## UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA

Faculté des Sciences Appliquées Département de Génie civil et Hydraulique





## THESE

En vue de l'obtention du diplôme de Doctorat Sciences en Construction hydraulique et Aménagement

# Étude de l'évaporation de la nappe phréatique de la région de Ouargla

Présenté et soutenue publiquement

Par : EL FERGOUGUI Myriam Marie

// /

Devant le jury composé de :

KRIKER Abdelouahad BOUTOUTAOU Djamel BENKHALED Abdelkader OUNOUKI Samira Professeur Professeur Professeur MCA U.K.M. Ouargla U.K.M. Ouargla M.K. Biskra M.K. Biskra Président Directeur de thèse Examinateur Examinatrice

Année universitaire 2016 / 2017

## ملخص :

إن أغلبية الأراضي المستغلة في المناطق الجافة وشبه الجافة تتوضع على طبقة المياه الجوفية ذات الملوحة العالية حيث أن عمقها عن سطح الأرض يتراوح ما بين 0 و 1,5 م. هذه المستويات القريبة من الأرض وبوجود عوامل مناخية قاسية تساعد على التبخر وتساهم بقدر كبير في زيادة ملوحة التربة وتدهور ها.

تبين النتائج المحصل عليها من تجارب قياس تبخر طبقة المياه الجوفية في منطقة ورقلة أن التبخر يتناقص كلما نبتعد عن مستوى طبقة المياه الجوفية وتثبت أن التبخر يكون في حده الأقصى ويساوي التبخر عندما يكون هذا المستوى قريبا جدا من سطح الأرض () -0,6 م ويكون في حده الأدنى عندما يكون الارتفاع أكبر من 1,7 م.

إن توزيع الأملاح المتجمعة في طبقات التربة يتبع نفس منحنى توزيع التبخر في هذه الطبقات وكميات الأملاح المتواضعة متصلة اتصالا وثيقا بكميات المياه المتبخرة في طبقة المياه الجوفية.

من اجل استغلال أفضل للأراضي الزراعية ومنتوجات أوفر من الضروري معرفة تموقع مستوى الطبقة الجوفية (صرف المياه الزراعية) وعلاقته بالعوامل الهيدرولوجية ونسبة ملوحة هذه الطبقة المائية.

مفاتيح الكلمات : تبخر طبقة المياه الجوفية ، ملوحة التربة، عمق التربة .

#### Résumé

La majorité des surfaces mises en valeurs en zones arides et semi-arides de l'Algérie reposent sur des nappes phréatiques excessivement minéralisées dont le niveau est proche de la surface du sol (0-1,5 m). En présence des conditions climatiques très sévères, le processus de l'évaporation de ces nappes contribue en grande partie à la salinisation des terres et la dégradation du milieu.

Les résultats de l'étude de l'évaporation de la nappe phréatique de la région de Ouargla montre que l'évaporation diminue au fur et à mesure que le niveau de la nappe s'éloigne de la surface du sol. L'évaporation de la nappe est maximale et égale à l'évaporation du plan d'eau lorsque le niveau de cette nappe est situé dans la couche 0 - 0,6 m et devient minimale au dessous de 1,7 m.

Pour une meilleure mise en valeur des terres et une production agricole élevée, il est nécessaire de connaître la profondeur critique de la nappe phréatique, profondeur pour laquelle l'évaporation est faible et par conséquence un dépôt de sels faible dans les sols à texture sableuse de la région aride Ouargla.

*Mots clés* : évaporation, nappe phréatique, profondeur, zone aride, pouvoir évaporant de l'atmosphère.

#### Abstract

The majority of developed lands in arid and semi-arid areas of Algeria are based on highly mineralized water table, which level is (0-1.5 m) close to the soil surface. Such levels of closeness to the soil surface, combined with the existence of highly severe climatic conditions, have stimulated the process of evaporation of water table, thing which largely contributes to salinization of soil and degradation of the environment.

The analysis of research works made for determination of the phenomenon of evaporation of water table in the region of Ouargla had shown that evaporation decreases as water table is far from the soil surface. Studies Results are showing that water table evaporation reaches its maximum rate once table water is above 0.6 m near soil surface and its minimum rate when this latter is below 1.7 m.

The subject of our research consists in determining the relationship between the water table evaporation and its depth depending on the soil texture.

Keywords: evaporation, water table, depth, arid areas, powers evaporate of atmosphere.

## Dédicaces

A ma tendre mère.

A mon défunt père.

A ma fille Hind.

A mes frères et sœurs.

Au défunt ami GHAMRI Ali.

Elfergougui M M

fur mar

## REMERCIEMENT

Je remercie avec gratitudes le professeur DADA MOUSSA Belkier, le professeur KRIKER Abdelouahad directeur du laboratoire EVRNZA et doyen de la faculté des sciences appliquées, l'ex directeur de l'ONA HANTOUT Noureddine chef du projet de réalisation du réseau d'assainissement des eaux résiduaires, pluviales et d'irrigation dans la Vallée de Ouargla 2005 et l'ensemble de ses cadres pour la réussite de la réalisation du modèle expérimental en particulier sur le plan financement et la méthode appliquée pour renforcer les lysimétres contre les fuites.

Je remercie aussi en particulier mon promoteur le professeur BOUTAOUTAOU Djamel qui ma soutenu jusqu'à la fin de cette thèse grâce a ses compétences dans le domaine de la recherche scientifique et son savoir faire.

Je remercie la Responsable du centre de recherche IRISA à Rennes CHAUX Jocelyne et l'équipe de recherche SAGE en particulier CARNOT Edouard responsable de l'équipe pour l'aide précieuse apporté à l'intérêt de la réussite de ma recherche.

Je remercie les membres des équipes de recherche de mon laboratoire EVRNZA pour l'aide précieuse apporté à l'intérêt de la réussite de ma recherche.

Je remercie les membres du jury BENKHALED Abdelkader, OUNOUKI Samira pour l'ensemble des critiques et les remarques qui sont apportées afin de renforcer la valorisation de cette thèse

Je remercie les membres de l'équipe de l'ONM de Ouagla et l'ANRH et tous ceux qui ont contribués de loin ou de prés à la réalisation de ma recherche, sans oublier bien surs les membres du bureau d'études Oued Righ de Touggourt et les membres du l'ex bureau d'études Oued Righ de Ouargla. Je tiens à témoigner de ma profonde reconnaissance au Dr MEZA Noureddine qui ma fait bénéficier de ses expériences et ses connaissances dans le domaine de la recherche scientifique.

Je tiens à adresser mes chaleureux remerciements au Dr SAGGAI Sofien pour son aide et son soutien moral surtout pour la publication.

Elfergougui M M

fingsuper

## SOMMAIRE

	Page
Résume	
Introduction	1
Chapitre I	5
Etude bibliographique	
Théorie et pratique sur l'évaporation et la minéralisation et des eaux de la nappe phréatique et leurs impacts sur le développement de l'agriculture	6
I-1 Evaporation des eaux des eaux de la nappe phréatique	6
I-2 Minéralisation des eaux de la nappe phréatique	16
I-3 Impact de la remontée de la phréatique sur le développement agricole	21
I-4 Remède et Solution	24
I-5 Conclusion	25

## Chapitre II Cadre naturel de la zone d'étude

II -1 Situation géographique	27
II-2 Population et activités	28
II-3 Potentialités de développement	29
II-4 Aspect climatique	30
II-4-1 Température de l'air	30
II-4-2 Pluviométrie	31
II-4-3 Humidité de l'air	31
II-4-4 Evaporation	32
II-4-5 Vitesse du vent	33
II-5 Aspect Géomorphologiques	34
II-6 Aspect Hydrologiques	34
II- 7Aspect Hydrogéologiques	37
II-8 Aspect Pédologiques	43
II-9Aspect anthropiques	44
II-10 Végétations	44
II-11 Conclusion	46

## Chapitre III Matériels et méthodes

49

61

III-1 Matériels	50
III-1-1 Site expérimental	50
III-1-2 Lysimétre	50
III-1-3 Mesure des éléments météorologiques	53
III- 1-3-1 Température de l'air	53
III 1-3-2 Evaporation potentielle	53
III-2 Méthodes	56
III-2 -1 Méthodes d'utilisation des lysimétres	56
III-2-2 Méthodes de la mesure de L'évaporation potentielle	57
III-2-3 Méthode de la résolution du modèle physique	58

## Chapitre IV Résultats et discussions

IV-1 Températures de l'air	62
IV-2 Vitesses du vent	63
IV-3 Humidité de l'air	64
IV-4 Précipitations	65
IV-5 Évaporation potentielles <i>Eo</i>	66
V-6 Évaporation de la nappe phréatique	69
IV-7 Modélisation de l'évaporation de la nappe phréatique	71
IV-8 Validation du modèle de calcul de l'évaporation de la nappe phréatique	76
IV-9 Abaque de calcul de l'évaporation de la nappe phréatique	76
IV-10 Comparaison des résultats	80
IV-11 Conclusion	81
VI-7 Conclusion générale	82
Références bibliographiques	85
Annexe	95

	LISTE DES TABLEAUX	Page
Tableau I	Profondeurs des eaux de la nappe phréatique recommandées en fonction de leur minéralisation (Borovski, V.M 1981)	18
Tableau II	Daïras, Communes, superficie	31
Tableau III	Analyse d'échantillons de sol prélèves sur le sondage effectué dans le laboratoire des travaux public sud [LTPS].	54
Tableau IV	Températures mesurées durant la période expérimentale (2010, 2011, 2012)	62
Tableau VI	Vitesse du vent enregistrée durant la période expérimentale (2010, 2011, 2012) office national météorologique de Ouargla (ONM)	63
Tableau VII	Vitesses du vent mensuelle enregistrée durant la période expérimentale (2010, 2011, 2012) office national météorologique de Ouargla (ONM)	63
Tableau VIII	Humidité relative de l'air enregistrée durant la période expérimentale (2010, 2011, 2012) office national météorologique de Ouargla (ONM)	64
Tableau IX	Précipitations mensuelle enregistrée durant la période expérimentale (2010, 2011, 2012) office national météorologique de Ouargla (ONM)	65
Tableau X	Comparaison entre l'évaporation potentielle et la température	66
Tableau XI	Comparaison entre l'évaporation potentielle mesurée et calculée	67
Tableau XII	Comparaison entre l'évaporation de la nappe phréatique dans les lysimétres en période froide et chaude durant la période d'observation	68
Tableau XIII	Résultat de l'évaporation de la nappe phréatique dans le Lysimétre A, année 2011/2012	73
Tableau XIV	Résultat de l'évaporation de la nappe phréatique dans le lysimétre B, année 2010	74
Tableau XV	Comparaison entre les valeurs de l'évaporation de la nappe phréatique, mesurées et calculées par l'abaque	77
Tableau XVI	Comparaison entre les valeurs de l'évaporation de la nappe phréatique calculées par l'abaque et le modèle physique.	78

Figure I	Distinction entre zone non saturée et saturée				
Figure 2	Comparaison entre l'évaporation de la nappe phréatique mesurée et théorique pour une texture sableuse et argileuse				
Figure 3	Evaporation (Gowing et al 2006)				
Figure 4	Intensité de l'évaporation de la nappe phréatique en fonction de sa profondeur dans la région d'Ouzbékistan				
Figure 5	Intensité de l'évaporation de la nappe phréatique en fonction de s profondeur(Khatchatourian)				
Figure 6	Profondeur de la nappe phréatique en fonction de l'anion cl	19			
Figure 7	Salinisation du sol durant la période d'observation	20			
Figure 8	Carte de risque salinisation de la cuvette de Ouargla	21			
Figure 9	Salinisation secondaire des sols	22			
Figure 10	Surface du sol du chott d'Ain El Beida	23			
Figure 11	Périssement d'une palmerai dans la cuvette de Ouargla				
Figure 12	Coordonnées géographique de la cuvette de Ouargla Dubief 1956				
Figure 13	Limites géographiques de la cuvette de Ouargla (Encarta, 2004)				
Figure 14	Température moyenne mensuelle de Ouargla. Période 2000 à 2009 ONM				
Figure 15	Précipitations moyenne mensuelle de Ouargla. Période 2000 à 2009 (ONM)				
Figure 16	Humidité relative de l'air Ouargla 2000-2009 ONM				
Figure 17	Évaporation mensuelle Ouargla. Période 2000 à 2009 ONM				
Figure 18	Vitesse du vent mensuelle de Ouargla . Période 2000 à 2009 (ONM)	36			
Figure 19	Exutoire des trois oued (Nsa,M'zab,Mya) Dubief J, 1954	38			
Figure 20	gure 20 Superposition de la carte géologique de G. Busson au MNT				

## LISTE DES FIGURES

## LISTE DES FIGURES

Figure 21	Substratum de la nappe phréatique. ANRH .2006 à 2D	40
Figure 22	Substratum de la nappe phréatique. ANRH .2006 à 3D	41
Figure 23	Substratum avec les différentes singularités. ANRH 2006	42
Figure 24	Piézométrique de la nappe phréatique en novembre 2003	44
Figure 25	Cite expérimental. Google 2012	51
Figure 26	Lysimétre pour mesurer l'évaporation de la nappe phréatique	52
Figure 27	Lysimétre pour mesurer l'évaporation de la nappe phréatique	52
Figure 28	Implantation des lysimétres	53
Figure 29	Dimension du lysimétre	53
Figure 30	Thermomètre digital 305 CLE.	54
Figure 31	Bac class A pour mesurer l'évaporation du plan d'eau à la surface	55
Figure 32	Jauge à croche	57
Figure 33	Jauge à crochet sur le puits de mesure	57
Figure 34	Niveau d'eau dans le bac	56
Figure 35	Vitesses du vent mensuelle enregistrée durant la période expérimentale (2010, 2011, 2012) (ONM)	64
Figure 36	Diagramme Ombrothermique de la région d'Ouargla durant trois ans (2010 à 2012)	65
Figure 37	Comparaison entre l'évaporation potentielle mesurée et calculée	67
Figure 38	Relation entre l'évaporation de la nappe, sa profondeur et l'évaporation potentielle	69
Figure 39	Nuage de points de l'évaporation mesurée année 2010-2011-2012	70
Figure 40	Khatchatourian V.K.H 1982	71

## LISTE DES FIGURES

## Page

Figure 41	Courbe ajusté à l'évaporation mesurée année 2010-2011-2012	
Figure 42	Evaporation de la nappe phréatique en fonction de sa profondeur (h) et l'évaporation potentielle	75
Figure 43	Abaque pour déterminer l'évaporation mensuelle de la nappe phréatique en fonction de sa profondeur (h)	75
Figure 44	Comparaison entre l'évaporation de la nappe phréatique mesurée et déterminée par l'abaque	76

## LISTE DES ANNEXES

Intensité de l'évaporation de la nappe phréatique en fonction de sa profondeur dans la vallée de Vakcha	Annexes 1
Données Climatologiques d'Ouargla Période (2000 – 2004)	Annexes 2
Données Climatologiques d'Ouargla Période (2005 – 2009)	Annexes 3
Salinisation du sol : El fergougui MM (2004)	Annexes 4
Méthode effectuée pour l'analyse de la régression non linéaire du modèle : décrite en détail dans une feuille de calcul Excel	Annexes 5
Préparation du terrain	Annexes 6
Début du chantier du déblaiement	Annexes 7
Sol humide, présence d'une la nappe phréatique	Annexes 8
Pompe d'aspiration utilisée pour drainer les eaux de la nappe de la tranchée	Annexes 8
Fondation des lysimétres	Annexes 9
Lysimétre en PVC ondule	Annexes 9
Pose d'un lysimétre	Annexes 10
Mise en place des deux lysimétre	Annexes 11
Vue de l'intérieure du lysimétre	Annexes 12
Lysimétre avec un piézomètre	Annexes 12

## LISTE DES SYMBOLES

*Q*: Débit par unité de surface  $m^{-3} s^{-1}$ 

K(s): Conductivité hydraulique qui dépend de la succion (m. s<sup>-1</sup>),

S: Succion correspondant à un potentiel.

Z: Dimension verticale correspondant au potentiel de gravité (m).

*h* : Profondeur de la nappe phréatique en (m).).

 $D^*$ : Coefficient de diffusion- convexion en (m<sup>2</sup> s<sup>-1</sup>).

Pe : Paramètre de Péclet.

C<sub>s</sub>: Concentrations des sels du sol en (g/l).

Cn : Concentrations des sels de la nappe phréatique en (g/l)

h<sub>c</sub> - Remontée capillaire en (m).

 $h_{cr}$ - : Profondeur critique en (m).

W: Teneur en eau (%).

d : Densité en (masse / volume).  $E_n$  : Évaporation de la nappe phréatique dans le lysimétre pendant l'intervalle de temps t<sub>i</sub> et t<sub>i+1</sub>, (mm).

 $H_{t_{i+1}}$ : Profondeur final de la nappe phréatique correspondant à la date d'observation  $t_{i+1}$ , (mm)

 $H_{t_i}$ : Profondeur initial de la nappe phréatique correspondant à la date d'observation  $t_i$ , (mm)

P: Pluie reçue par le lysimétre durant la période d'observation entre t<sub>i</sub> et t<sub>i+1</sub>, (mm)

*H* : Humidité de l'air, % ;

t : Température de l'air °C

E<sub>0</sub>: Evaporation potentielle en (mm)

En : Evaporation de la nappe phréatique en (mm).

#### ملخص

إن أغلبية الأراضي المستغلة في المناطق الجافة وشبه الجافة نتوضع على طبقة المياه الجوفية ذات الملوحة العالية حيث أن عمقها عن سطح الأرض يتراوح ما بين 0 و 1,5 م. هذه المستويات القريبة من الأرض وبوجود عوامل مناخية قاسية تساعد على التبخر وتساهم بقدر كبير في زيادة ملوحة التربة وتدهورها. تبين النتائج المحصل عليها من تجارب قياس تبخر طبقة المياه الجوفية في منطقة ورقلة أن التبخر يتناقص كلما نبتعد عن مستوى طبقة المياه الجوفية وتثبت أن التبخر يكون في حده الأقصى عندما يكون هذا المستوى قريبا جدا من سطح الأرض م, 0, 0 - 0 ويكون في حده الأدنى عندما يكون الارتفاع أكبر من 1,7 م.

إن توزيع الأملاح المتجمعة في طبقات التربة يتبع نفس منحنى توزيع التبخر في هذه الطبقات وكميات الأملاح المتوضعة المتراكمة متصلة اتصالا وثيقا بكميات المياه المتبخرة في طبقة المياه الجوفية.

من اجل استغلال أفضل للأراضي الزراعية ومتوجات أوفر فمن الضروري معرفة تموقع مستوى الطبقة الجوفية (صرف المياه الزراعية).

مفاتيح الكلمك: تبخر، المياه الجوفية، عمق، المناطق الجافة،: تبخر المياه السطحية

### Résumé

La majorité des surfaces mises en valeurs en zones arides et semi-arides de l'Algérie reposent sur des nappes phréatiques excessivement minéralisées dont le niveau est proche de la surface du sol (0 - 1,5 m). En présence des conditions climatiques très sévères, le processus de l'évaporation de ces nappes contribue en grande partie à la salinisation des terres et la dégradation du milieu.

Les résultats de l'étude de l'évaporation de la nappe phréatique de la région de Ouargla montre que l'évaporation diminue au fur et à mesure que le niveau de la nappe s'éloigne de la surface du sol. L'évaporation de la nappe est maximale et égale à l'évaporation du plan d'eau lorsque le niveau de cette nappe est situé dans la couche 0 - 0,6 m et devient minimale au dessous de 1,7 m.

Pour une meilleure mise en valeur des terres et une production agricole élevée, il est nécessaire de connaître la profondeur critique de la nappe phréatique, profondeur pour laquelle l'évaporation est faible et par conséquence un dépôt de sels faible dans les sols à texture sableuse de la région aride Ouargla.

*Mots clés* : évaporation, nappe phréatique, profondeur, zone aride, pouvoir évaporant de l'atmosphère.

### Abstract

The majority of developed lands in arid and semi-arid areas of Algeria are based on highly mineralized groundwater, which level is close to the soil surface (0 - 1.5 m). Such levels of closeness with the soil surface, combined with the existence of highly severe climatic conditions, have stimulated the process of the groundwater evaporation, which largely contributes to the salinization of soil and degradation of the environment.

The result of research works made to determine the phenomenon of groundwater evaporation in the region of Ouargla had shown that evaporation decreases as water table is far from the soil surface. Studies Results are showing that water table evaporation reaches its maximum rate once groundwater is above 0.6 m near soil surface and its minimum rate when this latter is below 1.7 m.

The subject of our research consists in determining the relationship between the groundwater evaporation and its depth depending on the soil texture.

Keywords: evaporation, groundwater, depth, arid areas, powers evaporate of atmosphere.

### Introduction générale

L'évaporation à partir d'un sol nu est influencée d'une part par les facteurs météorologiques qui déterminent la demande évaporative et d'autre part, par l'aptitude du sol à transmettre l'eau vers la surface. Le régime effectif d'évaporation est fixé par le plus petit de ces deux paramètres. Lorsqu'une nappe phréatique se trouve à faible profondeur, il peut s'établir un mouvement permanent d'eau depuis la nappe vers la surface du sol. Ces apports peuvent s'avérer très utiles pour l'alimentation en eau des horizons superficiels, mais également très dommageables lorsque les eaux souterraines présentent un taux de salinisation élevé. Cette dernière situation se manifeste en certains endroits du Nord Sud Algérien, Ouargla, Touggourt, Oued Souf, Biskra où la nappe est peu profonde et relativement minéralisée, les sols sont très conducteurs et la demande évaporative est forte.

Un des remèdes envisageables pour limiter les apports de sel vers la surface est l'abaissement de la nappe. Pour être à même d'apprécier la profondeur à donner à la nappe de façon à limiter les flux ascendants à une valeur admissible, il faut disposer de moyens permettant d'établir les relations entre les propriétés du sol, la profondeur de la nappe et la demande évaporative.

C'est l'objet de la présente étude qui est orientée essentiellement vers la simulation des processus de transferts d'eau entre une nappe peu profonde et la surface du sol, en régime permanent et, notamment, vers l'estimation du flux maximal que le sol peut transmettre vers la zone d'évaporation.

La réalisation du degré de salinité optimal pour les cultures dans les conditions du climat aride et ou la nappe phréatique est proche de la surface du sol reste jusqu'à l'heure actuelle un problème. Dans les régions arides, les eaux soumises à une forte évaporation ont tendance à se concentrer et les sols à se saler. Une salinisation trop importante, accompagnée parfois d'une alcalinisation du complexe absorbant des sols, nuit à la mise en valeur agricole des zones cultivables.

L'augmentation de la salinité des sols agricoles qui résulte de la présence d'une nappe souterraine minéralisée peu profonde a limité la production végétale et a causé la stérilisation des sols de plusieurs terres nouvellement mises en valeur. D'après les estimations faites dans les palmerais et les terres mises en valeur dans la région du Nord Sud Algérien de Ouargla, Touggourt, Oued Souf; Biskra par le service des statistiques de la direction des services agricoles de Ouargla, un net abaissement dans la production de la datte a été enregistré.

1

En 2000 la production de la datte par palmier était 41kg/palmier, en 2010 a chutée 35kg/ palmier, alors que la norme agricole de production est180kg/palmier. La même source stipule a l'heure actuelle les périmètres mises en valeurs connaissent une chute des rendements de la récolte d'une année à une autre. La compagne 90/91 - 2009/2011 a enregistré une chute remarquable de production. Le rendement moyen du blé est passé de 40 qx / ha à 20 qx / ha. Ses gains de productions diminuent encore plus vite si on ne contrôle pas les menaces de salinisations de ses terres, par aménagement rationnelles des terres et des ressources d'eaux, reposant sur une connaissance approfondie du sol et de la nappe phréatique. D'ou accroitre le rendement de la production agricole dans les années avenir dans ces zones arides et où la nappe est proche du sol, est une nécessité absolue.

Au cours de la dernière décennie dans la région aride de Ouargla, le niveau de la nappe phréatique semble avoir régulièrement augmenté .Ce phénomène de remontée des eaux serait du aux activités anthropiques qui sont étroitement liées à l'histoire des palmeraies et à l'exploitation des ressources en eau artésienne (D.H.W.direction hydraulique de la wilaya 2008).

Durant les dernières années, il a été constaté une chute significative de rendement de la production agricole dû au dépôt de sel dans les terres nouvellement mises en valeurs (D.S.A. Direction des Services Agricoles 2007).

Les résultats de l'étude d'aménagement hydro- agricole (Tesco-visiterev.1986) réalisées dans les palmeraies de Ouargla, ont montré que la principale cause de cumul des sels est liée à la faible profondeur de la nappe très minéralisée.

La salinisation des sols est un phénomène assez fréquent dans la région de Ouargla qui est caractérisée par une faible pluviométrie (40 - 50 mm par année), une nappe phréatique peu profonde (0 - 1,5 m) et très salée avec un résidu sec de 10 à 60 g/l jusqu'à 200 - 300 g/l dans les chotts et sebkhas, une texture sableuse et une forte évapotranspiration (2500 – 3000 mm par année)

Pour mieux prévoir et gérer le risque de la salinité des terres irriguées dans les zones arides et semi- arides, il est primordial d'étudier le phénomène de l'évaporation des nappes phréatiques qui joue un rôle important dans le processus de salinisation des sols (Pachkovski I.C 1988).

L'évaluation de l'évaporation des nappes phréatiques permet de :

1- Quantifier la quantité d'eau évaporée pour différents niveaux de la nappe.

2- Quantifier la quantité de sel déposée dans la couche radiculaire des sols (Mezza N. Saouli S 2002).

3- Etablir les bilans hydrique et salin des nappes phréatiques (Ndiaye B et al 2008).

L'objectif de l'étude consiste à trouver une relation reliant l'évaporation de la nappe phréatique en fonction de sa profondeur et du pouvoir évaporant de l'atmosphère de la zone aride de Ouargla qui est caractérisée par un sol sableux.

Le régime de la nappe phréatique se forme sous l'influence de trois facteurs, La quantité d'eau à fournir par l'irrigation, le fonctionnement des drains et l'évapotranspiration.

Les sols ont de faibles capacités de rétention pour l'eau et pour les nutriments. Il s'agit alors d'une part d'éviter l'accumulation de sels en fortes quantités dans le sol, et d'autre part, de limiter les gaspillages d'eau. A titre d'exemple, un ha de blé consomme 6000 m<sup>3</sup>, si l'eau d'irrigation contient 2 g l<sup>-1</sup> de sels, la culture peut alors laisser dans le sol en fin de cycle 12 tonnes de sels. (ANRH)

L'évaporation atteint dans la région d'Ouargla environ 2500 mm an<sup>-1</sup> (El Fergougui 2002). La nappe phréatique participe pour une grande part à cette évaporation. La hauteur d'eau de la nappe phréatique évaporée permet de prévoir les quantités de sels déposés dans le sol.

Le taux d'évaporation est très déterminant dans le bilan hydrologique. Cette évaporation s'effectue dans la zone non saturée du sol, siège d'une circulation ascendante et descendante de l'eau. L'étude de ce phénomène est d'une grande importance pour la connaissance des mécanismes de salinisation de l'eau et des sols, en particulier pour les régions arides et semiarides (Gouvea, 1980 et Gowing, 2006). Sa mesure est très difficile par les méthodes physiques (tensiométrique, neutronique, bilan hydrique). Le cumul des erreurs issues de l'estimation d'un grand nombre de paramètres physiques peut affecter sensiblement le résultat final, notamment quand il s'agit d'un taux d'évaporation faible (Aranyossy, 1978).

En outre, les méthodes classiques nécessitent souvent des mesures assez longues qui ne sont pas souvent disponibles dans les zones d'études (Daoud, 1995).

La salinité des sols et celle des eaux de la nappe phréatique de Ouargla, comme d'ailleurs dans la majorité des régions du bassin oriental du Bas-Sahara, ont fait l'objet d'un bon nombre de travaux antérieurs (Lelievre, 1969, ENEGEO, 1990, Guendouz et al, 1992, El fergougui 2002, Nezli, 2007, pour expliquer l'origine, les causes de se phénomène).

La méthode adaptée pour lutter contre la salinité des sols en zones arides en présence d'une nappe phréatique minéralisée est la réalisation d'un système de drainage adapté pour permettre, un rabattement de la nappe phréatique en dessous d'une côte telle que les remontées capillaires soient très limitées (Lacharme M 2001).

De ce fait, la problématique posée est de trouver la profondeur qui maintient le niveau de la nappe phréatique à la profondeur qui ne doit pas être moins de la profondeur critique. Cette

dernière est nécessaire pour empêcher l'accumulation des sels dans le sol végétal à cause du processus actif d'évaporation provenant de la faible profondeur de la nappe phréatique.

On note que l'étude ne tient pas compte du facteur eau d'irrigation qui est aussi une source d'approvisionnement des sols par les sels.

On peut déterminer l'évaporation de la nappe phréatique par deux méthodes: Méthodes de mesure directe et méthode de calcul. La première méthode est très exacte (précise), mais elle exige un matériel couteux et une période prolongé d'observation. La deuxième méthode est relativement simple et rapide. Par exemple pour calculer l'évaporation des eaux de la nappe phréatique par la méthode d'Averianov 1988, il suffit d'avoir les données climatiques et quelques caractéristiques chimiques du sol et celle des eaux de la nappe phréatique.

Notre travail entre dans le cadre du projet de recherche de l'équipe Eau et Sols du laboratoire (exploitation et valorisation des ressources naturelles dans la région arides) de l'université de Kasdi Merbah.

Mots clés: Profondeur Critique, Nappe Phréatique, Salinité, Evaporation, pouvoir évaporant.

# **CHAPITRE I**

# **ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE**

## CHAPITRE I

## THEORIE ET PRATIQUE SUR L'EVAPORATION ET LA MINERALISATION DES EAUX DE LA NAPPE PHREATIQUE ET LEURS IMPACTS SUR LE DEVELOPPEMENT DE L'AGRICULTURE

Des études ont été réalisés par de nombreux chercheurs afin d'expliquer le phénomène de l'évaporation ainsi que la relation entre l'évaporation à la surface et l'évaporation de la nappe phréatique et la minéralisation du sol. Les méthodes les plus répandues sont les méthodes analytiques, empiriques et corrélations.

#### I-I Evaporation des eaux des eaux de la nappe phréatique

Gardner (1958) fut le premier a estimé l'évaporation des aquifères établie sur la base de l'équation de flux d'eau dans la zone non saturée en adoptant l'hypothèse du régime permanent sur la loi Darcy. En tenant compte de l'évolution de la conductivité hydraulique en fonction de la teneur en eau, ces études ont abouti à une équation de l'évaporation à partir de l'aquifère correspondant à une fonction exponentielle inverse de la profondeur du niveau de l'eau sous la surface du sol.

La loi de Darcy en zone non saturée est la suivante:

$$Q = -K(s)\Delta(-S + Z) \tag{1}$$

*Q*: Débit par unité de surface  $L/T^{-1}$ 

K(s): Conductivité hydraulique qui dépend de la succion (L. T<sup>-1</sup>),

S: Succion correspondant à un potentiel.

Z: Dimension verticale correspondant au potentiel de gravité (L).

Gardner a établi la relation empirique entre la conductivité hydraulique K et la pression hc, de la forme suivante :

$$K(s) = am/(hc+b)$$
(2)

a, b, m : Constantes à déterminer pour chaque sol.

Dans ces conditions, Gardner a proposé des solutions analytiques simples de l'équation de Darcy pour les cas particuliers où m vaut 1, 1,5, 2, 3 et 4. En outre il a démontré que, moyennant quelques hypothèses simplificatrices (b négligeable), le flux maximal (*Emax*) que le sol peut transmettre de la nappe vers la surface est donné par l'équation 3:

$$Emax = C \ a \ D^{-m} \tag{3}$$

*D*: Profondeur de la nappe.

a et m : Constantes de l'équation 2.

C: Constante dépendant du paramètre m.

Par la suite de nombreuses études ont montré que m peut prendre des valeurs positives quelconques et dépasser notablement 4 dans les sols grossiers. André Mermoud A et all (1989).

Gardner WR et Fireman M, (1958) ont déterminés, au laboratoire, les pertes par évaporation des nappes phréatiques. Ils ont trouvés que les valeurs expérimentales correspondent aux valeurs déterminées théoriquement à partir de l'équation de l'écoulement régulier de l'eau non saturée. Ils ont déterminé l'évaporation d'une nappe d'eau d'après le potentiel d'évaporation résultant des conditions externes, ou d'après la vitesse maximale de la remonté de l'eau dans le sol, selon que l'un ou l'autre facteur est limitatif.

Gardner et Fireman (1958) ont déduit qu'il existe des rapports non linéaires entre l'évaporation et la profondeur de la nappe dans des sols très différents. Les relations quantitatives entre la vitesse d'évaporation et les propriétés hydrauliques du sol et la profondeur de la nappe phréatique sont exprimées sous forme de fonctions de régression.

Hillel (1974), a montré qu'ils existent trois conditions nécessaires pour assurer le maintien du processus d'évaporation :

- une source continue de chaleur pour satisfaire la chaleur latente d'évaporation.

- un gradient de pression de vapeur orienté vers l'atmosphère au-dessus du corps évaporant assisté d'un processus d'évacuation de la vapeur par diffusion et/ou convection ;

- un apport continu d'eau.

Cette évaporation s'effectue dans la zone non saturée du sol, siège d'une circulation ascendante et descendante de l'eau. (Figure 1).

7



*Figure 1. Distinction entre zone non saturée* et saturée (*Hillel* (1974))

Selon certains chercheurs (Riou (1975), Brutsaert (1982) et par Pouyaud (1986)), l'évaporation débute par la vibration et la circulation des molécules d'eaux, ce mouvement est lié à la température, plus elle est élevée, plus le mouvement est amplifié et plus l'énergie associée est suffisante pour permettre à certaines molécules de s'échapper et d'entrée dans l'atmosphère.

Hamdane A, Mami A (1976) et Ben Hassine T et al (1981) ont montré que pour les sols à texture argileuse, les profondeurs des plans d'eau minéralisés qui agissent sur la salinité des sols par évaporation peuvent être de 2 à 3 m, en absence d'irrigation, sous climat chaud.

Selon Hénin S (1977) la remonté de l'eau de la nappe dépend de deux phénomènes :

-L'eau de la nappe remonte dans le sol à travers la porosité capillaire pour atteindre des horizons proches de la surface. Les distances parcourues par cette eau ascendante varient suivant les textures ; elles peuvent atteindre 100 cm pour les limons avec une ascension lente, 35 cm dans les sables avec une ascension rapide.

- L'eau de la nappe remonte dans le sol par l'effet de diffusion thermo capillaire (température du sol) définis par la loi de Jurin J (1717).

Aranyossy, 1978 a monté que le cumul des erreurs issues de l'estimation d'un grand nombre de paramètres physiques peut affecter sensiblement le résultat final, notamment quand il s'agit d'un taux d'évaporation faible.

Allison et Barnes en (1985,1988), ont utilisés une méthode d'estimation de l'évaporation des nappes aquifères en zones arides. Elle est basée sur l'interprétation des profils de la zone non saturée en isotopes ( $\delta^{18}$  O et  $\delta^{2}$ H) et en CL. Ces estimations sont basées sur l'utilisation de l'équation de transport, contenant un terme de diffusion et un terme de convection, ils ont rassemblé une trentaine de couples de données, avec l'évaporation estimée et la profondeur du niveau saturé.

Ils ont montrés que la zone non saturée se divise en deux parties. La partie profonde le flux d'eau ascendant s'effectue sous forme liquide par contre la partie superficielle de l'eau est diffusée sous forme de vapeur, la limite des deux parties est appelé siège de l'évaporation et cette dernière ne semble dépendre que de la profondeur de la nappe. Or d'après l'étude caractéristique hydraulique des sols de Thorbun et al (1992), leurs travaux admettaient que l'évaporation de la nappe dépend que de la nature du sol.

Gouvéa SR (1980) a travaillé sur des colonnes de sédiments. Il constata que plus superficielle était la nappe (profondeur < 20cm), plus important étaient l'effet des paramètres climatiques et que le flux d'évaporation était le facteur qui détermine la distribution spatial des profils de teneurs en eaux et en sel tout au long des colonnes de sédiments.

Fontes et al (1986) ont montrés que dans les zones arides la recharge de la nappe phréatique à travers les sols nus non cultivés est pratiquement nulle, et que la nappe y est plutôt soumise à une décharge par évaporation.

Salhodra A M (1987) a montré que l'évaporation d'une masse d'eau saline est inférieure à celle d'un corps d'eau douce. L'expérience a été réalisée sur des bacs d'évaporations contenant de l'eau de la mer morte et des eaux de la méditerranée.

Mermoud A, Hubert J, Seytoux S (1988) ont montré que la description des transferts d'eau entre une nappe phréatique et la surface du sol, en régime permanent, peut se faire favorablement au moyen des équations antérieures de Gardner WR et Fireman M, (1958).

9

Lorsque la nappe est proche de la surface et le sol très conducteur, le régime de transfert est limité par la demande évaporative externe. Par contre, lorsque la nappe est plus profonde, c'est l'aptitude du sol à transmettre l'eau qui devient le facteur limitant.

Les propriétés conductrices du sol sont caractérisées par la relation  $(K_h)$  dont il importe de connaître précisément la valeur car c'est un facteur primordial de description des transferts. Des sols très proches au point de vue granulométrique peuvent présenter des courbes(Kh) relativement différentes. Cette étude a porté plus particulièrement sur une relation du type Brooks et Corey. Les résultats ont été comparés avec ceux obtenus sur la base d'une relation de type Gardner, sans que des différences prononcées aient été enregistrées.

Dans le cas des sites étudiés, les propriétés conductrices des sols concernés et les faibles profondeurs de nappe observées sont à l'origine de remontées capillaires importantes. En général, l'élément limitant n'est pas la capacité du sol à fournir l'eau, mais bien la demande évaporative en surface qui règle la valeur du flux ascendant en provenance de la nappe. C'est dire que, pour peu que la nappe soit minéralisée et le lessivage naturel insuffisant, les risques de salinisation sont élevés. Une diminution drastique des remontées capillaires par abaissement de la nappe conduit à des profondeurs importantes, de l'ordre de plusieurs mètres, sans doute difficilement justifiables au point de vue économique.

Robinson M et al (1991) ont menées des recherches afin de déterminer les effets de l'occupation du sol sur un terrain humide du sud de l'Allemagne. Le drainage agricole a abaissé la nappe phréatique et réduit son l'évaporation de 110%.

Daoud D (1995) a monté que plus la nappe est profonde plus la zone de transfert d'humidité en phase vapeur devient important et le front d'évaporation plus profond, ce qui favorise le ralentissement de l'évaporation de la nappe.

Les méthodes classiques nécessitent souvent des mesures assez longues qui ne sont pas souvent disponibles dans les zones d'études

Coudrain A, Ribsteini A *et* al (1997) ont établies une relation empirique entre le flux d'évaporation de la nappe phréatique (Q) et la profondeur du niveau saturé (Z en m) sous le niveau du sol pour les régions arides : pour des profondeurs de nappe comprises entre 0,6 et 18 m.

$$Q = 71,9 Z^{-1,49} \tag{4}$$

Coudrain A, Fourcade B, Jaoudat T (2003) ont permet de justifier ou non la relation empirique (4) figure 2. Cette courbe empirique du flux évaporatoire obtenue par la méthode isotopique selon l'analyse bibliographique (Coudrain et al, 1997) portant sur différentes régions arides correspondant à des sols de caractéristiques distinctes, suggère que la nature du sol intervient peu dans le processus d'évaporation depuis les nappes phréatiques en régions arides chaudes.



Figure 2. Comparaison entre l'évaporation de la nappe phréatique mesurée et théorique pour une texture sableuse et argileuse (Coudrain A. Fourcade B. Jaoudat T (2003))

D'après la (figure 2), l'étude qui tient compte de la perméabilité montre que la nappe à texture sableuse situé à de 2.5 m de profondeur, l'évaporation serait de 200 mm an<sup>-1</sup> et la nappe à texture argileuse situé à la même profondeur l'évaporation serait de 140 mm an<sup>-1</sup>.

Pour une nappe à 10 m de profondeur, le flux évaporant serait de 1,8 mm an<sup>-1</sup> pour un sable et 1,5 mm an<sup>-1</sup> pour une argile.

D'où la relation empirique n'est pas contredite est peut être appliqué pour fournir des estimations régionales des sorties d'eaux par évaporation de la nappe phréatique.

Gowing JW *et* al. (2006) ont montés que l'étude du phénomène de l'évaporation est d'une grande portée pour la connaissance des mécanismes de salinisation de l'eau et des sols, en particulier pour les régions arides et semi-arides et sa mesure est très difficile par les méthodes physiques (tensiométrique, neutronique, bilan hydrique).

Ces memes auteurs considèrent que les stades d'équilibre de l'évaporation entre la nappe phréatique et la surface du sol peuvent être distingués en trois étapes, dans l'étape (a) il n'y a pas de front d'évaporation dans le franche de sol, d'où l'évaporation de la nappe est égale à l'évaporation a la surface, on peut penser que est la profondeur du front d'évaporation égalé à  $Z_w$ . Dans l'étape (b), le front d'évaporation diminue dans le temps jusqu'à devenir constant l'étape (c). (Figure 3).

-	Sol	E (T, ∆e, f(u)) 介	(a)
Zw	Nappe	介 q <sub>1</sub> (K, z <sub>w</sub> ) 介	$E = q_1$
Zw	evap. front		<b>(b)</b> $q_v > q_1$ and $q_v$ decreases with time as $z_e$ increases; $q_1$ increases with time as $z_w - z_e$ increases
	Sol♥ evap.front Nappe	q <sub>v</sub> (D <sub>v</sub> , ∆e, z <sub>e</sub> ) Ⅱ ♀ <sub>I</sub> (K, z <sub>w</sub> - z <sub>e</sub> ) 介	(c) $q_v = q_1$ and $z_e$ is constant

Figure 3. Evaporation (Gowing et al 2006)

Plusieurs travaux des chercheurs russes Khachatourian V. KH, Pestov L.F (1982) Kovda(1984) ont relevés les faits suivants: L'évaporation et la minéralisation des eaux de la nappe phréatique diminuent au fur que la profondeur augmente (Figure 4 et 5) et la minéralisation des eaux de la nappe et à mesure augmente au fur et à mesure que l'intensité de leur évaporation augmente.



Figure 4. Intensité de l'évaporation de la nappe phréatique en fonction de sa profondeur dans la région d'Ouzbékistan (Khachatourian V. KH, Pestov L.F (1982) Kovda(1984))



Figure 5. Intensité de l'évaporation de la nappe phréatique en fonction de sa profondeur(Khatchatourian)

L'influence de la profondeur des eaux de la nappe phréatique sur l'intensité de l'évaporation est accentuée par le type de climat, plus le climat est aride plus le processus est important. L'évaporation des eaux de la nappe phréatique et l'accroissement de leurs minéralisations jusqu'à 20 g/l - 30 g/l dans les régions arides de la vallée de Vakcma et Steppe De la Faim

commence à une profondeur de 4 m, tandis que dans les régions se trouvant plus au Nord à l'exemple de la dépression Pré-Caspienne commence à une profondeur de 2 m à 2,5 m.

L'analyse des résultats des travaux sur l'évaporation de la nappe phréatique pour les régions de l'Iraq figure 6 (Pestov, Khatchatourian, KH 1982) montre que: Pour une profondeur de la nappe de 2 à 2,3 m l'évaporation est de  $3\% \div 7\%$  de l'évapotranspiration.

Pour une profondeur de la nappe de 1,4 m à 1,8 m l'évaporation est de 14%  $\div$  35% de l'évapotranspiration.

Pour une profondeur de la nappe de 1,2 m à 1,0 m l'évaporation est de  $43\% \div 56\%$  de l'évapotranspiration.

De même que l'analyse des courbes de la fraction d'eau évaporée de la nappe phréatique en fraction de sa profondeur pour différentes cultures. (Toutes phases végétatives confondues) dans la région de Vakcha montre que pour une profondeur de la nappe de 4 m dans le cas du coton et pour une profondeur de la nappe de 2,4 m dans le cas de la betterave à sucre l'évaporation de la nappe est presque nul. Annexe 1.

Certains auteurs ont évalués la profondeur critique d'évaporation (profondeur de la nappe ou l'évaporation est presque nulle) des eaux de la nappe phréatique et donnent des relations empiriques. Averianov SF 1978, Choumakov BB, Beznina SA (1989) Katz DM (1981). Pour les régions arides de L'Ouzbékistan.

$$Q(h) = q_0 e^{\frac{-h^n}{\alpha}} \tag{6}$$

Q(h): Évaporation des eaux de la nappe phréatique en mm/j.

 $q_o$ : Valeur maximale de l'évapotranspiration en mm/j.

*n* et  $\alpha$  empiriques dont les valeurs sont comprises dans les intervalles  $(1 \langle n \langle 3 \rangle)$  et  $(0 \langle \alpha \langle 30 \rangle)$  respectivement pour les régions du sol de Ouzbékistan.

h : profondeur de la nappe phréatique

Averianov SF (1965) a exprimé Q(h) de la manier suivante:

$$Q(h) = q_o \left(1 - \frac{h}{hc}\right)^n \tag{7}$$

Avec *n* appartient à l'intervalle  $1\langle n \langle 3 \text{ et } h_c \text{ profondeur critique de la nappe phréatique et$ *h*profondeur de la nappe phréatique .

En 1981 Katz .D.M à réalisé dans les différents oasis centrales, des expériences à l'aide des lysimetres. Les résultats expérimentaux ont abouti à la relation suivante :

$$Q(h) = K/hn \tag{8}$$

Q(h) : Évaporation des eaux de la nappe phréatique en mm
h : Profondeur de la nappe phréatique en (mm).
K et n coefficients empiriques.

Averianov SF a utilisé aussi la méthode des bilans. On connaissant les caractéristiques du sol tel que les concentrations moyennes de la solution du sol sur 1m d'épaisseur, la porosité, le coefficient de diffusion et les caractéristiques de la nappe (profondeur, minéralisation) il détermine les valeurs de nombre de Péclet par itération en fonction de la relation 9 et déduit ainsi l'évaporation de la nappe phréatique.

$$C_m = \frac{1}{2P_e \bar{l}} (e^{2P_e} - e^{2P_e (1-\bar{l})}) \qquad (9)$$

 $C_m = C_s / C_n$   $\bar{l} = l / \Delta$   $Pe = \varepsilon \Delta / 2MD_s^*$ 

- $C_n$ : Minéralisation des eaux de la nappe phréatique en (g/l).
- $\varepsilon$ : Évaporation de la nappe phréatique en (m).
- m : Porosité du sol.
- $D^*$ : Coefficient de diffusion- convexion en (m<sup>2</sup>/j).
- Cm : Salinité de la couche de sol considérée.
- l: Couche de sol considérée en (m).
- $\Delta$ : Profondeur de la nappe phréatique en (m).
- Pe : Paramètre de Péclet.

Les résultats de l'étude de Karimov A et al (2014) suggèrent que les eaux souterraines peu profondes contribuent peu à l'évapotranspiration pour la culture du blé en hiver, les zones dépendent fortement des régimes d'irrigation et les pratiques de gestion des terres et de l'eau.

En cas de déficit d'irrigation élevé dans les sols limoneux, les flux ascendants de nappes phréatiques peu profondes dépassent 60% de l'évapotranspiration totale de la récolte. La fraction d'évaporation de la nappe de l'évapotranspiration des cultures est minime et la transpiration fraction maximale en présence d'irrigation. Cependant, dans des conditions d'eau peu profonde, les avantages de l'irrigation diminuent l'évaporation de la nappe phréatique. Les pertes par évaporation excessive dans les eaux souterraines peu profondes deviennent une source de l'accumulation de la salinité dans la zone plante-racine.

#### I-2 Minéralisation des eaux de la nappe phréatique

Des différents travaux cites par Borovski (1981) (tableau I) avaient pour conséquence de définir une certaine profondeur de la nappe phréatique pour laquelle l'évaporation fourni un faible dépôt de sels solubles dans le sol. C'est la profondeur minimale possible du niveau des eaux de la nappe phréatique pour laquelle après évaporation, la concentration maximale des sels solubles dans le sol est inferieure ou égale à la concentration admissible pour les cultures existantes dans des conditions naturelles concrètes.

Borovski, V.M (1981) relèves une relation directe entre la minéralisation et la profondeur minimale des eaux de la nappe phréatique ou elle doit se maintenir afin d'éviter un énorme dépôt de sel soluble dans la couche racinaire tableau 1. Selon les chercheurs cites par Borovski, V.M, cette profondeur varie en fonction de la minéralisation de l'eau.

Pour les sols à limon moyen et une nappe phréatique à minéralisation supérieur à 5 g/l, la profondeur moyenne recommandée varie entre 2.5 et 3 m.

De même pour la majorité des sols salés et une nappe phréatique à minéralisation supérieur à 5 g/l, la profondeur minimale recommandée est de 3 m.

Par contre pour une nappe phréatique à minéralisation inférieur à 5 g/l, la profondeur minimale recommandée doit être supérieur à 1 m.

On conclut que plus la nappe phréatique est minéralisée plus la profondeur du drainage est important. Cette dernière varie entre 1 et 4 m selon la nature du sol.

Minéralisation des eaux	Profondeur la	auteurs
de la nappe phréatique en	nappe phréatique	
g/l	en m	
Environ 1	0,8 - 1,0	P.A. Kenzoum,
1,0 - 2,0	1,0 - 1,5	1957 pour des
2,0 - 3,0	1,5 - 2,5	sols limons
3,0 - 5,0	2,5 - 3,0	moyens de la
> 5	>3	vallée de
		Vakmchska
1,5 - 3,0	1,5 - 2,2	
3,0 - 5,0	2,2 - 3,0	F.M. Rahimbayef
5,0 - 7,0	3,0 - 3,5	,1967
Jusqu'à 2	2,0	V.A.Kovda, 1960
4,0	2,5	Résidu sec de la
6,0	3,0	solution du sol
10,0	3,3	
,	,	
1,0 - 3,0	1,6	D.M. Katz, 1963
3,0 - 5,0	2,1 - 2,3	Région de
5,0 - 8,0	2,3 - 2,5	Boukhara pour
8.0 - 10.0	2,5 - 2,9	les sols à limon
, ,	, ,	moyen.
		2
		P.A. Kenzoum et
1,5	1,0	Grabovskaya
1,5 - 3,0	1,0 - 2,0	pour la majorité
3,0 - 4,0	2,0 - 3,0	des sols salés du
7,0	3,0 - 4,0	Tadjikinstan

Tableau I. Profondeurs des eaux de la nappe phréatique
recommandées en fonction de leur minéralisation
(Borovski, V.M 1981)

Selon Chamayou H et Legros JP (1989) les sels solubles sont transportés dans l'eau et s'accumulent dans l'endroit où l'eau est évaporée car l'eau en s'évaporant dépose ses sels dans le sol.

Parmi les phénomènes qui régissent le déplacement ascendant de l'eau, ces auteurs citent la diffusion sous l'effet d'un gradient de température avec deux composantes : la thermo capillarité et la thermo osmose.

Ils ont trouvé que dans le cas des sols argileux, la thermo capillarité est active surtout pendant la nuit et son flux est estimé à 0,1 mm heure<sup>-1</sup>pour un gradient de 5 °C m<sup>-1</sup>. Et pour La thermo osmose, le flux qu'elle engendre est faible et n'est sensible que dans les sols salés.

Barbiero L (1992) a montré d'après, les résultats des analyses géochimiques des eaux de la nappe phréatique que la composition chimique de l'eau de la nappe devient celle de la solution du sol. Lorsque les eaux de la nappe imbibent les sols en contact. (Figure 6).



Figure 6. Profondeur de la nappe phréatique en fonction de l'anion cl. Barbiero L (1992)l

L'analyse des résultats de la compagne de mesure effectué par El fergougui M (2004) (annexe 4) du résidu sec a montré que le rapport des concentrations des sels du sol ( $C_s$ ) et de la nappe phréatique( $C_n$ ) est supérieur à 1 ( $C_s/C_n > 1$ ).

On constate sur la figure 7 que ce rapport augmente lorsque le niveau de la nappe se rapproche de la surface du sol. Par contre si la profondeur de la nappe phréatique s'éloigne de la surface, le rapport des deux concentrations diminue.

En comparant la figure 6 et la figure 7 nous constatons que le processus de salinisation du sol en fonction de la profondeur de la nappe suit la même allure.

lorsque la nappe est proche de la surface, les eaux de la nappe imbibent les sols en contact et la minéralisation de la nappe devient celle de la concentration en sels du sol.

Donc si la nappe est minéralisée, en se rapprochant de la surface sa minéralisation augmente.



Rapport entre résidu sec du sol / résidu sec de la nappe phréatique

*Figure 7 salinisation du sol durant la période d'observation.* (El fergougui M (2004))

Ben Hassine H (2005) a étudié l'effet de la nappe phréatique sur la salinisation des sols de cinq périmètres irrigués en Tunisie sous le contrôle de la direction des sols, du ministère de l'agriculture et des ressources hydrauliques, Ariana, Tunisie.

La salinisation à partir des eaux souterraines a été étudiée par des tests de corrélation simple entre la profondeur du plan d'eau et sa salinité d'une part et la conductivité électrique. Les cinq périmètres irrigués ont été suivis entre les années 1997 et 2002. Les tests de corrélation les plus significatifs sont apparus dans les sols du centre et du Sud-ouest du pays. Les profondeurs critiques sont assez importantes pour les sols de texture argileuse et varient entre 1,6 et 2 m selon les périmètres et les campagnes de mesure. Elles le sont moins pour les sols à texture sableuse et varient entre 1,3 et 1,5 m. A cette profondeur critique l'évaporation de la nappe phréatique tend vers zéro.

Selon Hamdi-aïssa B et al (2000) l'étude de la répartition spatiale de cette salinité permet de remarquer que les zones de déperdition de la nappe présentent de très fortes minéralisations. Le

faciès chloruré sodique est le faciès chimique dominant dans les eaux de la nappe, avec des teneurs en chlorures de 43 000 mg/l en moyenne. Les valeurs des indices de saturation indiquent que ces eaux sont sursaturées vis-à -vis des minéraux carbonatés et évaporitiques.

En présence des kaolinites et des illites aucun échange de base n'a été trouvé en raison de leur faible capacité d'échange. L'eau des sables dans la région étudiée sont plus chargées en sels (SO4, Cl, Na, Mg, Ca).

La topographie et l'absence d'un drainage fiable a entraîné la remontée de la nappe superficielle additionnées aux conditions climatiques arides, l'ensemble a contribué à la salinisation et l'hydromorphie des sols (figure 8).



Figure 8. Carte de risque salinisation de la cuvette de ouargla (Hamdi-aïssa B et all (2000))

Sols à risque de salinisation très élevé. Sol salin de la sebkha. La nappe phréatique très salée (CE > 30 dS.m-1) est à moins de 1m de la surface du sol. Le centre de la sebkha est partiellement inondé, notamment en hiver

Sols à risque de salinisation moyen. Sol gypseux à croûtes gypseuses de surface et de sub-surface. La nappe phréatique salée (CE entre 5 et 10 dS.m-1) est à plus de 5m de la surface du sol.

Sols à risque de salinisation élevé. Sol gypso-salin. La nappe phréatique très salée (CE > 30 dS.m-1) est entre 1 et 2 m de la surface du sol.

Selon I.E, Brinis N, Labar S (2007), les eaux de la nappe superficielle (phréatique) de la vallée fossile de l'Oued Mya (Ouargla), sont caractérisées par une forte salinité ; la conductivité

électrique présente une variation d'un point à un autre et oscille entre 2610  $\mu$ S.cm<sup>-1</sup> et 817850  $\mu$ S.cm<sup>-1</sup> associée à des pH alcalins, qui varient de 7.29 à 8.47.

La variation de la concentration des éléments chimiques dans l'espace est liée à la répartition des formations géologiques et la morphologie de la vallée de Ouargla. Par contre les variations dans le temps sont dues à l'effet de la température (évaporation).

### I-3 Impact de la remontée de la nappe phréatique sur le développement agricole

On distingue essentiellement deux types de salinisation, primaire et secondaire. La première est liée aux dépôts sédimentaires salés qui, en contacte avec l'eau se dessoudent et libèrent les sels, la deuxième (figure 9) est liée à la minéralisation des sels des eaux souterraines. En conformité avec les conditions hydrogéologiques, l'eau minéralisée de la nappe remonte jusqu'aux couches de surfaces par capillarités, en s'évaporant elle dépose les sels dans ces couches.



Figure 9. Salinisation secondaire des sols

1-Nappe phréatique salée.

2-évaporation de l'eau à partir de surface du sol.

3- zone active du sol (zone du dépôt de sel).

h- profondeur de la nappe.

h<sub>c</sub> - remontée capillaire.

h<sub>cr</sub>- profondeur critique.

Les conditions climatiques arides du désert font que l'irrigation est indispensable pour le développement agricole. Mais l'évacuation des eaux salées (2-8 g/l) (d'origine souterraine) après utilisation dans un système endoréique a entraîné la remontée de la nappe superficielle, la salinisation et l'hydromorphie, ont met en péril la qualité des sols et de l'environnement. Les états de surface salins ont formés des efflorescences blanches, croûtes salines. (Figure 10).




Figure 10. Surface du sol du chott d'Ain El Beida.

Tahar Idder et al 2011 ont montrés que l'accroissement important des débits utilisés pour l'irrigation, associé, surtout, à un usage souvent mal raisonné des ressources hydriques, ont conduit à des gaspillages importants, faisant apparaître des quantités non négligeables d'eaux excédentaires qui ont fortement perturbé les équilibres naturels dans les milieux urbains sahariens, milieux déjà très fragiles, caractérisés par des nappes superficielles très salées et souvent de faible profondeur et par des conditions topographiques qui ne facilitent pas l'évacuation des eaux.

Ces milieux, sont devenus aujourd'hui malades à cause de la remontée de la nappe superficielle, entraînant ainsi la salinisation et l'hydromorphie, mettant en péril la qualité des sols et de l'environnement

La surexploitation des ressources en eau, associée à l'absence d'un système efficace de drainage et d'évacuation, a inévitablement conduit à Ouargla à l'apparition d'un phénomène d'excédent d'eau, dans l'agglomération. Le volume d'eau prélevé à partir des 291 forages dans la nappe du complexe terminal et des 4 forages profonds dans la nappe du continental intercalaire est évalué à 150 hm<sup>3</sup>/an, dont 27 hm<sup>3</sup> pour les besoins urbains. La dotation moyenne par jour et par habitant pour l'alimentation en eau potable dépasse les 400 litres. C'est ainsi que la vallée de Oued R'hir, qui compte plus de deux millions de palmiers dattiers sur une

superficie de 15 000 ha connaît dans certaines zones des problèmes d'excès d'eau et de salinité des sols.

Ce phénomène est représenté par d'énormes mares d'eaux usées stagnant pratiquement en permanence dans les quartiers populaires et se transforment, en saison chaude, en de véritables nids à moustiques et autres insectes nuisibles. Dans les palmeraies, la situation est guère meilleure où les drains sont mal organisés et leur hiérarchie est souvent aléatoire. À cette mauvaise organisation, s'ajoute un manque flagrant d'entretien. Le réseau est souvent délaissé et livré à lui-même, et les mauvaises herbes prolifèrent gênant, ou obstruant parfois totalement, les écoulements, ce qui donne naissance à d'énormes surfaces d'eaux stagnantes qui provoquent l'engorgement et le dépérissement de ces palmeraies.

Selon la direction des services Agricoles (2007) i, il a été constaté une chute significative de rendement de la production agricole dû au dépôt de sel dans les terres nouvellement mises en valeurs.

Dans les zones agricoles, la nappe phréatique a créé un milieu d'anaérobie, néfaste pour les cultures et le palmier. Les effets nuisibles de la remontée des eaux dans la cuvette sont atténués (figure 11). Les sols ont de faibles capacités de rétention pour l'eau et pour les nutriments.

En effet, les fluctuations saisonnières du niveau de la nappe phréatique provoquent souvent des affaissements de terrain.



Figure 11. Périssement d'une palmerai dans la cuvette de Ouargla

Selon Laouini Hamza (2013), l'analyse des eaux du chott Ain Beida et sebkha Oum Raneb montre que le facies chimique dominant est chlorurée sodique vu les fortes concentrations en chlorure et sodium, sans ignorer les teneurs remarquable en sulfates. Géo-chimiquement et selon l'indice de saturation des sels minéraux, les carbonates sont précipités vu leurs faible solubilité. Les minéraux évaporitiques sulfatés sont en équilibre par leurs solubilités moyennes. Les minéraux évaporitiques chlorurés sont sous -saturés vu leurs forte solubilité.

L'analyse de diffractomètre par les rayons X (DRX) a montré que la Halite est le sel le plus dominant dans chott Ain Beida et sebkha Oum Raneb.

Des études effectuées depuis quelques années sur ses grandes étendues lagunaires (Chott Merouane, Chott Baghdâd, chott Ain Beida), montrent la richesse de ces milieux en plusieurs sels tels l'halite, le potassium, les sulfates, le lithium..., des teneurs de potassium qui dépassent largement les valeurs d'exploitation. Ces milieux sont fortement pollués ou en voie de dégradation.

#### I-4 Remède et Solution

La région de Ouargla a bénéficie de la loi de finances 1998 dans son article 85, au même titre que les autres régions du pays, d'un effort d'investissement appréciable, dans le domaine de la mise en valeur hydro-agricole. Cette rubrique, comprend les opérations de créations de nouvelles palmeraies, la réhabilitation et l'extension de celles existantes et la protection de périmètres agricoles.

Afin de connaître l'origine de la salinité des sols et la relation eau/roche. L'agence national des ressources hydrauliques a implanté neuf (39) piézomètres pour analyser la composition chimique des eaux de la nappe (Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Na<sup>+</sup>, Cl<sup>-</sup>, SO<sup>2-</sup><sub>4</sub>) durant deux périodes d'échantillonnage (février et juin 2002) et a dressé une carte piézométrique. Plusieurs méthodes hydro chimiques ont été utilisées pour expliquer les causes de cette salinité. Les résultats obtenus montrent que la salinité des eaux est liée à la nature lithologique de la formation aquifère (évaporites et carbonates) et le contexte climatique de la zone d'étude qui est caractérisée par des précipitations insignifiantes (<50 mm/an) et des températures élevées (40-45°C). En présence de ces conditions climatiques très sévères, le processus de l'évaporation de la nappe participe à la dégradation du milieu, notre étude contribue à une meilleure mise en valeur des terres en faisant une bonne critique de la nappe et en quantifiant son évaporation afin de déterminer sa profondeur correspondant à une faible l'évaporation et par conséquence un dépôt de sel faible dans le sol.

Pour diminuer la remontée des eaux de la nappe phréatique et sa minéralisation, il est indispensable de faire une bonne valorisation et gestion des ressources en eau. Ceci exige un bilan spatio-temporel des aquifères du Sahara., afin d'avoir un équilibre entre les eaux pompées et les eaux exploitées.des eaux naturelles.

L'exploitation des eaux d'irrigation doit être rationnelle, c'est à dire en fonction de la dose d'irrigation demandée et les saisons.

La profondeur des drains doit être étudiée en prenant en considération la présence de la nappe phréatique proche de la surface du sol.

Il est bien évident que toutes ces actions ne sauraient atteindre leur but, que dans la mesure où elles s'inscrivent dans le cadre d'un plan de gestion et de développement global des ressources en eau, soutenu par les pouvoirs publics, appliqué et suivi par les services techniques spécialisés compétent.

#### **I-5** Conclusion

Toutes les recherches scientifiques et les analyses statistiques vise à cerner les principales contraintes posées sur le plan des ressources en eau, à travers leur exploitation et leur gestion et accorder la priorité à la mise en place des meilleures conditions techniques, économiques, sociales et écologiques des programmes utilisés. Elles permettent d'apprécier leurs conséquences sur le niveau de développement des oasis sahariennes, à travers une agriculture durable. Cela garantirait aux régions sahariennes un développement local intégré certain contribuant à la préservation du milieu oasien.

# CHAPITRE II CADRE NATUREL DE LA ZONE D'ETUDE

#### **CHAPITRE N°II**

### CADRE NATUREL DE LA ZONED'ETUDE

#### Introduction

L'évolution ou la cause de la salinité des sols dans les zones arides est régie par un ensemble de facteurs. Ceux qui ont plus d'influence sont formés par les conditions géomorphologiques, géologiques, hydrogéologiques, climatiques, pédologiques et anthropiques. (Raimini V.E et al 1978).

# **II.1 Situation géographique**

La cuvette de Ouargla est située au Sud de l'Algérie, à 790 km de la capitale et sur une large cuvette de la vallée d'oued M'ya. Elle se trouve à une altitude moyenne de 137 m, ses coordonnées géographique suivant la latitude est de 31°57' Nord et suivant la longitude est de: 5°20' Est .(Figure 12). (Dubief J, 1954).

Elle est limitée au Nord par la wilaya d'El-oued au Sud, par la wilaya de Tamanrasset et Illizi à l'Est par la Tunisie et à Ouest par la wilaya de Ghardaïa et la wilaya de Djelfa. (Figure13). Le relief est caractérisé par une faible pente.



Figure 12. Coordonnées géographiques de la cuvette de Ouargla (OSS, 2003)



Figure 13. Limites géographiques de la cuvette de Ouargla (Encarta, 2004)

La Wilaya de Ouargla couvre une superficie de 163230 Km<sup>2</sup>. Elle demeure une des collectivités administratives les plus étendues du pays. Elle compte actuellement 21 communes regroupées en 10 daïras selon la répartition suivante : (Tableau II).

# **II-2** Population et activités

La population totale de la wilaya est estimée à 558563 habitants en 2008, soit une densité de 3.4 habitants par Km<sup>2</sup>, avec une population active de 156.686 habitants et une population occupée de 121602 habitants. Avec une répartition de la population occupée suivante :

- Administration et services : 64887 habitants.
- -Agriculture : 20113 habitants.
- -BTPH :19505 habitants.
- -industrie :17097 habitants.

Daïra	Commune	Superficie
		km <sup>2</sup>
Ouargla	Ouargla,	2887
	Rouissant	7331
N'Goussa	N'Goussa	2907
Sidi Khouiled	Sidi Khouiled,	131
	Aïn Beïda,	1973
	Hassi Ben Abdellah	3060
Hassi Messaoud	Hassi Messaoud	71237
El Borma	El Borma	47261
El-Hadjira,	El-Hadjira,	2459
	El-Alia	6589
Temacine	Temacine,	300
	Blidet-Amor	250
	Touggourt,	216
Touggourt	Nezla,	132
	Tebesbest,	26
	Zaouia El-Abidia	30
Megarine	Megarine,	285
	Sidi Slimane	-
Taibet	Taïba,	4562
	Bennaceur,	2593
	M'Nagueur	8399

Tableau II. Daïras, Communes, superficie

#### II-3 Potentialités de développement

La région de Ouargla possède des potentialités de développement important dans les activités économiques à savoir :

-Potentialités en hydrocarbures constituant la principale richesse nationale.

-Potentialité élevée en énergies renouvelables.

-Disponibilités hydriques profonde importante à gérer durablement.

-Potentialité minières.

-Potentialité touristiques.

-Diversité des écosystèmes offrant une diversité de sites et terroirs à économie stable et en harmonie avec les conditions pédoclimatiques locales.

-Disponibilité de l'espace non ou peu dégradé.

La wilaya de Ouargla enregistre un développement spectaculaire dans le domaine agricole et notamment la phoeniciculture et la céréaliculture sous pivot grâce à son climat et à la mobilisation de la ressource hydrique.

La superficie agricole totale s'élève à 39 737,13 ha, avec une surface exploitée de 23 779,92 ha.

### **II-4** Aperçus climatique

La wilaya de Ouargla est caractérisée par un climat saharien, avec une pluviométrie très réduite, des températures élevées, une forte évaporation et par une faiblesse de la vie biologique de l'écosystème. Le Sirocco (vent chaud et sec) peut être observé à toute époque de l'année. L'évaporation est très importante (atteignant 600 mm dans un seul mois à Ouargla et 420 mm à Hassi Messaoud).

NB : les données climatiques sont représentées en annexe 2 et 3

#### II-4-1 Température de l'air

Les températures à Ouargla sont caractéristiques du climat saharien avec des valeurs très élevées en été. La moyenne mensuelle du mois le plus chaud (juillet) dépasse 30°C et celle du mois le plus froid (janvier) est entre 10°C et 20  $^{0}$  C<sup>.</sup> (figure 14). En été, la chaleur est extrême et prend un caractère persistant : les températures moyennes maximales dépassent 45 °C en juillet (le mois le plus chaud). Les températures sont agréables et modérément élevées en hiver mais seulement la journée, les températures minimales moyennes sont inferieur à de 5 °C ces derniers sont enregistrées dans la nuit.

La plus longue vague de chaleur s'étale de mai à octobre constituant des températures moyennes supérieures à 35 °C.



#### **II-4-2** Pluviométrie

Les précipitations enregistrées dans la période 2000-2009 (figure 15) sont très faible, irrégulières et insignifiantes quantitativement à l'exception des précipitations enregistrées en janvier 2006. Annexe 2.

Les précipitations proviennent des perturbations orageuses, courtes et violentes (Cornet A, 1964). La plupart des précipitations se produisent durant l'hiver, bien que certains hivers soient pratiquement secs 2000,2001, 2002, 2005, 2008.



Figure 15. Précipitations moyenne mensuelle de Ouargla . Période 2000 à 2009 (ONM)

# II-4-3 Humidité de l'air

L'humidité varie entre 22% et 70%. Elle varie sensiblement en fonction des saisons de l'année. En effet pendant l'été, elle diminue jusqu'à 22 %, sous l'action des vents chauds. Elle s'élève en hiver et atteint une moyenne maximale de 64,04 % au mois de décembre (O.N.M, 2006). (Figure 16).



Figure 16. Humidité relative de l'air Ouargla 2000-2009 ONM

# **II-4-4** Evaporation

L'évaporation est très élevée, en effet, elle varie entre 100 et 200 mm /mois en hivers et atteint les 600 mm/mois en été. Elle est très variable suivant les années (figure 17), les mois et les semaines. De même les enregistrements dans la période 1995-2000 (ONM Ouargla) ont donné une évaporation interannuelle intense de l'ordre de 2199 mm/an.

L'année 2006 est l'année la plus pluvieuse, avec un cumul de précipitation totale de 203 mm et une évapotranspiration totale de 3796 mm. L'indice d'aridité d'Emberger appliqué par l'UNESCO (Cosandey C, 2000) pour le Sahara (I) est de :

I = P/ETP. I = 0.0534

P : précipitations annuelles en mm

ETP : évapotranspirations annuelles mm

Selon cet indice la région de Ouargla est classée dans la zone à aridité normale 0.03 < I < 0.2L'évaporation est très élevée, en effet, elle varie entre 100 et 200 mm /mois en hivers et atteint les 600 mm/mois en été. Elle est très variable suivant les années (figure 17), les mois et les semaines. De même les enregistrements dans la période 1995-2000 (ONM Ouargla) ont donné une évaporation interannuelle intense de l'ordre de 2199 mm/an.

L'aridité peu être spécifier d'après l'UNESCO aussi selon le phénomène climatique impliquant une pluviométrie faible. Dans les régions dites arides ou sèches.

-Hyper- aride : précipitations (10 à 15 mm par an, en moyenne).

-Aride : précipitations (50 à 150 mm dans la zone tropicale, répartis de manière saisonnière en averses) ;

-Semi-aride (rythme saisonnier, jusqu'à 500 mm de pluie).

Avec une précipitation totale de 203 mm, la zone de Ouargla se situe entre une zone aride et semi aride, 150 mm < P < 500 mm

Il existe aussi une multitude d'indices et de formules, certaines basées sur des critères climatologiques, d'autres biogéographiques. Parmi tous ces indices, les plus connus restent ceux d'Emmanuel de Martonne (1926 à 1941), de Bagnoul et Gaussen (1953 à 1957 et de Charles Warren Thornthwaite (1948), dont l'indice n'a pas été calculé.

-Indice d'aridité de De Martonne

L'indice d'aridité de De Martonne, noté I, cet indice permet de déterminer le degré d'aridité d'une région.

Pour le calculer, on utilise la formule I = P/T + 10

où P désigne les précipitations totales annuelles 203 mm, et T la température moyenne annuelle de 30,7°c

I = 4,99

I=0 → Région Hyper- aride

I=5 **Région aride** 

Région hyper – aride < 4,99 < *R*égion aride

La région de ouargla avec un indice d'aridité de 4,99 selon De Martonne est une région aride.

-Indice de Gaussen

Selon Gaussen, un mois est dit aride, quand : P < 2 \* T

(P : précipitations totales en millimètres sur 1 mois, T : température moyenne en °C sur le même mois).

Selon les observations effectuées sur la série de 2000 à 2009 (voir annexe 2et 3), en constate que :

En 2000 le mois le plus pluvieux est le mois d'octobre avec 36,4 mm et une température moyenne de  $21,9^{\circ}$ C. (36,4 < 43,8)

En 2001 le mois le plus pluvieux est le mois de décembre avec 3,6 mm et une température moyenne de  $11,7^{\circ}$ C. (3,6 < 11,7 \* 2)

En 2002 le mois le plus pluvieux est le mois de mai avec 5 mm et une température moyenne de  $27,8^{\circ}$ C. (5 < 27,8 \* 2)

En 2003 le mois le plus pluvieux est le mois de mars avec 15,5 mm et une température moyenne de  $12,5^{\circ}$ C. (15,5< 12,5 \* 2)

En 2004 le mois le plus pluvieux est le mois de novembre avec 43,3 mm et une température moyenne de  $15,4^{\circ}$ C. (43,3 > 30,8)

En 2005 le mois le plus pluvieux est le mois de novembre avec 17,2 mm et une température moyenne de  $18,1^{\circ}$ C. (17,2 < 18,1 \* 2)

En 2006 le mois le plus pluvieux est le mois d'octobre avec 94 mm et une température moyenne de  $9,8^{\circ}$ C. (94 > 19,6)

En 2007 le mois le plus pluvieux est le mois de décembre avec 6,1 mm et une température moyenne de  $11,5^{\circ}C.(6,1 < 11,5 * 2)$ 

En 2008 le mois le plus pluvieux est le mois d'octobre avec 24,1 mm et une température moyenne de  $24,4^{\circ}$ C. 24,1 < 24,4 \* 2

En 2009 le mois le plus pluvieux est le mois de janvier avec 54,1 mm et une température moyenne de  $12,3^{\circ}$ C. (54,1> 24,6)

Selon de Gaussen les années (2000,2001, 2002, 2003, 2005,2007, 2008) la région de ouargla était touchée par une aridité sévère.

Par contre toujours Selon Gaussen les seuls mois qui ne sont pas arides sont :

Novembre de l'année 2004.

Octobre de l'année 2006.

Janvier de l'année 2009.





#### II-4-5 Vitesse du vent

Le vent dans la région de Ouargla souffle pendant toute l'année avec des vitesses variables allant de 1.m/s en novembre à 6 m/s (figure 18) (O.N.M, 2006).

En hiver, ce sont les vents d'Ouest qui prédominent. Au printemps, ils proviennent du Nord, du Nord Est et de l'Ouest. En été et en automne, ils viennent du Nord vers le Sud. Les vents les plus forts soufflent Au printemps. (Rouvillois-Brigol, 1975, Dubief, 1963)



Figure 18 .Vitesse du vent mensuelle de Ouargla . Période 2000 à 2009 (ONM)

#### **II-5** Aspect géomorphologiques

La wilaya de Ouargla est située dans l'immense bassin saharien, caractérisée par la prédominance de dépôts plio-quaternaires, des affleurements éocènes et crétacés qui se rencontrent néanmoins à l'Est. Elle se trouve dans une région très peu accidentée, tectoniquement stable.

Du point de vue lithologique et pétrographique, on rencontre dans les affleurements, à travers le territoire de la Wilaya, des alluvions actuelles, des sebkhas (chott) et des croûtes gypso salines, des sables éoliens mobiles et des regs. Le grand Erg oriental s'étend sur environ les deux tiers du territoire de la wilaya, c'est une véritable mer de sable ou les dunes pouvant atteindre une hauteur de 200 m. La hamada est située en grande partie à l'Ouest et au Sud, c'est un plateau caillouteux. (HALILET T, 1998)

Les vallées sont représentées par la vallée fossile d'Oued Mya et la vallée de Oued Righ, assez prospérés .Les plaines qui sont assez réduites, se rencontrent à la limite occidentale de la wilaya, ces plaines s'étendent du Nord au Sud. Les dépressions sont quant à elles peu nombreuses. Elles se trouvent essentiellement dans la région d'Oued Righ. Le relief est caractérisé par une faible pente. (HALILET T, 1998)

# **II-6 Aspect hydrologiques**

La cuvette de Ouargla et sebkha Safioune constituent l'exutoire naturels des principaux oueds du bassin du M'zab (Dubief J, 1954). Oued M'zab et oued N'sa venant du versant oriental de la dorsal mozabite rencontrent oued M'ya pour se jeter enfin à sebkha Safioune. (Figure 19) et (figure 20).

La cuvette de Ouargla se trouve complètement sur le lit de oued M'ya. Ce dernier couvre une superficie de 19800 km<sup>2</sup> et prend son origine à l'oued de Ain Hadjadj à une altitude de 800 m. Son écoulement est stoppé par le cordon dunaire de Tinedjouine vers la cote de 200 km à l'amont de Ouargla. Le fossile du M'ya inférieur est jalonné par de vastes sebkhas jusqu'à Ouargla.

Oued M'zab prend naissance dans la région de Botma Rouila (wilaya d'El baied) à une altitude de 750 km. Il occupe une superficie de 5000 km<sup>2</sup>. Il coule de l'Ouest à l'Est sur une trajectoire de 320 km et se déverse enfin à sebkha Safioune. L'écoulement atteint très rarement Sebkha Sefioune. On note que les dernières crues atteignant Sebkha Sefioune remontent à janvier 1990.

Le bassin de Oued N'sa couvre une superficie de 7800 km<sup>2</sup>, il est situé à l'Ouest de la cuvette, prend naissance à Tilrhemt (Laghouat) d'une altitude de 750 m et parcourt une distance de 320 m pour se jeter enfin à sebkha N'goussa au Nord de Ouargla. Cet Oued est fonctionnel et conserve ses traces assez nettes. Il atteint sebkha Sefioune qui se situe à 10 km de sebkha N'goussa pratiquement toutes les années.

Bien que ces Oueds ne soient plus fonctionnels ou du moins sporadiquement à l'amont, ils alimentent la nappe phréatique de la région de Ouargla par un écoulement souterrain, après avoir traversé des sédiments anciens salés alcalinises (Durant J.H 1983).

Les exutoires sont constitués principalement par les grandes cuvettes d'évaporation : chotts Melghir et Merouane.



Figure 19. Exutoire des trois oued (Nsa,M'zab,Mya) ( Dubief J, (1954))



Figure 20. Superposition de la carte géologique de G. Busson au MNT

#### II-7 Aspect hydrogéologiques

Les ressources hydriques disponibles dans les oasis du Sahara, sont d'origines souterraines. Les formations géologiques de la région de Ouargla contiennent deux grands ensembles de formations aquifères bien connus, le Continental Intercalaire, (CI) ou "Albien", qui s'étend sur tout le bassin sédimentaire du Sahara septentrional sur une superficie de 600 000 km2 et le complexe terminal (CT) qui occupe une superficie d'environ 350 000 km2. (Fabre J, 1976, FAO 1990, Raimini V.E 1978 et al).

La nappe du continental intercalaire « Albien » est en réalité installée dans les couches détritiques de l'Albien et du Barrémien souvent séparées par les bancs calcaires aptiens. Son toit se situe au-delà de 1500 m de profondeur et dépasse dans d'autres zones les 2600 m (DUBOST, 1992).

Le complexe terminal (CT) renferme, sur le territoire algérien, deux formations aquifères distinctes. La première est contenue dans les sables du Miopliocéne, elle s'écoule du Sudouest vers le Nord-est en direction du chott Melrhir, tandis que la seconde se trouve dans le Sénonien supérieur et l'Éocène inférieur. L'exploitation de cette dernière est négligeable à cause du faible rendement de ses puits. Cette nappe est exploitée entre 140 et 400 m.

La minéralisation des eaux de la nappe du Miopliocéne varie à Ouargla, globalement, de 3 ms.cm<sup>-1</sup> à 6,5 ms.cm<sup>-1</sup>. Les eaux de la nappe sénonienne sont moins chargées, leur conductivité ne dépassant généralement pas la valeur de 3 ms.cm<sup>-1</sup> (Idder, 1998). L'origine de la salinité de ces eaux peut être expliquée par le lessivage des formations salifères qui a pu se produire lors des périodes salifères majeures ayant eu lieu principalement à la fin du Crétacé et au Pliocène. Les eaux des nappes du Complexe Terminal conviennent généralement pour l'irrigation à condition que les cultures irriguées soient tolérantes aux sels et que les sols utilisés soient régulièrement lessivés et drainés. 60 % environ des eaux mobilisées à partir de ces aquifères sont affectées à l'usage agricole.

Une troisième formation, s'ajoute aux deux précédentes, la nappe phréatique ou nappe superficielle contenue dans les alluvions de la vallée de l'Oued Mya et dans les sables dunaires sa profondeur varie dans l'agglomération entre 0,5 m et 10 m de profondeur, mais dans les zones les plus basses, elle se trouve pratiquement à la surface de sol. L'alimentation de cette nappe s'effectue essentiellement sous la ville et sous les palmeraies de ouargla et N'goussa, par les eaux d'irrigation et les eaux usées. Cette alimentation se fait à travers les couches de sables de Miopliocéne formant les falaises à l'Ouest de Ouargla. (Dubief J, 1954).

Les eaux de la nappe phréatique sont de qualité mauvaise. Leur degré de minéralisation, qui dépasse 70 mS.cm<sup>-1</sup> dans certains endroits de la cuvette, s'oppose à tout usage agricole (ANRH 1998).

Les résultats obtenus (Nezli E 2002) ont montré que l'origine de la salinité des eaux de la nappe phréatique est liée à la nature lithologique de la formation aquifère (évaporites et carbonates) et au contexte climatique de la zone d'étude, qui est caractérisé par des précipitations insignifiantes et des températures élevées. La variation de la concentration des éléments chimiques dans l'espace est liée à la répartition des formations géologiques et la morphologie de la vallée de Ouargla. Par contre les variations dans le temps sont dues à l'effet de la température (évaporation).

Le sens de l'écoulement de la nappe phréatique est Sud –Nord suivant la pente du lit fossile de l'oued M'ya. ANRH. L'agence nationale des ressources hydriques a établi des cartes du substratum de la nappe phréatique, sur 2 et 3 dimensions en se basant sur des coupes géologiques des forages du CI dans la région de Ouargla, (figure 21 et 22). Le substratum est limité par une couche d'argile rouge.



Figure 21. Substratum de la nappe phréatique. ANRH .2006 à 2D



Figure 22. Substratum de la nappe phréatique. ANRH .2006 à 3D

La superposition de la figure 22 sur le plan de masse de Ouargla a donné l'allure du substratum de la nappe phréatique dans les différents endroits de la région de Ouargla. (Figure 23).

Celle-ci montre que la surface du substratum est très accidentée et présente des dépressions altimétriques, ce qui explique l'inondation permanente par remontée de la nappe de certaines zones. L'épandage est de l'Est et l'Ouest vers le centre, et du Sud vers le Nord-est. Le lit d'Oued Mya est bien visible, avec un sens d'écoulement du sud-est vers le nord-est.



Figure 23. Substratum avec les différentes singularités. (ANRH 2006)

Selon l'office national de l'assainissement (ONA), la nappe phréatique a été étudiée avec précision lors des quatre campagnes de mesures, en octobre 2001, avril 2002, octobre 2002 et novembre 2003. Une équipe de topographes a nivelé 72 piézomètres opérationnels pour la campagne d'avril 2002. Le niveau piézométrique est ainsi connu avec précision depuis les piézomètres situés dans une plantation de Krima, 8 km au sud de Ouargla, jusqu'à la Sebkha Safioune, 40 km,

En octobre 2002, la surface libre de la nappe se situait à la cote 135,08 m au P 31 en ville de Ouargla, dans l'enceinte du Centre Culturel et 134,65 m au P 413, tout au sud, pour les points les plus élevés. La cote était de 127,95 m au P 068 entre le Chott et la sebkha de Ouargla, 7 m plus bas que ces points. Les points les plus bas sont situés dans la Sebkha Safioune, tout au nord, avec des cotes comprises entre 102,19 m et 102,95 m, inférieures de 32 m à celles des points les plus hauts et 25 m plus bas qu'au Chott. La nappe s'écoule librement des points hauts vers les points bas, perpendiculairement aux isopièzes et n'a aucune possibilité de remonter de la Sebkha Safioune vers le Chott de Ouargla ou la sebkha d'Oum Raneb.

Les parties hautes de la nappe phréatique sont situées au sud et sous la ville de Ouargla, (figure 24).

Les parties les plus basses de la nappe phréatique sont situées au nord dans la Sebkha Sefioune.

Les cotes principales sont : 134 m au sud ; 135 m en ville de Ouargla ; 128 m au Chott et à la sebkha ; 127 m à la sebkha d'Oum Raneb ; 117 m à N'Goussa et 102 m à la Sebkha Safioune. La nappe phréatique est épaisse de 1 à 8 m. Elle repose sur un épais niveau imperméable, étanche, qui occupe tout le fond de la vallée de Ouargla et l'isole des nappes artésiennes sous-jacentes.

La pente moyenne de la nappe phréatique est de 0,9 ‰ entre la plantation de Krima au Sud et la Sebkha Safioune au nord extrêmement faible. La vitesse d'écoulement de la nappe phréatique est de 16 m/an.

Le niveau de la nappe phréatique est réglé par un équilibre entre les entrées et les sorties. Les entrées sont principalement constituées par les eaux d'irrigation et de l'AEP (provenant des nappes artésiennes profondes), des rares crues des oueds M'Zab et N'Sa et des arrivées d'eau provenant des flancs de la vallée. Les sorties sont essentiellement dues à l'évapotranspiration de la végétation, à l'évaporation des eaux de la nappe remontant par capillarité (lorsque la nappe phréatique est peu profonde) et par l'écoulement vers les points bas constitués par le Chott et les sebkhas.

Lorsque les entrées sont supérieures aux sorties, la nappe monte et remplit dans un premier temps les pores des terrains sus-jacents (entre 10 et 40 % du volume). L'ascension capillaire est ainsi facilitée et l'évaporation augmente, ce qui tend à stabiliser son niveau.

Dans un deuxième temps, principalement lorsque l'évaporation est faible en hiver, la nappe peut affleurer dans les points bas et former des surfaces d'eau libre, dans les chotts et les sebkhas où elle s'accumule. Lorsque la température augmente, l'eau s'évapore, laissant des évaporites (gypse, sel, etc.) sur place.



Figure 24. Piézométrique de la nappe phréatique en novembre 2003.ONA

#### **II-8** Aspect pédologiques

Selon Youcef F Hamdi-Aissa H et, (2006), les sols de la région de ouargla conservent des paléo caractères qui témoignent d'un fonctionnement passé et reflètent la fluctuation des conditions paléoclimatiques qui se traduisent par une succession de sédiments hydro-éoliens. Ces caractères hérités qui sont le résultat de paléo processus ancien, ont été identifiés sur le terrain et étudiés plus en détail au laboratoire à travers la micromorphologie au moyen des analyses physico-chimiques et minéralogiques. L'analyse a montré des traits pédologiques qui indiquent des conditions climatiques instables; les traits calcitiques notamment les nodules calcaires qui témoignent de climat plus humide, les intercalations texturales et les croûtes sédimentaires paraissent être formés sous conditions différentes de l'actuelles, les revêtements argileux d'origine sédimentaires anciennes, et l'alternance des horizons sableux et sablo-limoneux.

Pour la sebkha de Ouargla, les changements paléoenvironnementaux se manifestant par l'existence d'un paléo lac qui été probablement synchrone avec celui de Mellala, l'encroûtement calcaire qui traduit des conditions plus humides que l'actuelle, la couche organique, les microfossiles, les revêtements argileux et la présence du gypse en surface.

Pour la Sebkha Mellala, les formations gypseuses existantes ont été formées dans un milieu lagunaire sous un climat supposé moins aride pour permettre la mobilisation de ces quantités de gypse. La coupe SM marque l'existence de conditions plus humides par la présence de fossiles indiquant des eaux douces a peu salées, et les couches organiques qui indiquent un passage par un stade marécageux.

La région de l'oued Mya, à connu à plusieurs reprises la formation d'évaporites, au Trias et au Sénonien. Ces formations tectoniques ont imprégné de sel et de gypse les terrains avec lesquels elles se sont trouvées en contact et ont provoqué une diffusion importante de sel (Gaucher et Burdin, 1974).

Le sol de la région est de type léger à prédominante sableuse et à structure particulière. Il est caractérisé par un PH alcalin, une faible activité biologique .Il pose d'énorme problème de mise en valeur, il présente souvent des croutes calcaires ou gypseuses et la plus part salée. L'argile dans le sol est considérée comme sodique, elle est dispersée et mobile. (HALILET T, 1998)

La nappe phréatique, qui imprègne le matériau pédologique et qui se situe à faible profondeur sous la surface du sol, joue par son caractère fortement salin, un rôle très important dans l'accentuation du phénomène de salinisation des sols.

#### **II-9** Aspect anthropiques

L'irrigation est la principale cause anthropique de la salinisation des sols, car malheureusement les méthodes traditionnelles utilisées pour l'irrigation n'ont fait qu'augmenter le processus de salinisation des sols et d'accentuer l'aggravité du problème.

Il s'agit alors d'une part d'éviter l'accumulation de sels en fortes quantités dans le sol, et d'autre part, de limiter les gaspillages d'eau. A titre d'exemple, un ha de blé consomme 6000  $m^3$ , si l'eau d'irrigation contient 2 g/l de sels, la culture peut alors laisser dans le sol en fin de cycle 12 tonnes de sels. DSA direction des services agricole (2010).

La région de Ouargla faisant état de contamination des eaux souterraines par les polluants anthropique anarchique et naturelles, la région est soumise à un degré de vulnérabilité assez important. Ces facteurs exposent les eaux souterraines à une pollution sévère.DHW (direction d'hydraulique de la wilaya, 2010).

Dans le cas de la cuvette d'Ouargla, la pollution engendrée par le rejet des eaux a atteint un seuil inquiétant en raison de la diversité des matières polluantes et de la quantité importante en eau usées (40906 m3/j pour l'année 2001).Djidel M (2008). Les eaux des nappes phréatiques, sont exploitées par des puits à des fins agricoles et domestiques, traversée par un canal collecteur à ciel ouvert, où par une pollution engendré de la formation géologique des roches (pollution naturel). (Zeddouri A, 2010). Si des actions ne sont pas en envisagées à court, moyen et à long termes, nous assisterons sans doute à un déséquilibre, une dégradation et une désertification des oasis.

#### **II-10 Végétations**

Dans le Sahara, le couvert végétal est caractérisé par un feuillage réduit avec accumulation chez certaines espèces d'importantes réserves d'eau tissulaire et par une réduction extrême des pertes par transpiration. Ces adaptations sont en rapport avec les conditions climatiques qui caractérisent les biotopes désertiques, UNESCO, 1960 et Ozenda, 1979).

Le Sahara septentrional possède une végétation diffuse et clairsemée. Les arbres sont aussi rares que dispersés et les herbes n'y apparaissent que pendant une période très brève de l'année, quand les conditions deviennent favorables (UNESCO, 1960 et Ozenda, 1979).

La flore saharienne apparaît comme très pauvre si l'on compare le petit nombre d'espèces qui habitent ce désert à l'énormité de la surface qu'il couvre (Ozenda ,1977).

La flore du Sahara septentrional est relativement homogène, et les pénétrations méditerranéennes en font l'une des régions les plus riches du Sahara. L'endémisme y est élevé

du fait des vastes espaces impropres à la vie : pour le Sahara septentrional, on dénombre 162 espèces endémiques (Quezel ,1978).

A travers l'importance écologique et environnementale que possèdent les plantes sahariennes, dans l'alimentation des bétails, la médecine traditionnelle, la protection et fixation du sol qu'elle offre, en plus une source d'alimentation, et refuge pour plusieurs êtres vivants, elles n'ont cependant pas bénéficié de l'attention qu'elles méritent (Ramade 2003).

L'adaptation des plantes aux duretés des changements climatiques dans la région aride et la capacité de subsistance des plantes pendant une longue période sèche est obtenue par des moyens extrêmement variés. Et son importance est en fonction de la quantité d'eau disponible (Ozenda, 1983).Une partie des plantes raccourcissent leurs cycles de développement de manière à supprimer toute leur partie aérienne pendant la période de sècheresse, qu' elles traversent alors, soit sous forme de grains, soit sous forme d'organe souterrain tels que les bulbes et les rhizomes, d'autres au contraire maintiennent leur partie aérienne mais présentent un ensemble de dispositifs anatomiques qui ont pour effet de leur assurer une meilleure alimentation en eau et de diminuer les pertes par évapotranspiration (Ozenda, 1992).

Généralement l'adaptation des plantes désertiques porte sur la réduction de la surface foliaire, la diminution de la vitesse d'évaporation, et la constitution de réserve d'eau à l'intérieur des tissus. (Ozenda, 1977), comme les palmiers, en rencontre aussi des plantes dites des pays tempérés blé, orge, tomate et betterave.

Le secteur agricole dans la région de ouargla a connu une introduction de la céréaliculture sous pivot durant les années 80. Cette option a eu une importante adhésion puisque plus de 44 centres pivots couvrant environ 2167 ha ont été mis en culture dans la wilaya d'Ouargla durant les campagnes 1986/1987. Malheureusement dix années plus tard, une graduelle régression de la superficie céréalière a été observée. En 2008 la DSA à enregistré 150 exploitation agricole abandonnées (couvrant 2040 ha de terre agricole abandonnée). Le diagnostic de ces terres a montré que ces zones sont perturbées et la principale cause était la dégradation du milieu.

La palmeraie est l'image de l'oasis, qui représente un maillon important dans l'adoucissement du climat austère et remplit des fonctions écologiques et sociales indéniables.

Les anciennes oasis sont en dégradation importante, elles sont menacées par des facteurs aussi complexes que divers qu'on doit cerner si on veut les réhabiliter et leur restituer le rôle qui leur était autrefois destiné.

L'agriculteur réalise des brises vents pour réduire les effets des vents chauds qui augmentent l'évapotranspiration, afin d'optimiser sa production.

#### **II-10 Conclusion**

La qualité des eaux d'irrigation dans les différentes régions notamment, celles situées au centre et au nord de Ouargla, sont de mauvaises qualité et leur teneur en sels peut dépasser les 7 g/l de résidu sec (région de Oued Rhir). Cette forte teneur en sels conjuguée à la nappe phréatique proche de la surface du sol, est l'une des causes de la stérilisation des sols de plusieurs zones agricoles. Ce phénomène a pris de l'ampleur, surtout après l'application de la mise en œuvre de la loi relative à l'accession à la propriété foncière agricole (APFA) menée souvent sans études préalables des sols, de cultures adaptées et des besoins en drainage, la mauvaise gestion de la ressource en eau sont à l'origine de l'accroissement de certains phénomènes notamment, la pollution des nappes . Ceci a provoqué dans certaines régions un accroissement important de la salinité et la stérilisation de grandes étendues de sols.

Il faut souligner que les principales causes déterminant la salinisation des sols sont le climat, la formation géologique, les conditions géomorphologiques et hydrogéologiques.

Les caractéristiques du milieu montrent que la ville de Ouargla, installée avec ses palmeraies au fond d'une cuvette en zone désertique, constitue un lieu idéal à l'accumulation et la stagnation des eaux. Sous l'influence des conditions climatiques, caractérisées par une aridité extrême et une sécheresse permanente, une pluviométrie très réduite, des températures élevées, une forte évaporation et par une faiblesse de la vie biologique de l'écosystème et d'une nappe d'eau superficielle excessivement salée et de faible profondeur, le milieu naturel évolue ainsi rapidement vers des conditions de salinité et d'hydromorphie excessives.

La cuvette de Ouargla représente par conséquent un contexte écologique particulièrement fragile, où la gestion des ressources hydriques doit être menée avec extrêmement de soins et de prudence.

La combinaison des différents facteurs géologiques, hydrogéologique, pédologique et climatique étudiés précédemment entraine une salinisation de plus en plus accentuée des sols. La faible pluviométrie ne permet pas le lessivage du sol. Les grandes chaleurs provoquent une évaporation accentuée et une cristallisation des sels qui affleurent à la surface.

A la salinisation s'ajoute la saturation. Cette dernière se traduit par la stagnation des eaux à la surface, à l'asphyxie de la couche radiculaire et à la modification dans la structure du sol.

Ces deux processus salinisation et saturation constituent un problème majeur pour les mises en valeurs des terres, créations de nouvelles palmeraies, réhabilitation et l'extension de celles existantes. Pour cela il faut empêcher la remontée des eaux de la nappe phréatique en utilisant des réseaux de drainages et d'irrigations avec une technologie moderne. La technologie traditionnelle de désalinisation en particulier en absence de dénivellation suffisante n'est plus fiable, puisque l'eau en excès dans le sol s'évapore est les sels apparaissent à la surface.

Pour cela pour que le réseau de drainage soit efficace, il faut qu'il soit à une profondeur suffisante.

Chapitre III Matériels et méthodes

# Chapitre III Matériels et méthodes

### **III-1 Matériels**

# **III-1-1** Site expérimental

Le site d'étude et localisé dans la zone expérimentale de l'université de Kasdi Merbah de Ouargla, (faculté des sciences et techniques et sciences de la matière, (figure 25)), à 5 Km environ de l'Ouest du centre ville à une altitude de 135 m suivant les coordonnées 31°56' Nord et 5°18'Est.

La station expérimentale est une surface rectangulaire 30×13 m avec un sol nus.



Figure 25. Cite expérimental. Google 2012

# III-1-2 Lysimétre

Les mesures de l'évaporation de la nappe phréatique ont été réalisées au moyen de deux lysimétres en PVC ondulés, (figures 26 et 27).

Le protocole de l'implantation des lysimétres est en annexes de 6 à 12.



Figure 26. Lysimétre pour mesurer l'évaporation de la nappe phréatique



*Figure 27. Lysimétre pour mesurer l'évaporation de la nappe phréatique* 

La distance entre ces deux lysimétres est de 16,4 m (figure 28). Le diamètre de chaque lysimétre est de 1,2 m avec une profondeur de 6 m. A l'intérieur de chaque lysimétre est implanté un piézomètre de 75 mm de diamètre et de 6 m de profondeur (figure 29). La recharge en eaux des lysimétres a été réalisée du bas vers le haut au moyen d'un tuyau flexible entrainé dans une gaine en pvc de 6 m.



Figure 28. Implantation des lysimétres



Figure 29. Dimension du lysimétre

Les lysimétres sont remplis d'un sol à texture sableuse de couleur jaune reflétant le milieu naturel des sols agricole de la zone arides de Ouargla.

Les échantillons prélevés dans le sondage (tableau III) ont montré que le sol du site expérimental est constitué de sable de couleurs jaune et marron.

Les sables jaune constituent la tranche comprise entre 0 et 2 m. Les essais d'identifications montrent une teneur en eau (W) de 22,2%, une densité (d) de  $1,14 \text{ t/m}^3$ .

Les sables marron constituent la tranche comprise entre 2 et 6 m ils ont une teneur en eau d'environ 24,4 %. Le degré de saturation est supérieur à 60 %. Les densités est de  $1.60 \text{ t/m}^3$ .

ejjectue dans te tabordiotre des travaux public sud [L175].							
					%	%	
Intervalle		W	d	des graines < à	des graines < à		
Sondages	échantillonné	Nature	%	t/m <sup>3</sup>	0.2mm	80μ	
1	0 à 2 m	Sable jaune	22.2	1.14	27	27	
	2 à 6 m	Sable marron	24.4	1.60	15	15	

tableau III. Analyse d'échantillons de sol prélèves sur le sondage effectué dans le laboratoire des travaux public sud [LTPS]

## III-1- 3 Mesure des éléments météorologiques

#### III- 1-3-1 Température de l'air

La température de l'air est prise à laide d'un thermomètre digital. Figure 30.

La température a été mesurée en même temps que les autres éléments météorologiques (humidité relative de l'air, l'évaporation et la vitesse du vent).



Figure 30. Thermomètre digital 305 CLE.

# **III 1-3-2 Evaporation potentielle**

L'évaporation est le passage de l'eau de la phase liquide à la phase gazeuse. Lorsque les molécules d'eau qui sont en mouvement permanent possèdent suffisamment d'énergie, elles s'échappent dans l'atmosphère sous forme de vapeur. Selon la synthèse détaillée et complète des études théoriques réalisée par Riou (1975), Brutsaert (1982) et par Pouyaud (1986), ce processus par lequel l'eau liquide est convertie en vapeur (vaporisation) dépend des facteurs climatiques dont:

- L'énergie solaire (source d'énergie pour la vaporisation)

- La température ambiante (agitation moléculaire et capacité de l'air à stocker l'eau)

- L'humidité de l'air (capacité de l'air à stocker l'eau)

 La vitesse du vent (pour la convection, qui permet de remplacer de l'air humide par de l'air plus sec)

C'est par le mouvement des molécules d'eau que débute l'évaporation. A l'intérieur d'une masse d'eau liquide, les molécules vibrent et circulent de manière désordonnée et ce mouvement est lié à la température, plus elle est élevée, plus le mouvement est amplifié et plus l'énergie associée est suffisante pour permettre à certaines molécules de s'échapper et d'entrée dans l'atmosphère.

L'évaporation potentielle qui se rattache selon Thronthwaite à la notion du pouvoir évaporant de l'atmosphère est mesurée sur le site expérimental par un bac d'évaporation classe A de 121cm de diamètre et de 25,5 cm de profondeur, fabriqué en fer galvanisé de 0,79 mm d'épaisseur, situé prés des lysimétres .Figure 31.



Figure 31. Bac class A pour mesurer l'évaporation du plan d'eau à la surface

Les mesures régulières de la variation du niveau de l'eau sont faites à l'aide de la jauge à crochet. Il est aussi à noter que nous recouvrons le bac par un grillage pour empêcher les oiseaux de boire et ainsi fausser les résultats.

La jauge à crochet est une tige graduée de précision, filetée et terminée par un crochet en laiton à pointe recourbée très effilée (figure 32). Une noix taraudée forme vernier de lecture. Elle est commandée par une couronne moletée à la partie supérieure et porte un disque divisé en 40 parties égales. Chaque tour du disque faisant avancer la tige graduée de 2 mm, chacune de ces divisions représente 5/100e de millimètre. Trois tiges cylindriques permettent de poser la jauge sur le bac en les engageant dans trois créneaux ménagés à la partie supérieure d'un puits de mesure.



# Figure 32. Jauge à croche.

Un petit cylindre circulaire de 10 cm de diamètre soudé sur le fond du bac (Figure 33), qui assure la tranquillisation du niveau de l'eau pour permettre une lecture plus précise de la hauteur du plan d'eau quand la surface libre est agitée par le vent.

Deux trous percés à la partie inférieure du puits permettent au niveau d'eau de se mettre en équilibre avec celui du bac.



Figure 33. Jauge à crochet sur le puits de mesure



Figure 34. Niveau d'eau dans le bac

Dans notre station de mesure l'humidité de l'air et la vitesse de vent, vue le manque de matériels de mesure, nous avons opté pour les valeurs enregistrées à la station météorologique situé dans les alentour de notre site expérimental.

#### **III-2** Méthodes

#### III-2 -1 Méthodes de mesure de l'évaporation des lysimétres

La campagne de mesure sur les lysimétres et le bac classe A s'est étalée de janvier 2010 à septembre 2012.

Le lysimétre A est rempli complètement d'eau jusqu'à la surface du sol. Le lysimétre B est rempli jusqu' à une profondeur de 1,55 m.

Les lectures de la profondeur de la nappe dans les lysimétres sont prises au moyen d'une sonde fixée sur un socle stable situé à 50 cm de la surface du sol du lysimétre.

La mesure de l'évaporation dans les lysimétres A et B est établi au moyen d'un bilan d'eau dépourvu des recharges et décharges extérieurs par la relation suivante. :

$$E_n = (H_{t_{i+1}} - H_{t_i}) + P \tag{10}$$

Or :

 $E_n$ : Évaporation de la nappe phréatique dans le lysimétre pendant l'intervalle de temps t<sub>i</sub> et t<sub>i+1</sub>, [mm].

*H*  $t_{i+1}$ : Profondeur final de la nappe phréatique correspondant à la date d'observation  $t_{i+1}$ , [mm].

 $H_{t_i}$ : Profondeur initial de la nappe phréatique correspondant à la date d'observation t<sub>i</sub>, [mm].

*P* : Pluie reçue par le lysimétre durant la période d'observation entre  $t_i$  et  $t_{i+1}$ , [mm].

#### III-2-2 Méthodes de la mesure de l'évaporation potentielle

Nous remplissons le bac d'eau jusqu'à une distance de 5 à 8 cm de son bord supérieur et nous notons la lecture du niveau d'eau indiqué sur la jauge crochet (figure 34), ainsi nous relevons quotidiennement la lecture du niveau d'eau. La différence entre deux lectures représente la valeur réelle de l'évaporation. Cette dernière permet de mesurer les variations de hauteur d'eau avec une résolution de 0.05 mm. La mesure doit être effectuée à intervalles de temps réguliers.

L'évaporation potentielle mesurée par le bac classe A a été comparée à l'évaporation du plan d'eau proposé par (Boutaoutaou D, 1995). Pour les zones arides et semi-arides de l'Algérie), il a proposé de la calculer par la relation 11. Cette dernière est caractérisée essentiellement par, la température, l'humidité de l'air et la vitesse du vent.

$$Eo = 0.403 n D^{0,73} [1 + 0.39V]$$
(11)

Ou:

Eo : évaporation des surfaces libres d'eau, mm;

n : nombre de jours du mois considéré ;

*V* : vitesse du vent, m/s ;

D : déficit de saturation de l'air, mb (millibars), donné par la relation suivante :

$$D = 0.0632 (100 - H) e \ 0.06e^{0.0632t}$$
(12)

*H* : humidité de l'air, % ;

t: température de l'air °C

Les valeurs de l'évaporation potentielles *Eo* calculées par la formule (11) ont été comparé à celle mesurées par le bac d'évaporation classe A.

# III-2-3 Méthode de la résolution du modèle de calcul de l'évaporation de la nappe phréatique

Le modèle physique établi est ajusté au moyen du modèle de Gauss qui est une fonction non linéaire, exprimée par l'équation suivante

$$y = (erfc((h - v)/\beta))/(erf(v/\beta) + 1)$$
(13)

Avec

$$erfc = erf - 1$$
 (14)

Où

y: est la variable dépendante (En/Eo)

*h* : est la variable indépendante (profondeur de la nappe)

 $v \ et \ \beta$  : sont des paramètres à déterminés.

L'analyse d'une telle régression non-linéaire est établie par de nombreux auteurs. Brown AM.2001, Smith S, Lasdon L. 1992, Johnson ML. 1992, Dempster J.1993. Le procédé consiste à faire un ajustement de la courbe résultant des données mesurées. La qualité de l'ajustement est calculée de sorte que la précision de l'ajustement peut être évaluée. La description des données par une fonction est réalisée par le processus itératif (c'est à dire, cyclique) d'une régression non linéaire. Ce procédé réduit au minimum la valeur de la somme au carré de la différence entre les données et l'ajustement
$$ss = \sum_{i=1}^{n} [y - y_{fit}]^{2}$$
 (15)

y est le point de données (mesurées),

y<sub>fit)</sub> est la valeur de la courbe au point y (valeurs ajustées)

ss est la somme des carrés de tous les points de données (mesurées et ajustées).

Pour résoudre le problème par itération nous avons utilises la fonction SOLVER (GRG),(generalized reduced gradient).

La méthode effectuée pour l'analyse de cette régression non linéaire du modèle est décrite en détail dans une feuille de calcul Excel. (Annexe 5).

Chapitre IV Résultats et discussions

## Chapitre IV Résultats et discussions

#### IV-1 Températures de l'air

Durant la campagne de mesure la température moyenne mensuelle a oscillé entre 7°c et 40°c. La période froide a durée cinq mois de novembre jusqu'au mois de mars, la température mensuelle a varié de 7°c à 25°c, la période chaude du mois d'avril jusqu' au mois d'octobre avec une température mensuelle variant entre 25°c et 40 °c. Le tableau IV présente les valeurs de la température de l'air mesurées dans la station expérimentale.

Tableau IV. Valeurs des températures								
mesurées à la station expérimentale								
(2010, 2011, 2012)								
Période	Température							
jour/mois /	Degré Celsius ° C							
Année 2010								
19 jan. au 19 fév.	12,5							
19 fév. au 31 nov.	25,5							
Année 2011								
2 mai. au 12 juin.	15							
12 juin au 8 juil.	29							
8 juil. au 27 juil.	40							
27 juil.au 25 sept.	30							
25 sept. au 22 oct.	30							
22 oct. au 6 déc.	28							
Année 2012								
13fév. au 2 mai.	7,6							
2 mai. au 31 mai.	14							
31 mai. au 31 juil.	28							
31 juil. au 31 août	33							
31 août. au 30 sept.	30							

#### IV-2 vitesses du vent

Les valeurs de la vitesse du vent ont été empruntées à la station météorologique de ouargla. Les vents étaient généralement faibles variant en moyenne entre 0,63 et 4,7 m/s. (tableau VI).

Tableau VI. Vitesse du vent enregistrée durant
la période expérimentale (2010, 2011, 2012)
office national météorologique de Ouargla

#### (ONM)

Période	Vitesse moyenne du vent
jour/mois /	m/s
Année 2010	
19 jan. au 19 fév.	4
19 fév. au 31 nov.	3,9
Année 2011	
2 mai. au 12 juin.	4,70
12 juin au 8 juil.	0,63
8 juil. au 27 juil.	4,20
27 juil.au 25 sept.	1,03
25 sept. au 22 oct.	1,08
22 oct. au 6 déc.	1,23
Année 2012	
13fév. au 2 mai.	4,40
2 mai. au 31 mai.	0,75
31 mai. au 31 juil.	1,39
31 juil. au 31 août	2,87
31 août. au 30 sept.	1,80

Nous remarquons selon les mesures de la vitesse du vent mesurées par l'ONM durant les trois années 2010- 2011- 2012, (tableau VII) que l'année 2011 est celle ou les vents étaient les plus violent, (figure 35).

Tableau VII. Vitesses du vent mensuelle enregistrée durant la période expérimentale(2010, 2011, 2012) office national météorologique de Ouargla (ONM)

m/s													
	Jan	Févr.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Août	Sep	Oct.	Nov.	Déc.	année
	4,1	3,0	3,6	2,7	-	3,8	2,2	-	3,7	2,4	2,1	1,4	2010
	2,8	2,8	3,8	4,4	4,8	4,6	4,2	4,0	3,8	3,5	2,8	2,7	2011
	2	2	1,3	2	2	1,3	3,5	1,5	1,5	1,2	1,4	1,2	2012



#### IV-3 Humidité de l'air

Durant la campagne de mesure, l'humidité relative de l'air (H) a varié entre 41 % et 67%. Avec un taux d'humidité moyen durant la compagne expérimentale juste moyen de 54,74%. (Tableau VIII).

national météorologiq	ue de Ouargla (ONM)
Période	Humidité moyenne de l'air
jour/mois /	%
Année 2010	
19 jan. au 19 fév.	54
19 fév. au 31 nov.	41
Année 2011	
2 mai. au 12 juin.	55
12 juin au 8 juil.	52
8 juil. au 27 juil.	54
27 juil.au 25 sept.	67
25 sept. au 22 oct.	55
22 oct. au 6 déc.	63
Année 2012	
13fév. au 2 mai.	58,7
2 mai. au 31 mai.	62
31 mai. au 31 juil.	48
31 juil. au 31 août	52,04
31 août. au 30 sept.	49,85

Tableau VIII. Humidité relative de l'air enregistrée duran la période expérimentale (2010, 2011, 2012) office

#### **IV-4 Précipitations**

Durant la campagne de mesure dans la zone aride de Ouargla les précipitations annuelles ont été très faibles voir insignifiantes (tableau IX) leur répartition étant marquée par une sécheresse quasi absolue, du mois de janvier jusqu'au mois de novembre avec un maximum au mois décembre de 7 mm (Tableau IX). Le diagramme ombrothermique de Bagnoul F et Gaussen H, 1953, (figure 36) montre que la période de sécheresse de trois années d'observations de 2010 à 2012 s'étale sur toute l'année. Nous concluons que les précipitations n'avaient aucune influence sur la mesure de l'évaporation des eaux de la nappe et du plan d'eau.

Tableau IX. Précipitations mensuelle enregistrée durant la période expérimentale(2010, 2011, 2012) office national météorologique de Ouargla (ONM)

						mm						
 Jan	Févr.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Août	Sep	Oct.	Nov.	Déc.	Année
3,2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4,1	2010
1,4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7	2011
1,4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1,1	2012



Figure 36. Diagramme Ombrothermique de la région d'Ouargla durant trois ans (2010 à 2012)

#### **IV-5** Evaporation potentielles *Eo*

L'évaporation du plan d'eau est étroitement liée à la température de l'air. On remarque que lorsque la température à atteint une valeur de 40 degré Celsius l'évaporation du bac à augmenté considérablement. (Tableau X).

Les valeurs de l'évaporation potentielles *Eo* calculées par la formule (11) ne diffèrent pas beaucoup à celles mesurées par le bac d'évaporation classe A, avec une erreur moyenne de 7,4% (figure 37). Cette formule montre bien que l'évaporation potentielle dépend des paramètres climatiques à savoir la température, l'humidité de l'air et la vitesse du vent. (Tableau XI).

Période	Nombres de jours	Température Moyenne	Evaporation Mesurée par bac		
jour/mois /	n	Degré Celsius ° C	mm/j		
Année 2010					
19 jan. au 19 fév.	31	12,5	5,0		
19 fév. au 31 nov.	284	25,5	7,9		
Année 2011					
2 mai. au 12 juin.	41	15	4,7		
12 juin au 8 juil.	26	29	3,7		
8 juil. au 27 juil.	20	40	15,2		
27 juil.au 25 sept.	60	30	3,7		
25 sept. au 22 oct.	28	30	4,5		
22 oct. au 6 déc.	45	28	3,7		
Année 2012					
13fév. au 2 mai.	80	7,6	3,2		
2 mai. au 31 mai.	31	14	1,7		
31 mai. au 31 juil.	66	28	5,0		
31 juil. au 31 août	34	33	6,7		
31 août. au 30 sept.	31	30	6,1		

# Tableau X. Comparaison entre l'évaporation potentielleet la température

Nous présentons également dans le tableau XI, la comparaison entre les valeurs de l'évaporation du plan d'eau mesurée et calculée par l'équation (11) correspondant aux différentes périodes de mesure.

Période	Nombres de jours	Température moyenne	Vitesse moyenne du vent	Humidité de l'air,	déficit de saturation de l'air	Evaporation mesurée par bac	Evaporation potentielle calculée avec l'équation 11	Erreur Δ
jour/mois /	n	Degré Celsius °C	m/s	%	mb	mm	mm	%
Année 2010								
19 jan. au 19 fév.	31	12,5	4	54	88	155	124	-24,9
19 fév. au 31 nov.	284	25,5	3,9	41	50	2231	2446	8,8
Année 2011								
2 mai. au 12 juin.	41	15	4,70	55	92	193	178	3,80
12 juin au 8 juil.	26	29	0,63	52	81	96	112	14,20
8 juil. au 27 juil.	20	40	4,20	54	88	303	293	-3,30
27 juil.au 25 sept.	60	30	1,03	67	144	221	231	4,50
25 sept. au 22 oct.	28	30	1,08	55	92	126	137	8 ,20
22 oct. au 6 déc.	45	28	1,23	63	125	168	182	7,50
Année 2012								
13fév. au 2 mai.	80	7,6	4,40	58,7	107	254	250	-1,40
2 mai. au 31 mai.	31	14	0,75	62	121	53,2	58	8,28
31 mai. au 31 juil.	66	28	1,39	48	68	331,6	356	6,80
31 juil. au 31 août	34	33	2,87	52,04	81	229	212	-8,30
31 août. au 30 sept	31	30	1,80	49,85	74	190	197	3,50

### Tableau XI. Comparaison entre l'évaporation potentielle mesurée et calculée

La comparaison montre une bonne adéquation entre l'évaporation mesurée et calculée par la relation 11, avec absence d'erreurs systématiques, (figure 37).



Figure 37. Comparaison entre l'évaporation potentielle mesurée et calculée

#### IV-6 Evaporation de la nappe phréatique

L'évaporation de la nappe sera exprimée par la relation suivante:

$$E_n = \left(H_{t_{i+1}} - H_{t_i}\right) \tag{16}$$

 $E_n$ : Évaporation de la nappe phréatique dans le lysimétre pendant l'intervalle de temps t<sub>i</sub> et t<sub>i+1</sub>, [mm].

 $H_{t_{i+1}}$ : Profondeur final de la nappe phréatique correspondant à la date d'observation  $t_{i+1}$ , [mm].

 $H_{t_i}$ : Profondeur initial de la nappe phréatique correspondant à la date d'observation t<sub>i</sub>, [mm].

Durant la période chaude de la campagne de mesure qui a duré 126 jours entre le 15 juin et le 20 octobre 2012, il a été constaté que l'évaporation du plan d'eau dans le bac classe A était très importante (748,6 mm), alors que l'évaporation de la nappe dans le lysimétre A était seulement (126 mm) soit 17% de l'évaporation du plan d'eau à la surface.

Concernant la période froide qui à durée 118 jours entre le 6 décembre 2011 et le 30 mars 2012, l'évaporation dans le bac classe A a été de 385,5 mm, alors que l'évaporation dans le lysimétre A était importante et égale à 161 mm soit 42% de l'évaporation du plan d'eau à la surface. (Tableau XII).

Tableau XII. Comparaison entre l'évaporation de la nappe phréatique dans les lysimétres en périodefroide et chaude durant la période d'observation

Période	Evapo dans clas	oration le bac se A	Nombre	Profondeur de la nappe		Evaporation de la nappe dans le lysimétre En		Rapport entre		
jour/mois /année	<i>Eo</i> mm / périod e	Eo (mm/j)	de jours	initiale (m)	Finale (m)	En (mm / période	En (mm/j)	En/Eo (%)		
Lysimetre A										
6 déc.2011 au 30 mar. 2012	385,5	3,3	118	1,015	1,176	161	1,4	42		
15 juin au 20oct. 2012	748,6	5,94	126	1,254	1,38	126	1	17		
Lysimetre B										
19 Jan au 19 Fév. 2010	155	5	31	1,55	1,555	5	0,16	32		
19 Fév. au 30 Nov. 2010	2231	7,44	284	1,555	1,625	70	0,26	31		

La comparaison entre ces deux campagnes de mesure dans les différentes périodes montre une nette différence entre l'évaporation du plan d'eau mesuré dans la période froide (3,3 mm/j) et celle mesuré en période chaude (5,98 mm/j).Cela s'explique par l'influence des conditions climatiques très sévères sur l'effet du pouvoir évaporant de l'atmosphère au cours de la période chaude.

Par contre l'évaporation de la nappe phréatique dépend de sa position par apport au niveau du sol et du pouvoir évaporant de l'atmosphère. L'évaporation de la nappe diminue lorsque cette dernière s'éloigne de la surface du sol (figure 38).

Effectivement en période froide, la profondeur de la nappe qui était à environ de 1 m a fourni une hauteur d'eau évaporée de 161 mm soit 1,4 mm/j, ce qui représente un taux de 42% de l'évaporation du plan d'eau.

En période chaude la profondeur du niveau d'eau dans le lysimétre A qui était à environ 1,3 m a donné une évaporation de 126 mm soit 1 mm/j, ce qui représente un taux de 17% de l'évaporation du plan d'eau.

Ce même régime est observé dans le lysimétre B. Pendant la période froide de19 janvier au 19 février 2010 la profondeur du niveau d'eau dans ce lysimétre qui était à 1,55 m a donné une évaporation de 5 mm soit 0,16 mm/j représentant un taux de 32% de l'évaporation du plan d'eau.

De même, pour la période du 19 février au 30 novembre2010, la profondeur du niveau d'eau dans ce lysimétre qui était à 1,59 m a donné une évaporation de 70 mm soit 0,26 mm/j, ce qui représente un taux de 31% de l'évaporation du plan d'eau à la surface.



Figure 38.Relation entre l'évaporation de la nappe, sa profondeur et l'évaporation potentielle

#### IV-7 Modélisation de l'évaporation de la nappe phréatique

Les données de mesures de l'évaporation de la nappe en différentes profondeurs dans les lysimétres A et B et l'évaporation du plan d'eau du bac classe A, présentées dans le tableau XII et tableau XIII, permettent de représenter la distribution du nuage des points entre En/Eo (rapport entre l'évaporation de la nappe et l'évaporation du plan d'eau) et h

(profondeur de la nappe) (figure 39). En comparant Cette distribution des points à celle qui a été obtenue par (Khatchatourian V, 1982), dans 9 régions d'étude (Bledroze, Chinafia, Kef chenafia, Le bas relace, Amra, Bouble djila, 7-30 juillet, Dalmag, Elvagma), nous pouvons remarquer que l'allure des nuages de points suit la même trajectoire. (Figure 40)



Rapport entre l'évaporation de la nappe et l'évaporation du plan d'eau  $E_{\text{n}}/E_{0}$ 

Figure 39. Nuage de points de l'évaporation mesurée année 2010-2011-2012



La relation entre l'évaporation de la nappe phréatique En, l'évaporation potentielle Eo et la profondeur de la nappe h (figure 41) permet d'établir un modèle sur la base de l'analyse d'interaction de ces caractéristiques.

L'évaporation de la nappe phréatique *En* est égale à l'évaporation du plan d'eau *Eo* dans la couche située entre 0 et 0,5 *m*. C'est-à-dire (*En* / *Eo*)  $\rightarrow$  1.

- l'évaporation de la nappe *En* décroît jusqu'à 50% par rapport à l'évaporation du plan d'eau *Eo* dans la couche située entre 1,0 *m* et 1,15 *m*.

- à une profondeur de 1,5 m, le rapport de En/Eo est inferieur à10%.

- au delà de 1,6 m, le rapport En/Eo devient négligeable.

- l'évaporation de la nappe tend vers zéro( $En \rightarrow 0$ ) à une profondeur proche de 1,7 *mètres*,

appelée profondeur critique. Cette dernière correspond à une profondeur pour laquelle l'évaporation fourni un faible dépôt de sels solubles dans le sol. (Averianov SF1978), Choumakov BB, Beznina S.A 1989), (Pachkovski I.C1988), (Katz DM 1981).



Rapport entre l'évaporation de la nappe et l'évaporation du plan d'eau En/Eo

Figure 41. Courbe ajusté à l'évaporation mesurée année 2010-2011-2012

Le modèle établi est une fonction non linéaire de type modèle de Gauss exprimé par la relation 17.

$$En/Eo = (erfc((h-1.025)/0.405))/(erf(1.025/0.405) + 1)$$
(17)

Où

y : est la variable dépendante (*En/Eo*)

*h* : est la variable indépendante (profondeur de la nappe)

*V* et  $\beta$  : sont des paramètres à déterminés.

La valeur optimal de v et  $\beta$  sont respectivement 1,025 et0,405, la valeur maximale de R<sup>2</sup> est de 96,1 % et l'erreur *SE* est de 0.5%.

	Vombre de Profondeur jours de la nappe dans le Lysimétre A		Profondeur de la nappe dans le Lysimétre A		dans le lysimétre A En	Entre En/Eo mesuré	Entre En/Eo
		initial	finale	mm	mm		calculé
	Ŧ						
<u>Année 2011</u>	J	mm	mm	m	mm	-	-
Annet 2011							
2mai. au 12jui.	41	0	0,2	193	200	1,0363	1,000
Pjui. au 8 juil.	26	0,2	0,3	96	100	1,0417	0,998
8 juil. au 27 juil.	19	0,3	0,6	303	300	0,9901	0,994
27 juil.au 25sept.	60	0,6	0,805	221	205	0,9276	0,931
25sept. au 22 oct.	27	0,805	0,91	126	105	0,833	0,779
22 oct. au 6 déc.	45	0,91	1,015	157	105	0,669	0,656
Année 2012							
6 déc.2011 au 11 ian	16	1.015	1.045	55	30	0.5455	0.514
11 jan.au 31jan	21	1.045	1,075	63	30	0.4762	0.472
31 jan. au 13fév.	28	1.075	1,124	113	49	0.4336	0.431
13fév. au 21fév.	16	1,124	1.142	49	18	0.3673	0.365
21 fev. au 1 mar.	8	1.142	1,149	20.5	7	0.3415	0.341
1 mars au15mar.	14	1.149	1.158	28	9	0.3214	0.333
15 mar.au 23mar.	8	1,158	1,172	44	14	0.3182	0.321
23mar. au 30 mar.	7	1,172	1,176	13	4	0.3077	0.304
30 mar. au 11 av.	12	1.176	1.182	21	6	0.2857	0.299
11 av. au 17 av.	6	1.182	1,184	7.6	2	0.2632	0.292
17av. au 28av.	11	1,184	1.19	21	6	0.2857	0.289
28Av. au 2 mai.	4	1.19	1.204	50	14	0.2800	0.282
2mai au15 mai.	13	1.204	1.212	31.2	8	0.2564	0.266
15 mai, au 31mai.	16	1.212	1.217	22	5	0.2270	0.257
31 mai, au 6 iuin.	6	1.217	1.238	86.4	21	0.2431	0.251
6 jui.au 15 juin.	9	1.238	1.254	74	16	0.2162	0.229
15juin. au 21 juin.	6	1.254	1.262	36	8	0.2222	0.212
(21juin au26 juin.	5	1,262	1,268	30	6	0,2000	0,204
26 Juin. au 31 Juil.	35	1.268	1.289	105.2	21	0.1996	0.198
31Juil. au 07Août	7	1.289	1.296	40	7	0.1750	0.178
7 août au17 août	10	1,296	1.31	82	14	0,1707	0,172
17 août au20 août	3	1,31	1,313	20	3	0,1500	0,160
20a août au28oût	8	1,313	1,322	67	9	0,1343	0,157
28 août au31août.	3	1,322	1,325	20	3	0,1500	0,150
31août. au 30sept.	30	1,325	1,363	190	38	0,2000	0,148
30 sept. au 6oct.	6	1,363	1,368	41	5	0,1220	0,119
06 oct. au 13oct.	7	1,368	1,375	60.4	7	0,1159	0,116
13 oct. au 20 oct.	6	1,375	1,380	44	5	0,1136	0,111

Tableau XIII. Résultat de l'évaporation de la nappe phréatique dans le Lysimétre A

année 2011/2012

			Prof	fondeur	Evaporation de	Rapport entre	Rapport entre	
Période	Nombre de	Evaporation	de la n	appe dans	la nappe dans	En/Eo	En/Eo	
jour/mois /année	mois /année jours dans le bac	c le		le		le	mesuré	calculé
-	-	classe A	lysimétre		lysimétre B			
		Ео	В		En			
		(mm par	initiale	Finale	(mm par jours)			
		jours)	m	m				
19 Jan au 19 Fév. 2010	31	155	1,550	1,555	5	0,032	0,033	
19 Fév. au 30 Nov. 2010	284	2231	1,555	1,625	70	0,031	0,031	
30 Nov au 28 Dec 2010	28	255	1,625	1,63	5	0,0196	0,018	

Tableau XIV. Résultat de l'évaporation de la nappe phréatique dans le lysimétre B

année 2010

#### **IV-8** Validation du modèle de calcul de l'évaporation de la nappe phréatique

Les valeurs du rapport En/Eo calculées par l'équation 17 ont été comparés a ceux mesurées au moyen des deux lysimetres A et B. Le détail de comparaison est présenté dans le tableau XIII qui concerne le lysimétre A et dans le tableau XIV, concernant le lysimétre B .La comparaison montre que les valeurs de l'évaporation calculées sont proches aux valeurs de l'évaporation mesurées .Nous remarquons dans ces deux tableaux que les périodes humides et sèches n'intervient pas dans le calcul de l'évaporation de la nappe phréatique par le modèle 17. La forte corrélation entre les valeurs de l'évaporation de la nappe calculées et mesurées qui est traduit par un fort coefficient de corrélation R<sup>2</sup> est de 96,1 % permet de conclure que le modèle de calcul fournit des résultats acceptable avec des écarts ne dépassant pas  $\pm 0.5\%$ .

#### IV-9 Abaque de calcul de l'évaporation de la nappe phréatique

La connaissance du rabattement du niveau de la nappe phréatique est une condition primordiale dans la mise en valeurs des terres, surtout en zones semi-aride et aride.

Les mesures effectuées sur les lysimétres, montrent que l'évaporation de la nappe phréatique dépend directement de l'évaporation potentielle pour la profondeur située entre 0 et 0,5 m. Au delà de cette profondeur, l'évaporation de la nappe diminue (figure 42). Nous remarquons que lorsque le niveau de la nappe atteint la profondeur de 1,5 m l'évaporation devient négligeable.



Figure 42. Evaporation de la nappe phréatique en fonction de sa profondeur (h) et l'évaporation potentielle

Les données mesurée au moyen des lysimétres et du bac classe A nous ont permis d'établir un abaque qui détermine l'évaporation de la nappe phréatique en fonction de l'évaporation potentielle pour 4 intervalles de profondeur (figure 43).



Figure 43. Abaque pour déterminer l'évaporation mensuelle de la nappe phréatique en fonction de sa profondeur (h)

L'évaporation de la nappe est égale à l'évaporation potentielle lorsque sa profondeur est inférieure ou égale à  $0.5 m : (h \le 0.5 m)$ .

Pour une même valeur de l'évaporation potentielle, existe plusieurs valeurs de l'évaporation de la nappe en fonction de sa profondeur.

Pour un même intervalle de variation de profondeur, l'évaporation de la nappe phréatique croit avec la croissance de l'évaporation potentielle.

Pour des profondeurs supérieures à 1,5 m, l'évaporation de la nappe devient négligeable.

A fin de vérifier la validité de l'abaque, les valeurs de l'évaporation de la nappe phréatique déterminées par ce dernier ont été comparées à celles mesurées par les lysimétres. Dans la majorité des cas, les valeurs calculées et observées sont proches entre elles avec un coefficient de corrélation de 0,9. (Figure 44).



Figure 44. Comparaison entre l'évaporation de la nappe phéatique mesurée et déterminée par l'abaque

Les résultats de comparaison entre l'évaporation de la nappe phréatique mesurées et déterminées par l'abaque sont récapitulés dans le tableau XV.

Période jour/mois /année	Nombres de jours	Profondeur de la nappe dans le Lysimétre		Evaporation dans le bac classe A	Evaporation de la nappe mesurée	Evaporation de la nappe Déterminée par l'abaque	Erreur
	_	initial	finale			II	
				Eo	En	En	
	j	m	m	mm	mm	mm	%
Année 2010							
19 jan au 19 fév.	31	1,550	1,555	155	5	5	0
19 fév. au 30 nov.	284	1,555	1,625	2231	70	69	-1
Année 2011							
2mai. au 12jui.	41	0	0,2	193	200	193	-4
12jui. au 8 juil.	26	0,2	0,3	96	100	96	-4
8 juil. au 27 juil.	19	0,3	0,6	303	300	303	1
27 juil.au 25sept.	60	0,6	0,805	221	205	183	-12
25sept. au 22 oct.	27	0,805	0,91	126	105	105	0
22 oct. au 6 déc.	45	0,91	1,015	157	105	130	19
Année 2012							
15 mai. au 31mai.	17	1,212	1,217	22	5	4	-19
31 mai. au 6 juin.	7	1,217	1,238	86,4	21	17	-27
6 jui.au 15 juin.	10	1,238	1,254	74	16	14	-13
15juin. au 21 juin.	7	1,254	1,262	36	8	7	-16
21juin au26 juin.	6	1,262	1,268	30	6	6	0
26 Juin. au 31Juil.	36	1,268	1,289	105,2	21	20	-5
31Juil. au 07Août	8	1,289	1,296	40	7	8	8
7 août au17 août	11	1,296	1,31	82	14	16	11
17aout au31 aout	15	1,31	1,325	107	15	20	27
31août. au 30sept.	31	1,325	1,363	190	38	36	-5

# Tableau XV. Comparaison entre les valeurs de l'évaporation de la nappe phréatique, mesurées et calculées par l'abaque

Nous avons jugé intéressant de comparer les valeurs de l'évaporation de la nappe phréatique, calculée par le modèle (17) et les valeurs de l'évaporation, determinés par l'abaque donnée dans la figure 43.

Les résultats de comparaison entre l'évaporation de la nappe phréatique déterminée par l'abaque et calculée par le modèle sont récapitulés dans le tableau XVI.

La comparaison montre que les deux valeurs sont proches avec des écarts très réduits.

Période jour/mois /année	Nombres de jours	Profondeur de la nappe dans le Lysimétre		Evaporation dans le bac classe A	Evaporation de la nappe calculé par le modèle	Evaporation de la nappe Déterminée par l'abaque
		initial	finale		physique	
				Eo	En	En
	j	m	m		mm	mm
Année 2010						
19 jan au 19 fév.	31	1,550	1,555	155	5	5
19 fév. au 30 nov.	284	1,555	1,625	2231	70	69
Année 2011						
2mai. au 12jui.	41	0	0,2	193	193	193
12jui. au 8 juil.	26	0,2	0,3	96	96	96
8 juil. au 27 juil.	19	0,3	0,6	303	301	303
27 juil.au 25sept.	60	0,6	0,805	221	206	183
25sept. au 22 oct.	27	0,805	0,91	126	98	105
22 oct. au 6 nov.	45	0,91	1,015	157	103	130
Année 2012						
15 mai. au 31mai.	17	1,212	1,217	22	5,65	4
31 mai. au 6 juin.	7	1,217	1,238	86,4	22	17
6 jui.au 15 juin.	10	1,238	1,254	74	17	14
15juin. au 21 juin.	7	1,254	1,262	36	7,6	7
21juin au26 juin.	6	1,262	1,268	30	6	6
26 Juin. au 31Juil.	36	1,268	1,289	105,2	21	20
31Juil. au 07Août	8	1,289	1,296	40	7	8
7 août au17 août	11	1,296	1,31	82	14	16

### Tableau XVI. Comparaison entre les valeurs de l'évaporation de la nappe phréatique

calculées par l'abaque et le modèle physique

#### IV-10 Comparaison avec d'autres résultats obtenus antérieurement

Les résultats obtenus dans d'autres études antérieures réalisées sous climats à forte évaporation telles que les études Allison et Barnes, 1985 ; Colin et Kackzala, 1986; Christmann et Sonntag, 1987; Grunberger 1989 et Woods, 1990 montrent que la répartition de l'évaporation de la nappe se répartisse en deux zones principales :

1 - lorsque la nappe est proche de la surface du sol, l'évaporation est maximale.

2 - lorsque la nappe s'éloigne du sol, l'évaporation diminue.

Les résultats obtenus dans la zones aride de ouargla à texture sableuse confirme cette répartition. Cependant, ces études antérieures ne précisent pas les valeurs de l'évaporation de la nappe quand elle est très proche du sol qui est très importante dans l'étude des bilans hydriques et des sels. En se référant à (Taupin. D et al 1990), l'évaporation de la nappe située dans la première zone dépend des conditions climatiques et de la texture du sol. Nos résultats, montre

que pour une profondeur de nappe jusqu'à environ 0,5 m, l'évaporation est très importante et égale à l'évaporation potentielle. Cette couche est exposée à une évaporation directe. On peut déduire que seuls les paramètres climatiques interviennent dans cette tranche.

Par contre (Gouvéa, 1980) avait bien constaté que plus la nappe était superficielle (profondeur < 20cm), plus l'effet des paramètres climatiques étaient important sur l'évaporation de la nappe. Au delà de 1,5 m, le taux d'évaporation diminue fortement. Selon (Coudrain R 1997), l'évaporation de la nappe dans cette zone dépend seulement de la profondeur.

#### **IV-11 Conclusion**

La profondeur de la surface d'eau d'une nappe libre joue un rôle essentiel sur la capacité de cette dernière à emmagasiner de l'énergie. D'une manière générale, la différence essentielle entre une surface d'eau libre peu profonde et une surface d'eau libre profonde réside dans la sensibilité de la première aux variations climatiques saisonnières. Il s'ensuit qu'une surface d'eau libre peu profonde sera sensible aux variations météorologiques selon la saison, tandis qu'une surface d'eau libre profonde, de par son inertie thermique, présentera une réponse évaporative nettement différente.

L'amélioration et la stabilisation des rendements des cultures pratiquées dans les régions arides et semi-arides ne peuvent avoir lieu que si la nappe phréatique minéralisée est maintenue (drainées) à une profondeur égale 1,5 m. l'évaporation de la nappe à ce niveau constituée 3% de l'évaporation potentielle

Cette profondeur selon Averianov S, 1978, Choumakov B, Beznina S, 1989, Pachkovski I 1988, Katz D, 1981 correspond au niveau de la nappe pour lequel l'évaporation fourni un faible dépôt de sels solubles dans le sol.

A l'exposé, un cumul de sels solubles très remarqué s'effectuera dans la tranche racinaire de sol de 0 à 1 m lorsque la profondeur de la nappe minéralisée se situe à une profondeur inferieure à 0,5 m. L'évaporation de la nappe dans cette tranche est maximale et est égale à l'évaporation potentielle, seuls donc les paramètres climatiques interviennent dans cette tranche.

Il est possible d'utiliser l'abaque établi pour évaluer l'évaporation de la nappe phréatique en fonction de sa profondeur et de l'évaporation potentielle dans d'autres régions arides et semiarides à texture sableuse dans les études préliminaires, tel qu'une mise en valeurs des terres.

Les résultats obtenus nous ont permis d'établir aussi une relation empirique reliant l'évaporation de la nappe phréatique, à sa profondeur et le pouvoir évaporant de l'atmosphère dans les conditions climatique de la zone aride de Ouargla.

#### **Conclusion générale**

Le Sahara couvre une grande partie de l'Algérie, le Tchad, l'Egypte, la Libye, le Mali, la Mauritanie, le Maroc, le Niger, le Sahara occidental, le Soudan et la Tunisie avec 8 millions de kilomètres carrés ,il est le plus grand désert chaud de la planète terre, son rude climat est caractérise par des précipitations faibles, peu fiables et très irrégulière, de valeurs de durée d'ensoleillement extrêmement élevé, de températures élevées toute l'année , une variation de température diurne significative et des niveaux de l'évaporation potentielle extrêmement élevés. Selon plusieurs chercheurs La précision exceptionnelle sur l'information du processus de désertification a son importance dans le contexte actuel. Non seulement parce que ce scénario peut être très instructif pour l'avenir, mais aussi parce que plusieurs climatologues ont déjà intégré le scénario d'une désertification accélérée du Sahara dans leurs modèles, comme le déplore Stefan Kröpelin, en démontrant que la destruction du couvert végétal a été très progressive.

Si le Sahara algérien est aride, son sous sol regorge d'eau selon des chercheurs britanniques chercheurs du British Géologique Survey et de l'Université Collège de Londres(2012), les plus gros volumes d'eaux souterraines se trouvent dans les grands aquifères sédimentaires dans les pays de l'Afrique du nord. L'Algérie, le Soudan, l'Égypte et le Tchad ont les plus grandes réserves d'eau souterraine. Malheureusement ce potentiel d'eau est irrationnellement exploité pour l'irrigation.

Le problème de remontée des eaux au niveau de la région de ouargla trouve principalement sa cause dans l'utilisation abusive des eaux pour les besoins d'irrigation par le biais de techniques inadaptées, en matière d'aménagement et de gestion de ces milieux, et par le manque de capacités institutionnelles et socio-institutionnelles pour les gérer durablement. L'aridité ne représente pas le seul facteur qui provoque la désertification du milieu mais l'homme à une grande part dans la contribution à la dégradation des oasis.

En présence d'une nappe phréatique salée est proche du sol, le problème de la salinité des sols est aggravé par les températures élevées.

On peut conclure que le régime hydro salin de la nappe phréatique se forme donc sous l'influence de deux facteurs, La quantité d'eau à fournir par l'irrigation et le fonctionnement des drains et la salinité des sols est provoquée par l'influence de deux paramètres, la présence de cette nappe proche du sol et la forte l'évapotranspiration.

Pour mieux prévoir et gérer le risque de la salinité des terres irriguées dans les zones arides et semi- arides, il est primordial d'étudier le phénomène de l'évaporation de la nappe phréatique qui joue un rôle important dans le processus de salinisation des sols.

Le site d'étude est localisé dans la zone expérimentale de l'université de Ouargla. A l'intérieur de cette zone il a été implanté deux lysimétres qui ont été exploités pour mesurer l'évaporation souterraine. L'évaporation potentielle (climatique) a été mesurée par le bac classe A, situé proche des deux lysimétres. Les paramètres climatiques les plus influençant sur l'évaporation potentielle tels que la température, l'humidité de l'air et la vitesse du vent ont été également mesurées.

La compagne de mesures de l'évaporation souterraine au moyen des lysimétres, de l'évaporation potentielle par le bac classe A, des éléments météorologiques (température, humidité de l'air et la vitesse de vent) s'est étalée de 2010 à 2012.

L'analyse des données de mesure montre que, l'évaporation de la nappe phréatique est égale à l'évaporation potentielle dans la couche du sol 0-0,5 m. L'évaporation décroit jusqu'à 50% par rapport à l'évaporation potentielle dans la couche 1- 1,15 m du sol. Elle est de l'ordre de 10 % à une profondeur égale à 1,5 m du sol. Au delà de 1,6 m elle devient négligeable. L'évaporation de la nappe tend vers zéro à la profondeur proche de 1,7 m.

Les données de mesure collectées nous ont permis de relier trois caractéristiques importantes qui sont l'évaporation de la nappe, l'évaporation potentielle et la profondeur de la nappe au moyen d'un modèle de type de Gauss.

L'analyse de ces trois caractéristiques nous ont permis également de proposer un abaque de détermination de l'évaporation de la nappe phréatique en absence ou en présence de peut de donnés.

Les valeurs de l'évaporation de la nappe phréatique calculées soit par le modèle proposé soit par l'abaque ne différent pas sensiblement des valeurs de la nappe de l'évaporation mesurées. Les coefficients de corrélation entre les valeurs calculées et mesurées varient entre 98 % et 99 %, l'écart ne dépasse pas 0,5 % et 2 %.

Pour les sols à texture sableuse des zones arides et semi – arides de l'Algérie, nous recommandons de maintenir et drainer la nappe phréatique à une profondeur supérieur ou égale à 1,7 m de la surface du sol afin d'éviter les dépôts de sels dans les couches végétatives des sols.

Au fur et à mesure de la collecte de données, la méthodologie établie peut être revue et corrigée.

Perspectives

-Approfondir l'analyse et l'étude des paramétrés de drainage, l'évaporation de la nappe , profondeur de la nappe et l'évaporation potentielle pour d'autres textures des sols.

-Déterminer la profondeur critique : profondeur pour laquelle l'évaporation de la nappe est négligeable et par conséquent un faible dépôt de sel dans les couches radiculaires en fonction des différentes salinités de la nappe phréatique.

-Etudier le drainage biologique (l'Eucalyptus par exemple) pour diminuer la remontée de la nappe phréatique et par conséquent éviter les dépôts de sels.

•

# REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1- Allison, G. B et Barnes C. J, (1985).Estimation of evaporation from the normally "dry" Lake Frome in South Australia. *Journal of hydrology*. 78.229-242. *Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam - Printed in the Netherlands*.

<u>ftp://snowserver.colorado.edu/pub/fromAdrian/MPB\_Water\_Balance/EvapEstimate/Backgroun</u> <u>d/BarnesAllison1985.pdf</u>

2- Article 85. Loi de finances, (1998). Développement de l'agriculture saharienne, a institué le Fonds Spécial pour le Développement des Régions du Sud).

3- Aranyossy, J. F. (1978). Contribution à l'étude des transferts d'eau et de solutés dans la zone non saturée par traçage cationique et isotopique. *Thèse de 3eme cycle, Univ. Paris VI, 132 p* <u>https://books.google.dz/books/about/Contribution\_%C3%A0\_1\_%C3%A9tude\_des\_transferts.h</u> <u>tml?id=Qu-5MgEACAAJ&redir\_esc=y</u>

4- Averianov S.F, (1978). борьба с засолением орощаемых земель.: М.Колос. 288 с. Lutte contre la salinisation des terres irriguées. Ed. Kolos. Moscou, 288c.

5- Bagnoul F et Gaussen H, (1953). Saison sèche et indice xérothermique, *Bull. Soc. Hist. Nat*, Toulouse, 88, 193 – 239.

http://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k65553345/f4.image (1AVR2015)

6- Barbiero L., (1992). Aspects géochimiques de l'alcalinisation des sols dans la vallée du Dallol, Bosso (Niger). *Cah. ORSTOM, série Pédol, Vol XXVII, 143, 152.* 

7- Barnes, C.J. and Allison, G.B., 1983. The distribution of deuterium and 180 in dry soils, 1. *Theory. J of hydrol. 60, 41-156.* 

8- Ben Hassine H., Ben Hassine T. et Ben Ammar A., 1981 - Evolution saisonnière et variation interannuelle de la salure du sol dans la basse vallée de la Mejerda. ES 193, Direction des Sols, Ministère de l'Agriculture, Tunisie, 22 pages.

9- British Geological Survey et de l'University College de Londres) – (20/04/2012) <u>http://www.alterinfo.net/notes/Une-reserve-d-eau-potable-decouverte-sous-l-</u> <u>Afrique\_b4113359.html</u> 10- Boutaoutaou D, 1995]. Evaporation des surfaces d'eau libres des retenues et barrages en Algérie. *Thèse doctorat d'Etat*. Université de l'Environnement de Moscou.

http://dspace.univ-ouargla.dz/jspui/bitstream/123456789/3275/1/BOUTOUTAOU%20D.pdf

11- Brown A.M, (2001). Step by step. *Guide to non-linear regression analysis of experimental data using a Microsoft Excel spreadsheet*. Comp. Meth. Prog. Biomed, 65 (3), 191–200.

12- BRUTSAERT W, (1982). Evaporation into the atmosphere. *Kluwer académie Publisher*, 299p.

13- Chamayou H. et Legros J.P., 1989. Les bases physiques, chimiques et minéralogiques de la science du sol. *ACCCT, Presses universitaires de France, 593 pages.* 6- Choumakov B, Beznina S, (1989). Les aspects écologiques du développement de la mise en valeur des terres. *Journal mise en valeur des terres* N<sup>0</sup>5, 2 à 4.

14- Christmann D et Sonntag C, (1987). Groundwater evaporation from East-Saharian depressions by means of deuterium and oxygen 18 in soil moisture. Dans: *Proceedings IAEA International Symposium on Use of Isotope Technique for Water Resource Development*, 189-204.IAEA-SM-299/037, Vienna.

https://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig\_q=RN:19054620

15- Colin-Kackzala C, (1986). Profils isotopiques (O et *ni*) de fluides (eau liquide, vapeur et co<sub>2</sub>) de la zone non saturée sous climat désertique: *application à l'évaluation de l'évaporation des nappes libres au sahara Nord- occidental. Thèse de doctorat en sciences*, université Paris Sud, Orsay.

16- Cornet A, (1964). Introduction à l'hydrologie saharienne *.Revue de Géo Dyn.* Paris. Masson, vol VI ,5-72.

17- Cosandey Claude, Robinson Mark, (2000). Hydrologie continentale, *Ed Armand Collin*, coll. U, 368p.

18- Coudrain Anne, *et* al, (1997). Bilan et évaporation d'un aquifère en zone aride, Altiplano central bolivien. *Hydrochemistry* Proceedings of the Rabat Symposium, April 1997 IAHS. Pub numéros 244.

19- Coudrain A et al, 1998]. L'évaporation des nappes phréatiques sous climat aride est-elle indépendante de la nature du sol ? *Comptes rendus de l'académie des Sciences série 2a : Sciences de la Terre et des planètes*, 326 (3), pp. 159-165. < 10.1016/S1251- 8050(00) 89030-8>. < Ird - 00200744 >.

http://hal.upmc.fr/file/index/docid/200744/filename/1998-Coudrain-CRAS-EvapNap.pdf

20- Coudrain Anne, Fourcade Benoit & Jaoudat Touma, (2003). Flux évaporatoire depuis les nappes phréatiques en région aride. Hydrology of the mediterraneam and semiarid régions Proceedings of an international symposium held at Monpellier April 2003 IAHS Publ.no. 278

21- Coudrain Anne et al, (2007). L'évaporation des nappes phréatiques sous climat aride estelle indépendante de la nature du sol ? *Comptes rendus de l'académie des Sciences série 2a : Sciences de la Terre et des planètes*, 1998, 326 (3), pp.159-165. < 10.1016/S1251-8050(00)89030-8>. < ird-00200744 >.

22- Daniel Hillel, (1974). L'eau et le sol. Principes et processus physiques. Vander 288p, 88

23- Daoud Dahmane, (1995). Caractérisation géochimique et isotopique des eaux souterraines et estimation du taux d'évaporation dans le bassin du chott Chergui (zone semi aride), Algérie.Doc, en SC, Uni. Paris –sud Orsay, 256p. http://www.secheresse.info/spip.php?article6525

24- Dempster J, (1993). Computer analysis of electro physiological signals. *Academic Press*, London, 104–32.

25- Direction des Services Agricoles D.S.A, (2007). Rapport des bilans annuels .Ouargla (Algérie), 8-10.

26- Direction Hydraulique Wilaya Ouargla D.H.W.O, (2008). Rapport de la SCET coopération intitulée. Dans : *Etude préliminaire de l'assainissement de la cuvette de Ouargla et la vallée d'Oued Righ. Algérie*, 11-13.

27- Djidel M, (2008). Pollution minérale et organique des eaux de la nappe superficielle de la cuvette d'Ouargla (Sahara septentrional, Algérie). *Thèse de doctorat, Université Badji Mokhtar d'Annaba, pp. 01* 

28- Dubief Jean, (1954). Essai sur l'hydrologie superficie au Sahara. N.S.UNESCO. p 262-278.

29- Durant J.H 1983 .Les sols irrigables SES, Alger, p190.

30- El fergougui M, (2012). Contribution à l'évaporation de la nappe phréatique et son impact sur les sols agricoles des zones arides cas de ouargla, p5 15.*Revue courrier de savoir*.  $N^0$  13.

31- ENAGEO, (1990). Etude hydrogéologique de la nappe phréatique de la cuvette de ouargla. *Rapport, Avril* 

32- Fabre J, 1976. Introduction à la géologie du Sahara Algérien. Alger SNED.

33- FAO, (1990). An international action programmer on water and sustainable agricultural development. A strategy for the implementation of the Mar del Plata action plan of the 1990. Rome Italy.

FAO, 1998. *World Reference Base for Soil Ressources*. World Soil Ressources Report n°84. ISSS, ISRIC and FAO, Rome, 88 p.

34- Fonte J. Ch, Yousfi M, Allison G .B, (1986). Estimation of long-term, diffuse groundwater discharge in the northern Sahara using stable isotope profiles in soil water 0 J hydrol 86, 315 - 327.

35- Gardner, W.R, (1958). Some steady state solutions of the unsaturated moisture flow equation with application to evaporation from a water table. *Soil Scl.* 85, 228-32.

36- Gardner, W.R, Fireman .M, (1958). Laboratory studies of evaporation from column in the presence of a water table. Soil Sci, 85: 244 - 249 http://www.nrcresearchpress.com/doi/pdf/10.1139/er-2013-0035

37- Gaucher G, Burdin S (1974). Géologie, géomorphologie et hydrologie des terrains salés.Paris: Presses universitaires de France

38- Gouvea, S. R, (1980). Migration des sels et des isotopes lourds à travers des colonnes de sédiment non saturé sous climat semi-aride. *Thèse de 3eme cycle, Univ.* Paris vI, France. http://hydrologie.org/redbooks/a244/iahs\_244\_0063.pdf

39- Gowing, J. W. Konukcu F, and. Rose D. A, (2006). Evaporative flux from a shallow water table: The influence of a vapour- liquid phase transition. *Journal of Hydrology* .321, 77-89. <u>http://www.researchgate.net/publication/245099590\_Evaporative\_flux\_from\_a\_shallow\_watert</u> able\_The influence of a vapourliquid\_phase\_transition

40- Grunberger O, 1989]. Etude géochimique et isotopique de l'infiltration sous climat tropical contrasté Massif du Piton des neiges. Ile de Réunion. *Thèse de doctorat en sciences*, université Paris Sud, Orsay.

https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00865995/

41- Guendouz A, (1992). Etude hydro-chimique et isotopique des eaux souterraines de la cuvette de Ouargla. *Rapport n1, 65 p, Rapport n2, 30p*. http://univ-biskra.dz/lab/Larhyss/images/pdf/Journal06/10.nezli\_et\_al.pdf

42- Halilet T, (1998). Etude expérimentale de sable additionne d'argile. *Comportement et organisation en condition salines et sodique .thèse d'état* 

43- Hamdane A et Mami A, (1976). Etude du drainage, de la salure et de l'alcalinité dans les périmètres irrigués de la basse vallée de la Mejerda. ES 128, *Direction des Sols, Ministère de l'Agriculture*, Tunisie, 13 pages.

44- Hamdi-Aïssa B & Girard M.C, (2000). Utilisation de la télédétection en régions sahariennes, pour l'analyse et l'extrapolation spatiale des pédopaysages. *Sécheresse*, 3, 179-188.

45- Hénin S., 1977 - Cours de physique du sol, Tome 2 : l'eau et le sol. Les propriétés mécaniques, la chaleur et le sol. ORSTOM Paris, Edit Bruxelles, 221 pages

46- Idder Tahar, Idder Abdelhak, Mensous Mohamed, (2011). Conséquences écologiques d'une gestion non raisonnée des eaux agricoles dans les oasis du Sahara algérien
(Cas de l'oasis de Ouargla). *Colloque international usages écologiques, économiques et sociaux de l'eau agricole en méditerranée :* université de Provence, Marseille, 20-21 janvier

47- Johnson M, (1992). Why, when, and how biochemists should use least squares. Anal Biochem, 206, 215–25.

48- Katz D.M et Chestakov V.M, (1981). *Hydrologie de la mise en valeur des terres* Ed. Université d'état de Moscou, 228-234, 256p.

49- Kerzoum P. A, (1957). Valeurs critique des facteurs déterminant la salinité des sols et leur signification pratique. *Journal mise en valeur des terres de la vallée de Vakmchska. T1* Stalinabab Moscou, p 158-169.

50- Khachatourian V, Pestov L.F, .K.H, (1982). Méthodes de détermination de l'évaporation des eaux de la nappe phréatique dans les terres irriguées. *Journal mise en valeur des terres irriguées* Ed, p 150-169.

51- Karimov Akmal Kh, Simunek Jirka, Hanjra Munir A, Mirzaolim, Forkutsa Irina, (2014). Effects of the shallow water table on water use of winter wheat and ecosystem health: implications for unlocking the potential of groundwater in the Fergana valley (central Asia). *Agricultural Water Management* 131, 57–69.

52- Kovda V.A, (1984). Les problèmes de luttes contre la désertification et la salinisation des terres irriguées. Moscou édition Kolos, p 90-297.

53- Kröpelin, S; Verschuren, D; Lézine, A. M.; Eggermont, H; Cocquyt, C; Francus, P; Cazet, J. P.; Fagot, M; Rumes, B; Russell, J. M.; Darius, F; Conley, D. J.; Schuster, M; von Suchodoletz, H; Engstrom, D. R. (2008). "Climate-driven ecosystem succession in the Sahara: The past 6000 years". Science **320** (5877): 765–8. <u>doi: 10.1126/science.1154913</u>. <u>PMID 18467583</u>

54- Laouini Hamza, Djidel Mohamed, Melouah Oualid et Medjani fethi, (2013). Chimie des eaux et des sels de la région de Ouargla cas du chott de Ain Beida et sebkha et Oum Raneb (Sud Est algérien). *Séminaire International sur l'hydrogéologie et l'Environnement.7-9 novembre* université Kasdi Merbah Ouargla, Algérie.

55- Lacharme Marc, (2001). Mémento Technique de Riziculture. Contrôle de la salinité dans les rizières .*Programme de Développement des Semences, AGETA* 

56- Lelievre R.F, (1969). Assainissement de la cuvette de Ouargla. Ministère des travaux publics et de la construction, *rapport géo-hydraulique n2, 18p, n3, 84p*.

57- Mermoud A, Hubert J, Seytoux S (1988) .Modélisation et observation du flux hydrique vers la surface du sol depuis, une nappe peu profonde. *Hydrol continent*, vol. 4, no 1, 1989: 11 -23.

58- Messaïtfa A, Chaïch Kh, (2006). bilan hydrologique de la cuvette de ouargla (sud-est algérien).. <u>Actes des Journées Internationales sur la Désertification et le Développement</u> Durable(Biskra 10-12 juin 2006) >

59- Meza N et Saouli S, (2002). profondeur de la nappe phréatique, des drain et leurs impact sur le volume des eaux de lessivage. *Actes CMEE. ENSH. Blida*, Algérie, 165-170.

60- Nezli E, (2004). Mécanismes d'acquisition de la salinité et de la fluoruration des eaux de la nappe phréatique de la basse vallée de l'oued Mya (Ouargla). *Mémoire de magister, université. D'Annaba, Algérie, 100p* 

http://biblio.univ-annaba.dz/wp-content/uploads/2014/05/NEZLI-Imed-Eddine.pdf

61- Nezli E. Brinis N, Labar S, (2007) Origines de la salinité des eaux de la nappe phréatique de la basse Vallée de l'Oued Mya. Ouargla. *Larhyss Journal, ISSN 1112-3680, 2007, pp. 121-134*.

62- Ndiaye B et al (2008). Modélisation du transfert de l'eau et des sels dans les casiers rizicoles du Delta du Fleuve Sénégal. *Revue des sciences de l'eau / Journal of Water Science*, 21, 325-336. <u>http://www.erudit.org/revue/rseau/2008/v21/n3/018778ar.pdf (1 AVR 2015)</u>

63- ONA, (2004). Mission II, Office National De L'assainissement. Rapport Final. Investigations, essais de pompage et bilans d'eau, établissement des cartes piézométriques, diagnostic des captages d'eau et mesures de réhabilitation, de protection des ressources en eau (vallée de Ouargla.

64- Office National Météorologique 0.N.M, (2013). Bulletin des bilans mensuels Ouargla (Algérie).

65- Ozenda P, (1977). Flore de Sahara septentrional. Ed Centre national de recherche scientifique. (C. N. R. S), paris, 622 Pages.

66- Ozenda P, (1979). Flore du Sahara. Ed CNRS, Paris, 622 pages.

67- Ozenda P, (1983). Flore et végétation du Sahara. 1<sup>ère</sup> édition. Ed. CNRS. Paris. 662 pages.

68- Ozenda P, (1992). Flore de Sahara, 3éme édition mise à jour et augmentée, *Ed CNRS*. *Paris*, 662 pages.

69- Quezel P, (1978). La végétation du Sahara, du Tchad à la Mauritanie. *Fischer. tuttgart.* 333 pages.

70- Pachkovski IC et Katz DM, (1988). *Мелиоративная гидрогеология*.М: Агролромизлат, 256c, cc138-145. Hydrogéologie et la mise en valeur des terres. : Ed. Agro-météo, Moscou, 138-145, 256p.

http://www-nanaweb.iaea.org/napc/ih/documents/FRENCH%20VERSION/Isotopes%20 dans%20la%20cycle%20hydrologique%20vol%204.pdf 71- Pouyaud B, (1986). Contribution à l'évaluation de l'évaporation de nappes d'eau libre en climat tropical sec. Exemple du lac de BAM et de la mare d'OURSI (Burkina Faso), du lac TCHAD et d'ACUDES du nord-est brésilien. *Editions de l'ORSTOM, coll. Etudes et Thèses* 

72- Ramade F, 2003. Elément d'écologie fondamentale .Ed. DUNOD paris 2003 ,690 pages.

73- Raimini V.E, Brouevitch L.A, Katz D.M, (1978). Recommandations méthodologiques pour l'étude des balances hydriques sur les terres irriguées .Ed UNIGIIM, p 41.

74- Riou C, (1975). La détermination pratique de l'évaporation – Application à l'Afrique centrale. *Mémoire ORSTOM numéro80* 

75- Robinson Mark, Gannon Beate et Schuch Max (1991). Comparison of the hydrology of moorland under natural conditions agricultural use and forestry *Journal des sciences hydrologiques* 36: 6, 565-577 <u>http://dx.doi.org/10.1080/02626669109492544</u>

76- Salhodra AM, Adams E E and Harleman DRF, (1987). The alpha beta gamma of evaporation from saline water bodies, *Water Resources Research* 23: 1769-1774.

77- Smith S and Lasdon L, (1992). Solving large sparse nonlinear programs using *GRG*, ORSA *Journal on Computing*, *4*, 2–15.

78- Taupin J, (1990). Evaluation isotopique de l'évaporation en zone non saturée sous climat sahélien et évolution géochimique des solutions des sols (vallée du moyen Niger) *thèse de doctorat en sciences*, université Paris Sud, Orsay.

http://hydrologie.org/redbooks/a199/iahs\_199\_0159.pdf

79- Thorbun et al, (1992). Comparison of diffuse discharge from shallow water table in soils in salt flats *J Hydro*, 136, 253-274.

80- UNESCO, (1960) .Les Plantes Médicinales des Régions Arides. Recherches sur les Zones Arides, Paris. 99 Pages

81- Woods P, (1990). Evaporative discharge of ground water from the margin of the gread artésian basin near lake Eyre, South Australia. PhD, *Thesis, university South Australia*.

82- Youcef F, Hamdi-Aissa H, (2006). Indicateurs paléo-écologiques dans les sols des bassins endoréiques (sebkha et daya) du Sahara septentrional. Exemple des sebkhas de ouargla et mellala et de la Daya d'el-amied. *Thèse université Kasdi Merbah Ouargla* 

83- Zeddouri A, (2010). Caractérisation hydrogéologique et hydrochimique des nappes de complexe terminal dans la région d'Ouargla Sud-Est Algérien. *Thèse de doctorat, Université Badji Mokhtar d'Annaba, p. 01.* 

## ANNEXES
Intensité de l'évaporation de la nappe phréatique en fonction de sa profondeur dans la zone de Vakcha

courbe bleu : évaporation de la nappe phréatique, courbe noir : évaporation totale



conton [1962- 1967]

LUZERNE[1962- 1967 ]



SOL NU [ 1962- 1967 ]



# Données Climatologiques d'Ouargla

*Période (2000 – 2004)* 

Année	Paramètres	Jan	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil	Aout	Sept	Oct.	Nov.	Déc.
2000	TX (°C)	16.5	21.2	26.8	31.5	35.7	38.4	43.0	41.1	37.7	28.0	24.6	21.3
	TN (°C)	01.8	05.3	10.1	15.6	21.6	24.2	27.1	25.4	22.8	15.9	10.6	07.4
	H (%)	63	56	40	33	41	29	23	30	37	52	57	54
	V (m/s)	2.4	3.4	4.0	5.7	5.1	4.7	4.6	4.3	4.4	3.3	2.2	2.2
	EVAP (mm)	095	165	256	391	371	432	533	489	135	193	151	130
	INSOL	273	291	281	299	194	377	363	353	182	255	264	153
	TM (°C)	09.2	13.2	18.5	23.6	28.7	31.3	35.1	33.3	30.2	21.9	17.6	13.5
	RR (mm)	NT	NT	NT	01.0	10.2	NT	NT	NT	NT	36.4	NT	NT
	TX (°C)	19.7	21.1	30.4	29.0	34.9	40.9	44.6	42.6	39.2	35.3	24.3	18.1
	TN (°C)	04.9	05.0	13.3	14.5	20.0	25.3	28.2	28.0	25.1	20.7	10.5	05.3
	H (%)	54	53	39	35	33	25	24	28	41	42	58	65
200	V (m/s)	2.5	2.3	3.4	3.9	5.1	4.0	4.2	3.4	4.2	2.8	2.8	3.0
01	EVAP (mm)	146	149	254	296	381	492	540	484	379	298	154	105
	INSOL	261	270	302	308	316	350	339	338	237	263	235	132
	TM (°C)	12.3	13.0	21.8	21.7	27.5	33.1	36.4	35.3	32.2	28.0	17.4	11.7
	RR (mm)	NT	NT	NT	00.4	NT	NT	NT	NT	01.0	00.6	00.3	03.6
	TX (°C)	17.4	22.5	26.9	29.4	34.8	31.9	44.0	42.4	37.2	31.0	24.6	21.0
	TN (°C)	02.7	05.7	11.8	15.4	20.8	24.9	29.0	28.3	23.6	16.2	11.1	06.7
	H (%)	50	55	37	32	29	23	26	29	37	47	56	60
200	V (m/s)	2.4	1.6	3.2	4.4	4.7	3.6	4.8	4.0	1.6	3.0	2.9	1.9
)2	EVAP (mm)	101	157	246	299	374	435	426	473	337	235	176	119
	INSOL	261	257	283	285	288	278	285	289	277	260	237	250
	TM (°C)	10.0	14.2	19.4	22.5	27.8	32.4	36.6	35.4	30.6	23.4	17.4	13.5
	RR (mm)	NT	NT	NT	NT	05.0	NT	NT	02.4	01.5	02.6	02.4	NT
	TX (°C)	23.3	18.9	18.6	30.2	35.4	33.7	44.6	41.4	37.0	33.8	24.1	18.5
	TN (°C)	10.0	10.5	06.4	15.5	20.9	25.0	29.4	26.5	23.3	20.5	10.7	05.8
	H (%)	48	55	58	35	32	28	29	26	36	42	53	56
200	V (m/s)	4.0	4.0	3.3	4.6	4.7	3.9	5.5	4.0	3.5	3.4	2.5	3.6
ũ	EVAP (mm)	196	138	122	309	404	439	538	468	329	268	141	116
	INSOL	265	227	214	285	308	325	333	349	293	215	233	202
	TM (°C)	16.6	12.7	12.5	23.4	28.2	32.3	37.0	34.0	30.1	27.2	17.1	11.8
	RR (mm)	06.1	06.4	15.5	TRC	NT	NT	NT	NT	NT	03.9	00.2	00.2
	TX (°C)	19.0	22.3	26.2	28.5	31.7	39.3	41.6	46.5	35.4	34.0	20.1	18.5
	TN (°C)	06.0	08.6	12.4	15.6	17.7	24.4	26.9	28.9	22.4	18.6	10.6	08.2
	H (%)	56	47	43	39	37	30	26	27	37	37	73	66
2	V (m/s)	2.7	3.6	4.3	3.8	5.5	4.5	3.8	3.5	3.7	3.6	2.6	2.9
004	EVAP (mm)	100	161	249	283	371	480	512	513	367	310	082	09.8
	INSOL	254	227	236	276	323	276	365	301	299	246	219	203
	TM (°C)	12.5	15.4	19.3	22.4	25.2	32.4	34.2	35.2	28.9	26.3	15.4	13.4
	RR (mm)	06.5	TRC	21.7	05.4	NT	00.2	NT	13.1	TRC	19.6	43.3	08.0

# Données Climatologiques d'Ouargla

Année	Paramètres	Jan	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Aout	Sep	Oct.	Nov.	Déc.
	TX (°C)	16.1	18.3	25.8	29.9	35.5	39.3	45.0	42.2	36.3	32.3	24.6	17.2
	TN (°C)	03.0	04.8	12.3	15.0	21.4	25.8	29.8	27.9	23.6	18.7	11.5	05.4
	H (%)	62	47	39	33	26	28	22	28	41	50	52	66
20	V (m/s)	2.8	3.9	4.8	5.1	4.4	4.8	3.7	3.6	0.4	3.3	2.8	2.4
05	EVAP (mm)	114	156	300	367	466	448	563	521	304	269	190	091
	INSOL	252	247	202	296	308	248	313	312	251	258	231	210
	TM (°C)	09.6	11.6	19.1	22.4	29.0	32.6	37.4	35.0	30.1	25.5	18.1	10.8
	RR (mm)	00.2	TRC	01.0	NT	NT	TRC	NT	NT	03.2	02.0	17.2	00.1
	TX (°C)	15.6	19.8	27.7	32.7	36.7	40.2	42.5	42.8	35.2	32.8	25.0	18.0
	TN (°C)	02.4	05.5	09.7	15.8	20.7	23.5	26.9	26.4	20.6	16.1	08.8	05.4
	H (%)	65	53	38	31	30	21	23	27	38	42	51	65
200	V (m/s)	2.8	4.0	3.8	4.4	4.9	5.1	4.3	4.2	4.1	2.8	2.5	3.0
90	EVAP (mm)	094	145	278	353	452	583	568	508	319	268	141	087
	INSOL	222	226	308	261	254	282	343	315	272	283	262	213
	TM (°C)	09.8	13.4	19.7	25.1	29.6	32.5	35.4	35.4	28.5	25.3	17.8	12.9
	RR (mm)	094	NT	NT	012	NT	NT	NT	NT	030	059	NT	008
2007	TX (°C)	20.0	22.7	24.3	28.6	35.0	42.0	41.4	42.6	39.1	32.1	23.9	18.2
	TN (°C)	04.8	09.2	10.1	14.9	19.8	25.5	26.5	27.6	25.6	18.4	09.2	04.8
	H (%)	60	47	39	46	32	24	26	27	33	40	48	58
	V (m/s)	1.5	3.3	4.3	5.1	4.4	5.1	4.3	4.8	5.0	4.3	2.5	2.9
	EVAP (mm)	093	164	256	283	418	499	469	517	395	276	131	109
	INSOL	261	217	287	199	225	270	366	317	268	267	275	212
	TM (°C)	12.4	16.0	17.2	21.8	27.4	33.8	33.9	35.1	32.4	35.2	16.5	11.5
	RR (mm)	NT	TRC	NT	03.5	00.3	NT	NT	02.9	NT	00.3	NT	06.1
	TX (°C)	18.3	21.3	26.3	31.9	36.0	39.1	44.9	46.6	38.5	30.1	22.1	18.6
	TN (°C)	05.5	06.1	10.9	15.7	21.1	23.9	29.0	28.0	24.6	18.7	09.8	05.4
	H (%)	65	53	43	31	30	32	24	29	38	58	62	62
20	V (m/s)	2.7	3.2	4.2	4.9	5.1	5.5	3.8	3.2	4.4	4.1	3.2	2.6
800	EVAP (mm)	076	137	210	291	323	286	434	323	313	174	114	078
	INSOL	254	249	263	301	244	292	306	308	243	209	261	192
	TM (°C)	11.9	13.7	18.6	23.8	28.5	31.5	37.0	35.6	31.6	24.4	16.0	11.4
	RR (mm)	05.7	NT	01.2	NT	NT	00.4	NT	NT	14.2	24.1	00.2	00.6
	TX (°C)	17.8	20.3	24.7	27.5	34.4	40.9	44.6	43.0	36.1	30.8	25.5	22.9
	TN (°C)	06.8	07.2	10.1	12.1	18.5	25.4	28.7	27.2	22.0	15.7	09.4	07.7
200	H (%)	70	54	48	42	39	28	25	26	46	46	58	51
	V (m/s)	4.1	3.0	3.6	2.7	XX	3.8	2.2	XX	3.7	2.4	2.1	1.4
õ	EVAP (mm)	081	115	152	173	153	333	417	384	222	167	110	111
	INSOL	196	254	267	321	338	271	337	344	257	312	275	255
	TM (°C)	12.3	13.8	17.4	19.8	26.4	33.1	36.7	35.1	29.1	23.1	16.7	14.9
	R (mm)	54.1	01.5	10.6	00.8	NT	02.5	NT	NT	06.3	00.1	NT	NT

N <sup>0</sup> piézométre	date	Profondeur de la nappe	Résidu sec sol CS	Résidu sec de la nappe CN	Résidu sec sol / Résid u sec de la nappe C <sub>s</sub>
		m	mg/l	mg/l	CS/CN
	12/11/2009	1 36	9503		1 19
P1	30/12/2009	1 34	4995	7986	1 31
	21/01/2010	1,49	4807	3813	1,31
	25/02/2010	1.35	4842	3/85	1,27
	26/04/2010	1.48	3156	3813	1,22
	10/06/2010	1	10250	2387	1,26
	02/12/2009	0,83	13498	8155 10545	1,28
	30/12/2009	0,68	8816	6207	1,4
	21/01/2010	0,67	15934	1001/	1,46
P2	05/02/2010	0,66	9257	6519	1,42
	25/02/2010	0,58	11519	7480	1,54
	10/06/2010	1,5	18410	14496	1,27
	02/12/2009	0,84	18573	14287	1,3
	30/12/2009	0,94	12963	10625	1,22
	21/01/2010	0,83	12289	9453	1,3
P3	05/02/2010	0,71	12682	8807	1,44
	25/02/2010	0,68	16647	12611	1,32
	19/03/2010	0,72	8411	6372	1,32
	10/06/2010	1,69	19042	18667	1,02
	21/01/2010	1,31	4655	3448	1,35
	05/02/2010	1,14	3867	2908	1,33
P4	25/02/2010	1,06	6269	5056	1,24
	19/03/2010	1,28	4165	3471	1,2
	26/04/2010	1,32	4829	3449	1,4
	02/12/2009	1,92	20852	19672	1,06
P5	30/12/2009	1,92	13290	12306	1,08
	21/01/2010	1,92	13254	12341	1,074
	10/06/2010	19	10550	8792	12

#### Salinisation du sol durant la période d'observation Elfergougui M M 2004

TM =

température moyenne mensuelle ;TX = température maximale mensuelle ;TN = température minimale mensuelle ; H % = humidité moyenne mensuelle ; RR = cumul des précipitations ; V (m/s) = vitesse du vent moyen ; EVAP = évaporation ; INSOL = insolation ; NT = néant

## . Données climatiques de la zone de Ouargla (2010, 2011, 2012) office national météorologique de Ouargla (ONM)

annóc	Paramàtras	Ion	Fóvr	Marc	Avril	Mai	Inin	Tuil	Août	Son	Oct	Nov	Dác
annee	Tompáratura	Jan	revi.	Ivial S	AVIII	Iviai	Juili	Jun.	Aout	Sep	00.	1107.	Det.
	moverne jour	178	20.3	247	27.5	34.4	40.0	116	13.0	12	35	28	22.0
	a moyenne jour	17,0	20,5	24,7	27,5	54,4	40,9	44,0	45,0	42	55	20	22,9
1	Colsing												
		2.2	Ο	0	0	0	0	0	0	0	0	0	11
,	Duácinitationa	5,2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4,1
	recipitations												
	(mm)	4 1	2.0	26	27		20	2.2		27	2.4	2.1	14
		4,1	5,0	5,0	2,7	-	3,0	2,2	-	5,7	2,4	2,1	1,4
	vitesse du vent												
	(m/s)												
2011	<b>T</b>												
2011	1 emperature	10.7	20.0	25.5	20.0	24.0	20.4	10 7	4.4	42	21.0	22.0	10.1
	moyenne jour	18,5	20,9	25,5	29,9	34,8	39,4	43,7	44	43	31,8	23,9	19,1
	degre												
	Celsius		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-
	<b>D</b> ( <b>1</b> ( <b>1</b>	1,4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
	Precipitations												
	( <b>mm</b> )	• •	• •	•						• •		• •	
		2,8	2,8	3,8	4,4	4,8	4,6	4,2	4,0	3,8	3,5	2,8	2,7
	vitesse du vent												
	(m/s)												
• • • •	-												
2012	Température	17	22	24.5	20.4	25.5	10.0	44.0	16		22.4	262	10.0
	moyenne jour	17	22	24,5	30,4	35,5	43,2	44,8	46	44	33,4	26,3	19,9
	degré												
	Celsius		_	_	_	_	_	_	_	_	_	_	
		1,4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1,1
	Précipitations												
	( <b>mm</b> )												
		2	2	1,3	2	2	1,3	3,5	1,5	1,5	1,2	1,4	1,2
	vitesse du vent												
	(m/s)												





Préparation du terrain





#### Début du chantier du déblaiement



Sol humide, présence d'une la nappe phréatique



Pompe d'aspiration utilisée pour drainer les eaux de la nappe de la tranchée



Fondation des lysimétres



Lysimétre en PVC ondulé



Pose d'un lysimétre



Mise en place des deux lysimétre



Lysimétre avec un piézomètre



Intérieur du lysimétre