.03	19.39	16.80	14.68	15.06	17.57	22.13	33.03	34.97
2013	35.45	29.79	28.58	20.87	11.32	11.20	10.35	12.87	16.37	15.58	26.07	47.26
2014	33.55	21.32	21.65	12.60	13.68	11.37	10.29	9.90	12.73	15.84	23.50	33.32
2015	25.74	26.11	16.87	12.10	11.16	10.47	10.23	13.06	16.97	21.71	29.97	33.55
2016	25.10	20.34	14.35	13.80	11.03	11.07	10.42	12.42	17.43	18.97	25.13	41.26
2017	27.29	21.61	18.48	17.20	12.06	12.07	10.52	9.94	18.47	25.26	29.10	32.97

**4.Humidité de l'air relative maximale en %**

Années	Mois											
	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
2008	86.48	78.52	63.87	48.77	48.42	48.50	38.42	44.87	54.83	79.35	85.13	84.55
2009	90.71	79.50	73.94	66.70	59.87	44.93	39.06	42.58	68.73	67.13	79.07	72.13
2010	75.06	65.68	57.32	59.63	53.23	45.47	42.32	45.68	63.10	68.13	74.17	66.71
2011	80.32	71.68	76.32	62.00	55.39	51.10	44.84	44.10	48.93	78.29	79.87	89.84
2012	86.19	79.48	73.97	58.77	47.35	42.80	37.06	41.00	48.03	55.16	74.33	80.19
2013	79.87	70.43	69.61	58.47	39.42	34.87	30.10	35.77	47.03	44.00	65.57	92.13
2014	81.10	62.89	58.03	42.43	43.32	39.63	26.77	32.52	38.80	48.19	67.80	79.03
2015	71.52	62.79	59.16	41.27	33.06	33.10	32.35	39.00	50.17	55.52	72.30	81.10
2016	63.39	56.86	44.97	48.67	35.26	31.97	29.71	32.45	49.03	56.26	67.23	87.16
2017	72.10	58.14	56.84	49.50	36.58	34.93	27.42	31.87	55.77	67.90	75.73	79.61

**5.Vitesse des vents maximale en m/s**

Années	Mois											
	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
2008	7.13	7.00	8.97	9.97	10.81	10.13	9.23	8.03	9.80	8.77	7.73	7.32
2009	9.06	8.32	8.45	8.47	8.53	9.00	8.29	3.87	8.67	6.58	5.73	6.87
2010	8.42	9.25	10.13	9.83	10.39	11.20	9.16	8.84	8.93	8.06	8.50	7.35
2011	7.00	8.57	9.52	10.67	9.55	9.30	8.74	8.87	9.33	7.84	8.30	6.68
2012	8.84	9.59	8.55	10.83	10.16	8.93	8.94	9.03	8.67	8.13	7.73	6.84
2013	8.06	8.79	9.81	11.07	10.58	9.30	9.06	9.35	9.17	7.03	7.57	7.32
2014	7.42	8.93	11.03	8.67	10.74	10.23	9.23	8.87	9.93	8.26	7.80	7.55
2015	8.39	9.89	8.65	9.30	9.10	9.00	6.90	9.71	8.27	7.90	6.77	4.71
2016	6.61	7.72	8.26	10.27	12.26	10.53	8.90	9.03	8.70	8.32	3.83	6.58
2017	8.74	10.04	9.90	11.67	11.81	11.73	9.90	10.52	10.27	8.03	8.53	9.35

**6. Précipitations totale en mm**

Années	Mois											
	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
2008	5.70	0.00	1.20	0.00	0.00	0.40	0.00	0.00	14.20	24.10	0.20	0.60
2009	54.10	1.50	10.60	0.80	0.00	2.50	0.00	0.00	6.30	0.10	0.00	0.00
2010	4.40	0.00	0.00	0.70	1.70	3.00	2.20	0.00	7.70	3.90	0.00	0.00
2011	0.00	0.00	11.10	1.70	0.00	0.00	0.00	0.00	0.10	5.00	0.00	0.00
2012	16.20	5.50	1.00	3.50	0.00	0.00	1.30	0.30	4.60	0.00	0.00	0.00
2013	3.60	0.00	0.20	6.30	0.00	0.00	0.00	2.40	0.00	0.00	4.60	24.50
2014	0.00	0.00	0.40	0.00	14.10	2.00	0.00	0.00	0.00	2.00	6.80	5.80
2015	0.80	24.50	4.70	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.30	0.00	0.00	0.00
2016	0.00	0.00	2.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	4.60	4.30	0.70	4.50
2017	0.30	0.00	20.70	0.80	0.00	0.20	0.00	0.00	12.80	22.60	14.60	2.60

**7. Evaporation totale en mm**

Années	Mois											
	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
2008	75.50	136.60	210.40	291.80	323.40	286.40	428.10	322.70	312.60	174.80	113.80	78.10
2009	80.90	115.30	151.80	172.60	152.70	333.00	417.30	384.40	222.00	166.50	110.20	111.10
2010	109.00	131.40	186.60	211.00	279.40	410.40	425.90	388.30	221.30	176.60	117.10	109.40
2011	81.00	80.00	159.60	215.20	262.50	347.70	438.50	386.40	245.20	125.90	105.80	62.40
2012	61.60	80.80	132.40	209.10	312.30	353.60	382.30	367.60	332.90	278.30	146.80	90.60
2013	100.90	112.90	166.90	191.80	227.80	317.30	414.40	319.10	287.10	276.70	147.50	55.90
2014	87.00	138.40	157.80	223.30	329.10	337.90	488.90	397.10	287.60	213.20	88.80	85.90
2015	93.00	91.00	158.90	256.50	334.10	365.40	346.70	366.60	233.80	158.50	98.20	75.20
2016	135.80	187.00	259.40	288.60	388.30	479.60	486.10	473.10	301.90	278.90	157.70	85.30
2017	110.70	172.60	239.20	283.90	464.90	433.30	505.10	439.30	270.40	187.20	129.20	80.30

**8. Durée d'Insolation en Heure**

Années	Mois											
	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
2008	254.30	248.90	263.20	300.60	243.60	292.00	306.90	308.10	243.10	209.90	261.00	192.00
2009	196.10	253.80	267.40	321.10	338.10	270.50	336.50	343.60	256.80	312.90	275.10	254.90
2010	248.80	197.80	219.30	262.80	311.40	218.60	313.10	352.10	273.70	259.20	257.40	247.60
2011	261.20	257.10	265.50	306.20	332.80	244.50	319.70	357.70	270.10	265.10	259.10	229.80
2012	249.00	273.00	252.80	293.40	328.10	231.50	320.80	349.20	285.50	258.90	236.20	239.70
2013	246.60	267.50	277.30	268.20	330.70	226.10	315.90	340.80	279.40	268.50	245.90	205.00
2014	246.70	244.40	252.50	309.50	316.90	225.30	298.50	320.80	259.50	288.30	224.20	249.80
2015	259.00	218.90	299.40	272.10	347.50	239.00	339.00	310.80	226.20	259.00	270.80	253.90
2016	259.80	249.00	302.00	285.60	259.80	190.70	322.10	352.10	282.00	251.00	228.80	211.00
2017	263.20	204.20	285.10	272.10	283.90	205.30	325.30	366.10	266.00	296.40	240.10	226.00

## Annexe 2

## Analyse granulométrique

Tableau III. 1 les résultats d'analyse granulométrique du sable

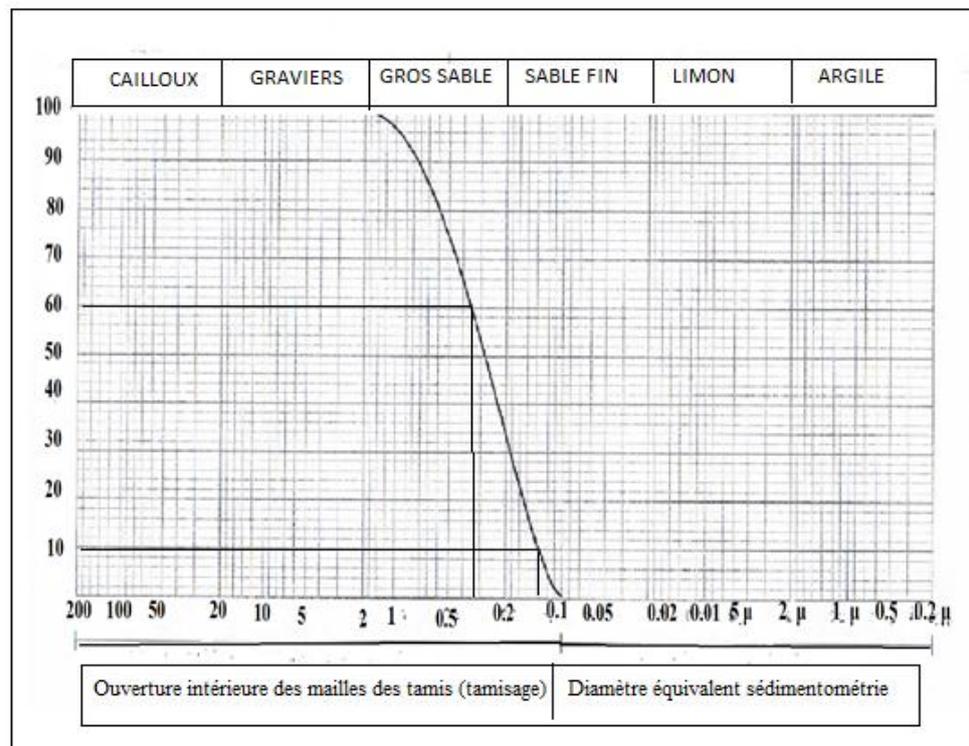
Poids d'échantillon (g)	Diamètre des Tamis (mm)	Refus partiels (g)	Refus Cumulé (g)	Refus cumulé (%)	Tamisât cumulé (%)
500	5	M1=0	0	0	100
	2	M2=0	0	0	100
	1	M3=1.64	1.64	0.328	99.67
	0.4	M4=58.61	60.55	12.11	87.89
	0.2	M5=338.15	398.7	79.74	20.26
	0.1	M6=92.73	491.43	98.28	1.71
	0.08	M7=6.04	497.47	99.49	0.5
	Le vase	M8=2.53	500	100	0

Tableau III. 2 les résultats d'analyse granulométrique de gravier

Poids de l'échantillon (g)	Diamètre des Tamis (mm)	Poids refus partiels (g)	Poids refus cumulés (g)	Poids refus cumulés (%)	Tamisât cumulé
4000	16	M1=174.69	174.69	4.37	95.63
	12.5	M2=969.23	1143.92	28.6	71.4
	10	M3=996.28	2140.2	53.51	46.49
	8	M4=981.54	3121.74	78.07	21.93
	6.3	M5=721.81	3843.55	96.09	3.91
	5	M6=93.90	3937.45	98.44	1.56
	4	M7=23.21	3960.66	99.02	0.98
	3.15	M8=6.51	3967.17	99.18	0.82
	2.5	M9=1.53	3968.7	99.22	0.78
	2	M10=0.55	3969.25	99.23	0.77
	1.6	M11=0.40	3969.65	99.24	0.76
	Le vase	M12=30.35	4000	100	0

## Annexe 3

## Courbe granulométrique de sable



**Annexe 4****Étalonnage de l'appareil de humidimètre**

Echantillon	Mesures de E par appareil	Les mesures d'échantillon avant 24h	Les mesures échantillon après 24h	Différence entre	Teneur en eau %	Erreur
A1	19.5	49.8	44.8	5	11.16	0.43
A2	20.9	41.6	36.2	5.4	14.92	0.29
A3	20.8	61.2	53.3	7.9	14.82	0.29
A4	25.9	53.9	45.9	8	17.43	0.33
A5	25.2	50.7	44.5	6.2	13.93	0.45
A6	19.8	74.4	64.3	10.1	15.71	0.21
A7	22.5	63.5	55.2	8.3	15.04	0.33
A8	25.7	45.5	39.5	6	15.19	0.41
A9	21.7	47.4	40.9	6.5	15.89	0.27
A10	23.7	50.5	43	7.5	17.44	0.26

## Annexe 5

Détermination du coefficient ( $\beta$ ) ( Boutoutaou D. 1999)

station météo	$\beta$	station météo.	$\beta$	station météo	$\beta$	station météo	$\beta$
Beni-saf	0,86	M'sila	1,16	Tlemcen Z	1,08	Bechar	0,99
Annaba	1,24	Biskra	1,15	Tlemcen S	0,91	El Goléa	0,95
Skikda	0,97	Ain Safra	1,07	Blida	0,74	Guelma	0,73
Oran	1,11	El Oued	0,83	Constantine	0,82	Ain amenas	1,2
Dar El Beida	0,74	Touggourt	1,02	Setif	1,38	Timimoun	0,95
Bejaia	0,99	El Kheider	1,27	Batna	1,2	Djanet	0,8
Mostaganem	0,92	Djelfa	0,84	Tebessa	1,15	Adrar	1,17
Meliana	0,74	Ghardaia	0,96	Saida	1,49	Tindouf	1,07
Echellif	1	Beni abbas	0,86	Mascara	1	Tamenrasset	0,89
Tlemcen Z.	1,08	Bechar	0,99	Medea	0,74	Tizi-ouzou	0,74
Tlemcen S.	0,91	El Goléa	0,95	Bel Abbes	1,49	Tiaret	1,1
Blida	0,74	Guelma	0,73	BordjBorriridj	1		

Remarque : Pour les stations météorologiques ne figurant pas dans le tableau, ( $\beta$ )  $\approx$  1

## Evapotranspiration en Algérie ( Boutoutaou D. 1999)

Zone climatique	Eléments météorologiques			$\beta$	ETP mm
	Pluie P, mm	Température T, °C	Humidité H, %		
Humide	1069	18,25	75,0	1	1305
	1000	18.3	66	0.74	1315
	910	16.8	75,5	0.92	1171
Subhumide	707	18.7	74.0	0.97	1334
	645	14.8	66	0.74	1177
	608	16.75	66.50	0.73	1219
	503	17,65	66.9	0.82	1391
Semi-aride	491	16.70	55	0.82	1836
	400	15.75	57	1.00	2076
	350	16.86	56,5	1.00	2175
	300	15.83	54	1.15	2560
Aride	260	19.03	47.33	1.18	3320
	210	19.60	47	1.16	3340

## Annexe 6

## Formule de turc

Valeurs moyennes mensuelles de  $I_{gA}$  en petites calories par  $cm^2$  et par jour

Latitude sud	0° 60°	10°	20°	30°	40°	50°	
Janvier	858	893	986	1.009	1.010	990	961
Février	888	888	937	923	887	820	738
Mars	890	872	845	783	697	590	466
Avril	862	820	726	629	507	376	235
Mai	816	754	616	495	364	226	96
Juin	790	724	571	439	303	167	49.5
Juillet	804	748	597	473	338	205	98.5
Août	833	804	691	586	960	330	189
Septembre	875	871	808	734	639	527	397
Octobre	880	896	904	880	836	753	657
Novembre	860	900	970	987	977	949	905
Décembre	842	891	992	1.031	1.045	1.040	1.025

## Formule de turc

## Durée mensuelle du jour &lt;&lt;H&gt;&gt; en heures par mois

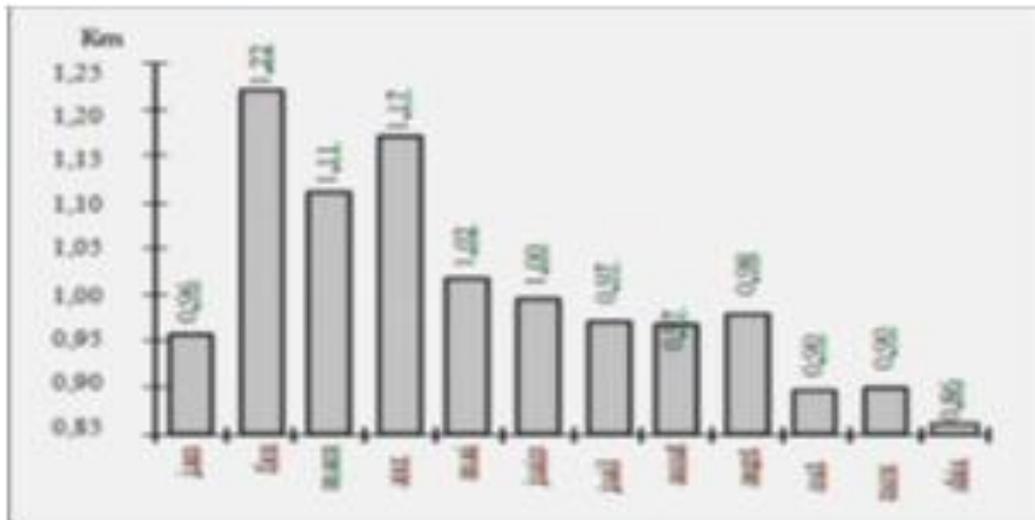
( c'est à-dire nombre d'heures ou le soleil est au-dessus de l'horizon chaque mois )

Latitude sud	0°	10°	20°	30°	40°	50°	60°
Janvier	12,10	12,63	13,21	13,83	14,65	15,82	17,87
Février	12,10	12,39	12,73	13,13	13,11	14,31	15,38
Mars	12,10	12,16	12,22	12,26	12,31	12,46	12,61
Avril	12,10	11,90	11,63	11,33	11,03	10,62	9,91
Mai	12,10	11,68	11,18	10,62	9,95	9,00	7,66
Juin	12,10	11,51	10,91	10,25	9,38	8,13	6,06
Juillet	12,10	11,60	11,06	10,40	9,63	8,50	6,63
Août	12,10	11,80	11,47	11,07	10,56	9,92	8,88
Septembre	12,10	12,06	11,99	11,91	11,83	11,74	11,55
Octobre	12,10	12,30	12,33	12,83	13,14	13,57	14,33
Novembre	12,10	12,37	13,07	13,63	14,32	13,57	17,01
Décembre	12,10	12,70	13,30	14,06	14,91	16,28	18,70



## Annexe 8

Evolution du coefficient mensuel : Abaque pour la détermination de l'ETp d'après la formule ANRH Tableau (IV.9, IV.10)



## Annexe 9

Coefficient régional :

STATION	Kr	Nom	Kr	Nom	Kr
Ain Sefra	1,21	DellysA	0,87	Mostaga	0,87
Annaba	0,91	Djelfa	1,10	Msila	1,12
Arzew	0,97	El	1,15	Naam	1,11
Barika	1,24	ElBaya	1,23	Ouargla	0,99
Batna	1,12	ElMili	0,79	OumElBo	0,92
BBAreridj	1,07	Ghazao	8,81	Saida	1,01
Bechar	1,32	Guelm	0,83	S	1,04
Bejaia	0,92	JijelAe	0,79	SidiBelA	0,94
BeniSaf	0,88	Jijelpo	0,79	Skikd	0,86
Biskra	1,26	KsarChel	1,09	SoukAh	0,99
Bou Saada	1,10	Maghn	0,93	Tebess	1,00
Bouira	1,04	Masca	0,95	Tenes	0,95
Chlef	0,93	Mecher	1,14	Tiaret	1,08
Constantine	0,91	Mede	1,05	TiziOuz	0,83
DarElBeida	0,89	Milian	0,97	Tlemcen	0,93

### Résumé :

La recherche d'une méthode d'irrigation en économisant de l'eau et en évitant la remontée de la nappe à Ouargla est devenue une préoccupation majeure. Ces dernières années, les chercheurs ont trouvé que « le goutte à goutte donnait un bon rendement ». Dans ce travail pour diminuer les pertes d'eau, on améliore cette technique en utilisant une nouvelle technique le « nano-irrigation ». La connaissance de l'évapotranspiration est l'outil le plus important pour la détermination des besoins d'arrosage. Son rôle conditionne les disponibilités en eau, et les besoins dont l'exploitant est intimement lié. Dans ce contexte l'objectif de ce travail est la détermination de l'évapotranspiration dans le cas de nano-irrigation. On la détermine expérimentalement à l'aide de deux méthodes (pesée et humidimètre) et par calcul en utilisant 6 formules. L'évapotranspiration par la méthode des pesées est (4,85, 7.07 et 5.38) et à l'aide de l'humidimètre est (3.64, 10.95 et 6.04), l'erreur entre les deux méthodes est de 4%. Ces résultats expérimentaux sont très proches de ceux calculés à l'aide des formules les plus utilisées dans les régions arides. L'erreur pour les différentes méthodes est 51,27% pour Boutoutaou, 27,53% pour Turc, 5,15% pour Blaney et Criddle, 45,75% pour Ivanov, 11,97% Penman et 11,97% ANRH.

Mots clés : Evapotranspiration, besoins d'eau, nano-irrigation, pesée, humidimètre, Ouargla.

### ملخص:

أصبح البحث عن طريقة للري مع توفير المياه وتجن ارتفاع منسوب المياه الجوفية في ورقلة مصدر قلق كبير. مؤخرًا، وجد الباحثون أن "التقطير يعود بمردود جيد". لقد تم تحسين هذه التقنية باستخدام تقنية جديدة تسمى "الري بالنانو" بغية تحجيم إهدار الماء. يعد الإلمام بتقنية التبخر و النتح أهم وسيلة في تحديد احتياجات الري. يحدد دورها مدى توفر المياه والاحتياجات التي يرتبط بها المشغل ارتباطاً وثيقاً. في هذا السياق، الهدف من هذا العمل هو تحديد التبخر في حالة الري بالنانو. يتم تحديده تجريبياً باستخدام طريقتين (مقياس الوزن والرطوبة) وبالحساب باستخدام 6 معادلات. كان التبخر بطريقة الوزن (4.85، 7.07، 5.38) وبإستخدام مقياس الرطوبة (3.64، 10.95، 6.04) نسبة الخطأ بين الطريقتين هو 4%. هذه النتائج التجريبية قريبة جداً من تلك المحسوبة باستخدام الصيغ الأكثر شيوعاً في المناطق الجافة. الخطأ بالنسبة للطرق المختلفة هو 51.27% Boutoutaou، 27.53% Turc، 5.15% Blaney et Criddle، 45.75% Ivanov، 11.97% Penman، 11.97% ANRH.

الكلمات المفتاحية: التبخر، النتح، المتطلبات المائية، الري بالنانو، الوزن، مقياس الرطوبة، ورقلة.

### Abstract :

The search for an irrigation method that saves water and prevents the rise of the water table in Ouargla has become a major concern. In recent years, researchers have found that "the drip gives a good return". In this work to reduce water loss, this technique is improved by using a new technique called "nano-irrigation". Evapotranspiration knowledge is the most important tool in determining irrigation needs. Its role determines the availability of water and the needs with which the operator is closely linked. In this context, the objective of this work is the determination of evapotranspiration in the case of nano-irrigation. It is determined experimentally using two methods (weighing and moisture meter) and by calculation using 6 formulas. The evapotranspiration by the weighing method is (4.85, 7.07 and 5.38) and using the moisture meter is (3.64, 10.95 and 6.04) the error between the two methods is 4%. These experimental results are very close to those calculated using the formulas most used in arid regions. The error for the different methods is 51.27% for Boutoutaou, 27.53% for Turc, 5.15% for Blaney et Criddle, 45.75% for Ivanov, 11.97% Penman and 11.97% ANRH.

Keywords: Evapotranspiration, water requirements, nano-irrigation, weighing, moisture meter, Ouargla.