



MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

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

Option : IRRIGATION ET DRAINAGE

THEME :

**DIMENSIONNEMENT D'UN RESEAU DE DRAINAGE DE
LA PALMERAIE DE MEKHEDMA (200ha), (W. Ouargla)**

Présenté par :

SERIARI SEYF EDDINE

Devant les membres du jury

Nom et Prénoms	Grade	Qualité
MEDDI Mohamed	Professeur	Président
SADOUNE Samra	M.C.A	Examineur
MAZOUZI Sabra	M.A.A	Examineur
Aziez Ouahiba	M.C.B	Promoteur

Session 2024

Dédicace

Je dédie ce travail à ma famille, qui a été mon roc et mon soutien tout au long de ce parcours.

À mes chers parents :

Merci pour votre amour inconditionnel, votre patience et vos innombrables sacrifices. Vous avez toujours cru en moi et m'avez guidé avec sagesse. Votre encouragement constant m'a permis d'avancer avec confiance, et votre présence a été une source de force et d'inspiration inestimable.

À mes frères et sœurs :

Votre soutien et votre affection m'ont aidé à traverser les défis de la vie. Vous êtes des compagnons de route précieux, et je vous en suis profondément reconnaissant.

À mes amis chers :

Firas, Ouassim, Chaouki, Smail, Hakim, Youcef, Majid, Riad, Ashref, Rachid, ainsi qu'à *Amine, Nouri, Moussa, Isaad*, et *Ilyes*.
Votre amitié précieuse a illuminé ce parcours. Vous avez partagé des moments inoubliables avec moi, et votre soutien indéfectible a rendu cette aventure bien plus mémorable.

Votre présence dans ma vie a enrichi mon expérience d'une manière que les mots ne peuvent pleinement exprimer

Remerciements

Je remercie d'abord *Allah* pour Sa bénédiction, Sa guidance et Sa sagesse, qui m'ont permis d'arriver jusqu'ici.

Je tiens à exprimer ma sincère gratitude à ma promotrice, *Madame Ouahiba Aziez*, pour votre guidance précieuse et votre soutien tout au long de cette aventure.

Merci à ma famille pour votre soutien indéfectible, vos encouragements et votre amour inconditionnel. Un remerciement particulier à *mes parents* pour vos sacrifices et votre sagesse, qui m'ont permis d'avancer avec confiance.

Je souhaite également remercier mes amis pour leur amitié et leur soutien, qui ont rendu ce parcours bien plus mémorable.

Enfin, je tiens à remercier *l'École Nationale Supérieure d'Hydraulique* pour l'environnement enrichissant et stimulant que vous m'avez offert durant ces années d'apprentissage.

ملخص

تتناول هذه المذكرة التحديات الناتجة عن تراكم الأملاح وزيادة مستويات الملوحة في نخيل منطقة المخادمة، وهي منطقة صحراوية في الصحراء الجزائرية. يهدف المشروع إلى تنفيذ نظام تصريف فعال لإزالة المياه الزائدة من التربة، مما سيساهم في تعزيز التنمية الزراعية على مساحة قدرها 200 هكتار. تهدف هذه المبادرة إلى تحسين إدارة الموارد المائية، وتقليل ملوحة التربة، وإعادة إحياء ممارسات الزراعة المدرجة التي تم التخلي عنها سابقًا بسبب مشاكل الملوحة، وذلك لتحقيق التنمية المستدامة في المنطقة.

Résumé

Ce mémoire de fin d'études se concentre sur la résolution des problèmes d'accumulation de sels et de l'augmentation de leur concentration dans la palmeraie d'El Mekhadma, située dans une région aride du Sahara. Le projet propose la mise en œuvre d'un système de drainage performant pour éliminer l'excès d'eau des sols, favorisant ainsi le développement agricole sur une superficie de 200 hectares. Cette initiative a pour objectif d'améliorer la gestion des ressources en eau, de réduire la salinité des sols, et de restaurer la pratique de la culture en étages, abandonnée en raison des problèmes de salinité, tout en contribuant au développement durable de la région.

Abstract

This thesis tackles the challenges posed by salt accumulation and increasing salinity levels in the palm groves of Mekhadma, a desert region in the Sahara. The project envisions the implementation of an effective drainage system to remove excess water from the soil, thereby enabling agricultural development over an area of 200 hectares. This initiative aims to enhance water resource management, reduce soil salinity, and revive terraced farming practices that were previously abandoned due to salinity issues, all with the overarching goal of fostering sustainable development in the region.

Table de matières

Introduction générale	1
CHAPITRE I : Présentation de la zone d'étude	3
I.1. Situation géographique.....	3
I.1.1. Présentation du périmètre d'étude.....	4
I.2. Analyse climatologique de la région.....	4
I.2.1. Précipitations	5
I.2.2. Température.....	6
I.2.3. Humidité relative	7
I.2.4. Le vent.....	7
I.2.5. Rayonnement solaire	8
I.2.6. L'évaporation.....	9
I.2.7. Classification du climat.....	10
I.2.7.1. Selon l'indice de « DE MARTONNE » :.....	10
I.2.7.2. Selon le quotient pluviothermique d'Emberger (1955) :.....	11
I.2.7.3. Diagramme ombrothermique de gaussen :.....	12
I.3. Conclusion.....	12
CHAPITRE II : Géologie et Hydrogéologie	14
II.1. Géologie de la région.....	14
II.1.1. Le secondaire	14
II.2. Géomorphologie.....	16
II.3. Topographie	17
II.4. Hydrogéologie.....	18
II.4.1. Nappe du complexe terminal	18
II.4.2. Nappe du continental intercalaire	18
II.4.3. Nappe phréatique	19
II.5. Conclusion	22

CHAPITRE III : Ressources en et en sol.....	24
III.1. Qualité des eaux.....	24
III.1.1. La salinité totale.....	24
III.1.2. L'alcalinité.....	24
III.1.3. Classification de l'eau d'irrigation	25
III.1.4. L'analyse de l'eau d'irrigation.....	28
III.1.4.1. Caractéristiques physico-chimiques des eaux de la nappe C.T	28
III.1.4.2. Caractéristiques physico-chimiques des eaux de la nappe CI	29
III.1.4.3. Caractéristiques physico-chimiques des eaux de la nappe phréatique	30
III.2. Ressources en sol.....	30
III.2.1. Les sols de Sahara.....	31
III.2.2. Caractéristiques physico-chimiques des sols.....	31
III.2.2.1. Texture	31
III.2.2.2. La structure	31
III.2.2.3. La densité apparente Da.....	31
III.2.2.4. Le PH	32
III.2.2.5. Gypses et calcaire	32
III.2.2.6. Salinité	32
III.2.3. Classification des sols.....	32
III.2.4. Les résultats d'analyse physico-chimique du sol de la palmeraie	33
III.3. Conclusion	33
CHAPITRE IV : Analyse hydro-agricole et problématique.....	34
IV.1. Introduction	34
IV.2. Organisation administrative.....	34
IV.3. Répartition des sols selon la nature	34
IV.4. Population.....	35
IV.5. Aménagements hydrauliques et captages	37

IV.5.1. Les réseaux hydrauliques existants	37
IV.5.2. Système de drains	37
IV.5.3. Système d'irrigation de la palmeraie	37
IV.5.4. Prélèvement d'eau (Captage)	38
IV.6. Agriculture.....	38
IV.6.1. Production agricole des palmiers et leur superficie.....	39
IV.7. Description générale des problèmes	40
IV.7.1. Facteurs contribuant à la remontée de la nappe phréatique.....	41
IV.8. Conclusion.....	42
CHAPITRE V : Calcul des besoins hydrauliques.....	45
V.1. Introduction.....	45
V.2. Influence des irrigations.....	45
V.2.1. Besoins en eau pour la culture des palmiers	45
V.2.2. Évaluation des prélèvements	45
V.2.2.1. Concept d'évapotranspiration de référence (ET ₀)	45
V.2.2.2. Évapotranspiration maximale (ETM)	47
V.3. L'impact de l'oasis	49
V.4. Analyse des données de précipitations	49
V.5. Calcul de la précipitation efficace	50
V.6. Besoin en eau des palmiers dattiers	50
V.7. Programme d'irrigation de la palmeraie et gestion des pertes hydriques.....	52
V.7.1. Les pertes spécifiques	53
V.7.2. Calcul du débit critique.....	53
V.7.3. Lessivage des sols	53
V.7.3.1. Rôle du lessivage	53
V.7.3.2. Calcul du lessivage d'entretien.....	54
V.7.3.3. Calcul de la dose de lessivage DL	54

V.8. Conclusion	55
CHAPITRE VI : Dimensionnement du réseau du drainage	57
VI.1. Introduction	57
VI.2. Avantages de l'Assainissement du Sol	57
VI.3. Drainage par fosses à Ciel Ouvert	57
VI.3.1. Le rôle des fosses.....	57
VI.4. PROFONDEUR DES DRAINS	58
VI.4.1. Niveau de rabattement de la nappe.....	59
VI.4.1.1. Niveau d'eau (h)	59
VI.4.2. Calcul de L'écartement théorique	60
VI.4.3. Largeur du fond (b) du fossé	61
VI.4.4. Pente des talus m	61
VI.4.5. Pente des fossés	61
VI.5. Calcul hydraulique.....	61
VI.5.1. Les interventions prévues sur le système de drainage	62
VI.5.3. Profils en long.....	65
VI.6. Conclusion.....	65
CHAPITRE VII : Gestion, entretien et exploitation du réseau	67
VII.1. Introduction	67
VII.2. Acquisition des informations sur le réseau	67
VII.2.1. Suivi du réseau de drainage.....	67
VII.2.2. Élimination des dépôts	67
VII.2.3. Détection des fuites	68
VII.2.4. Maintenance des joints	68
VII.2.5. Maintenance par inspection télévisée.....	68
VII.3. Maintenance et exploitation du réseau	69
VII.4. Techniques d'exploitation du réseau	69

VII.4.1. Curage mécanique des regards visitables.....	69
VII.4.2. Curage des regards non visitables	70
VII.5. Réhabilitation du réseau	70
VII.5.1. Fraisage des obstacles :	71
VII.5.2. Injection de produits colmatant.....	71
VII.5.3. Tubage intérieur	71
VII.5.4. Gainage extérieur	71
VII.6. Calcul technico-économique	71
VII.6.1. Définition des terrassements	72
VII.6.2. Types de terrassements	72
VII.6.3. Terrassements ordinaires.....	72
VII.6.4. Calcul du volume de déblai.....	72
VII.6.5. Estimation de cout total de projet.....	74
Conclusion générale	75

Listes des tableaux

Tableau I. 1. Pluviométrie dans la région d'Ouargla	5
Tableau I. 2. Température dans la région d'Ouargla.....	6
Tableau I. 3. Humidité relative moyenne mensuelle.....	7
Tableau I. 4. La vitesse du vent moyen mensuelle.....	8
Tableau I. 5. Evaporation mensuelle	9
Tableau I. 6. Classification de climat selon « DE MARTONNE ».....	10
Tableau III. 1. Les classes de l'eau d'irrigation (DURAND,1958).....	28
Tableau III. 2. Caractéristiques physico-chimiques des eaux de la nappe C.T	29
Tableau III. 3. Caractéristiques physico-chimiques des eaux de la nappe CI.....	30
Tableau III. 4. Caractéristiques physico-chimiques des eaux de la nappe phréatique..	30
Tableau III. 5. Classification des sols salsodiques selon Servant	32
Tableau III. 6. Les résultats d'analyse physique du sol	33
Tableau III. 7. Les résultats d'analyse chimique du sol.....	33
Tableau IV. 1. Organisation administrative.....	34
Tableau IV. 2. Répartition des sols selon la nature	34
Tableau IV. 3. Population de la cuvette d'Ouargla (ABHS-2021)	36
Tableau IV. 4. Inventaire des réseaux hydrauliques existantes.....	37
Tableau IV. 5. La production des diverses zones dans la région de Ouargla.....	39
Tableau V. 1. Valeurs du coefficient (Kc) pour le palmier dattier	47
Tableau V. 2. Pluies totale mensuelles moyennes.....	50
Tableau V. 3. Pluies totale mensuelles moyennes.....	50
Tableau V. 4. Estimation des besoins en eau des palmiers dattiers à Ouargla.....	51
Tableau VI. 1. Les débits de drainage	64
Tableau VII. 1. Calcul du volume de déblai.....	72
Tableau VII. 2. Évaluation du cout excavation.....	74

Liste des figures

Figure I. 1. Carte de situation géographique de W.Ouargla (1/25000).	4
Figure I. 2. Carte satellitaire du périmètre	4
Figure I. 3. Pluviométrie dans la région d’Ouargla.	5
Figure I. 4. Température mensuelle dans la région d’Ouargla	6
Figure I. 5. Variation de l’humidité relative	7
Figure I. 6. Diagramme de la vitesse du vent	8
Figure I. 7. Diagramme de l’Insolation moyenne mensuelle	9
Figure I. 8. L’évaporation dans la région d’Ouargla	9
Figure I. 9. Position de Ouargla dans le diagramme d’EMBERGER	11
Figure I. 10. Diagramme ombrothermique de Gaussen.....	12
Figure II. 1. Carte géologique de l’Algérie de la zone saharienne (OSS2003).....	16
Figure II. 2. Carte géologique locale (BG,2004).....	17
Figure II. 3. Carte topographique de la cuvette de Ouargla.	17
Figure II. 4. Carte des ressources en eaux souterraines (UNESCO,1972).....	19
Figure II. 5. Carte piézométrique de la nappe phréatique en avril 2002.	21
Figure III. 1. Diagramme de classification des eaux d’irrigation	27
Figure IV. 1. Répartition des sols selon la nature.....	35
Figure IV. 2. Population de la cuvette d’Ouargla (ABHS-2021)	35
Figure IV. 3. La superficie des palmerais des diverses zones dans la région de Ouargla	39
Figure IV. 4. La production des diverses zones dans la cuvette de Ouargla	40
Figure IV. 5. Le problème de la salinité et l’excès d’eau	40
Figure IV. 6. Décharges et rejets des déchets d’urbanisme dans des palmeraies	41
Figure IV. 7. Stagnation des eaux dans les palmeraies	42
Figure V. 1. Interface du logiciel CROPWAT8.	48
Figure V. 2. Schéma de projection de réseau d’irrigation	52

Figure VI. 1. Schéma du principe drainage par fossé.....	58
Figure VI. 2. Drainage par fossé OUARGLA	58
Figure VI. 3. Schéma explicatif de système de drainage à faire.	59
Figure VI. 4. Les paramètres intéressant pour calculer l'écartement	60
Figure VI. 5. Section transversale trapézoïdale du drain.....	62
Figure VI. 6. La projection d'un réseau de drainage dans une parcelle	63

Liste Des Planches

- **Profil en long**
- **Schéma de la projection d'un réseau d'irrigation et d'un réseau de drainage dans une parcelle**
- **Plan de situation de la zone EL MEKHADMA (200ha)**
- **Projection de réseau de drainage**

INTRODUCTION GENERAL

Introduction générale

La gestion de l'eau est un aspect essentiel des infrastructures, notamment dans les zones où l'excès d'humidité peut entraîner des inondations, l'engorgement des sols et leur dégradation. Dans le cadre de l'aménagement urbain et des pratiques agricoles, la mise en place de systèmes de drainage efficaces joue un rôle important dans le maintien de la santé des sols, la prévention de l'accumulation d'eau et l'amélioration de l'efficacité opérationnelle de l'utilisation des terrains. Sans un drainage adéquat, la productivité des sols peut être considérablement compromise, entraînant des défis environnementaux et économiques à long terme.

Ce projet de fin d'études se concentre sur l'étude et la conception d'un système de drainage efficace destiné à gérer le ruissellement des eaux et l'excès d'humidité dans divers contextes infrastructurels. L'objectif principal est de proposer des solutions qui répondent aux défis liés à la gestion de l'eau, tout en tenant compte des caractéristiques spécifiques du site, telles que le type de sol, les régimes de précipitations et les besoins particuliers de l'infrastructure concernée.

La méthodologie de cette étude comprendra plusieurs étapes clés. Tout d'abord, une évaluation approfondie du site sera réalisée, en analysant des facteurs tels que la perméabilité du sol, la topographie et les conditions de drainage existantes. Cela permettra de mieux comprendre les besoins en matière de drainage et d'identifier les problèmes potentiels à résoudre.

Ensuite, différentes techniques de drainage seront explorées et évaluées en fonction des conditions locales et des spécificités du projet. Ces techniques pourraient inclure des méthodes de drainage de surface et de subsurface, telles que des fossés ouverts, des caniveaux et des tuyaux de drainage. Une comparaison des avantages, des limitations et de la pertinence de chaque méthode sera effectuée pour déterminer la solution la plus appropriée pour le site.

Une fois la solution de drainage sélectionnée, une modélisation hydraulique sera utilisée pour concevoir le système, en s'assurant qu'il peut gérer le flux d'eau attendu et fournir une capacité suffisante pour éviter l'engorgement. Cette phase inclura des calculs pour déterminer les dimensions des tuyaux, les pentes et la configuration globale du système afin d'optimiser l'efficacité du drainage.

Enfin, les aspects économiques, environnementaux et durables du système de drainage proposé seront évalués. Cela comprendra une analyse coût-bénéfice, une prise en compte des exigences en matière de maintenance et des impacts potentiels sur les écosystèmes environnants. Le résultat de cette étude offrira des recommandations pratiques pour la conception et la mise en œuvre de systèmes de drainage contribuant à la fois à l'efficacité opérationnelle et à la conservation de l'environnement.

En conclusion, ce projet vise à fournir une approche globale de la gestion de l'excès d'eau à travers des solutions de drainage efficaces. En répondant aux besoins spécifiques du site et en optimisant la gestion des flux d'eau, ce projet contribuera à prévenir les inondations, à protéger les infrastructures et à promouvoir des pratiques d'utilisation des sols durables, renforçant ainsi la résilience et la fonctionnalité des systèmes de drainage.

CHAPITRE I

Présentation de la zone d'étude

CHAPITRE I : Présentation de la zone d'étude

I.1. Situation géographique

La wilaya de Ouargla est située dans le sud-est de l'Algérie, à environ 800 km de la capitale. Elle se trouve dans une grande dépression au niveau de la basse vallée de l'Oued Mya. Les limites de la région sont les suivantes :

- À l'est : wilaya d'El Oued et frontière algéro-tunisienne.
- Au nord-ouest : wilayas de Djelfa, Oulad Djallal et El M'Ghair ; au nord-est : El Oued et Touggourt.
- Au sud-est : wilaya d'Ilizi ; au sud-ouest : wilaya d'In Salah.
- À l'ouest : wilayas de Ghardaïa et El Meniaa.

Les coordonnées géographiques de Ouargla sont :

- Altitude : 134 mètres.
- Latitude : 31°58' N.
- Longitude : 5°20' E.

Le chef-lieu, Ouargla, est situé dans une dépression couvrant environ 90 000 hectares. Elle est prolongée par le bassin versant du Sahara septentrional, encadré par l'Atlas saharien, le Hoggar et l'Erg oriental. La région englobe les communes de Ouargla, Rouissat, Ain Beida, Sidi Khouiled, Hassi Ben Abdellah et N'Goussa.

Ouargla est aussi réputée pour ses 3 500 hectares de palmiers dattiers, qui jouent un rôle dans la protection climatique de la vieille ville. Sur le plan topographique, le terrain est principalement plat, avec une pente légère de 1/1000 d'ouest en est.

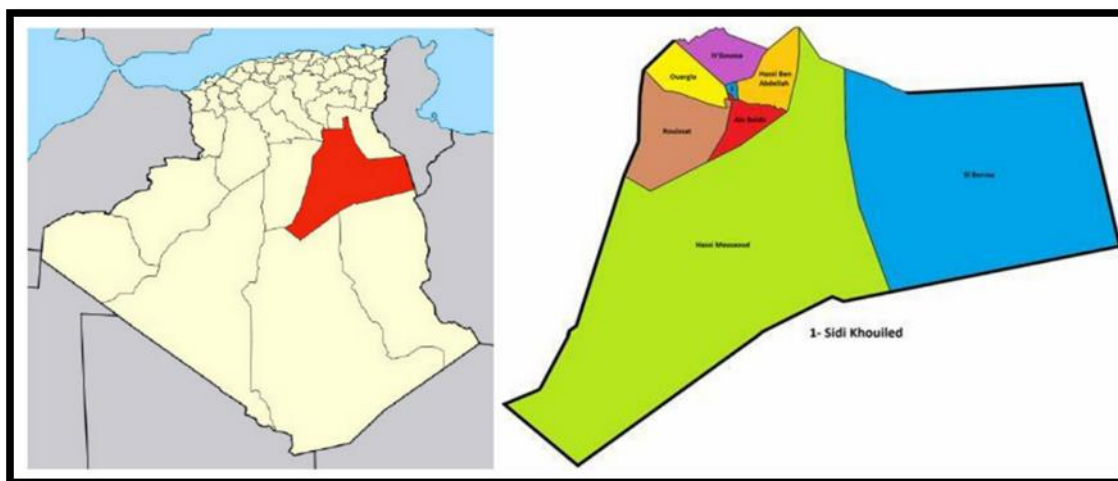


Figure I. 1. Carte de situation géographique de W.Ouargla (1/25000).
[\(https://gifex.com/fr/fichier/quelles-sont-les-communes-de-la-wilaya-d-ouargla/\)](https://gifex.com/fr/fichier/quelles-sont-les-communes-de-la-wilaya-d-ouargla/)

I.1.1. Présentation du périmètre d'étude

La zone d'étude située dans la région d'El Mekhadma, dans la wilaya de Ouargla, s'étend sur 200 hectares. Son principal objectif est l'analyse et la mise en place d'un système de drainage efficace.



Figure I. 2. Carte satellitaire du périmètre (Source : google Earth,2024 le 14/05/2024 à 17 :00)

I.2. Analyse climatologique de la région

L'étude climatologique de la région se base sur l'examen approfondi de plusieurs paramètres, notamment la température, l'humidité, le vent, l'ensoleillement et les précipitations.

Les données ont été complétées par des informations récentes obtenues via le site de la NASA, couvrant la période de 1990 à 2021 (disponibles à l'adresse : power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/).

I.2.1. Précipitations

Les moyennes mensuelles des précipitations relevées durant cette période varient entre 0,16 mm et 11,7 mm, soulignant ainsi l'importante fluctuation des précipitations d'une année à l'autre. Les détails de la répartition mensuelle des hauteurs de précipitations moyennes sont présentés dans le tableau 6 et illustrés à la figure (I.3) ci-dessous.

Tableau I. 1. Pluviométrie dans la région d'Ouargla

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A
P (mm)	5.52	6.27	6.53	4.78	11.7	2.14	6.26	5.12	5.48	0.19	0.16	1.49

Source : la Nasa (<https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>).

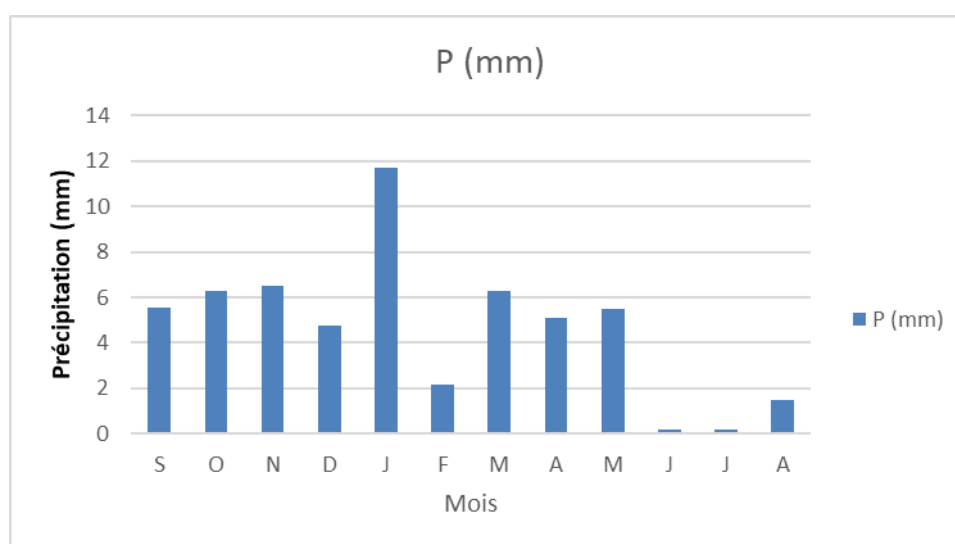


Figure I. 3. Pluviométrie dans la région d'Ouargla.

Les précipitations dans cette région se distinguent par une forte irrégularité, avec des niveaux réduits en hiver et une absence quasi complète en été. Les précipitations hivernales sont principalement générées par l'influence des dépressions liées à la descente méridionale des fronts polaires. En été, elles sont occasionnellement provoquées par les dépressions de mousson. Durant les saisons de transition, les précipitations sont associées aux systèmes dépressionnaires soudano-sahariens se déplaçant vers le nord (Du bief, 1963). Globalement, les précipitations dans cette zone se caractérisent par une faible intensité pluviale.

I.2.2. Température

La température représente un élément prépondérant influant sur le climat de la zone. L'examen des données de température sera réalisé en se basant sur les informations recueillies sur le site de la NASA pour la période allant de 1990 à 2021.

Tableau I. 2. Température dans la région d'Ouargla.

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A
T_{min}	18.65	12.37	5.3	1.34	0.51	1.41	3.82	8.67	13.96	18.87	23.64	23.56
T_{max}	43.05	36.81	28.71	22.02	21.67	25.01	31.08	37.51	41.3	45.26	47.45	46.25
T_{moy}	30.85	24.59	17.01	11.68	11.09	13.21	17.45	23.09	27.85	32.06	35.55	34.91

Source : la Nasa (<https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>).

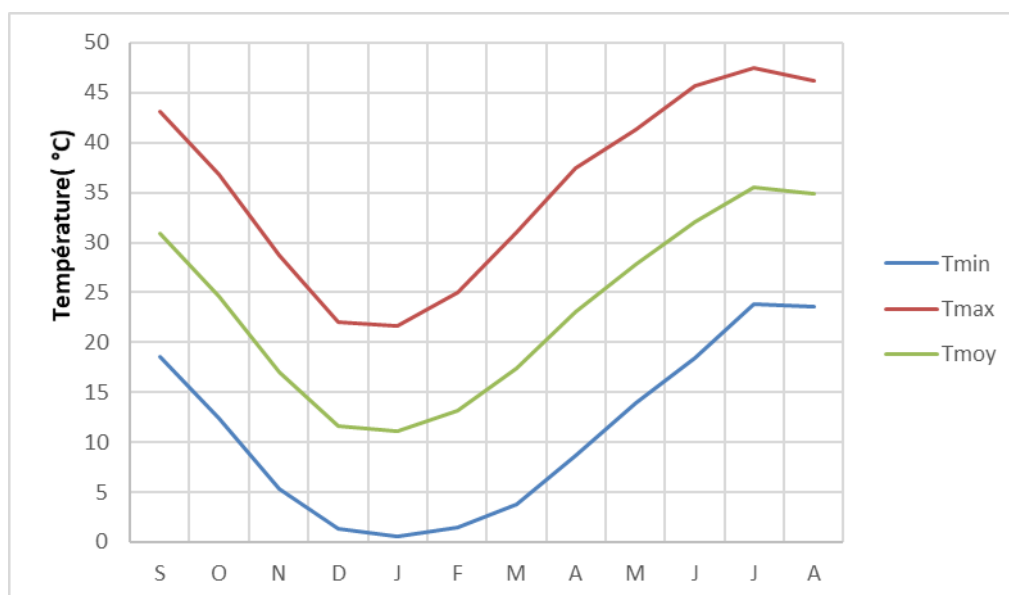


Figure I. 4. Température mensuelle dans la région d'Ouargla

À partir de l'analyse de ces données climatiques :

- Il est évident que les températures maximales les plus élevées sont atteintes en juillet et août, avec des valeurs culminant autour de 47°C.
- Concernant les températures minimales extrêmes, une valeur aussi basse que 0,5°C a été enregistrée durant l'hiver.
- Les températures les plus basses sont relevées en décembre et janvier (0-2°C), tandis que les plus élevées se manifestent en juillet et août (47°C), ce qui est typique de la région nord du Sahara continental.

- Les observations montrent que les températures moyennes estivales à Ouargla sont particulièrement élevées, oscillant entre 32 et 35°C, avec un pic en juillet. En hiver, les températures varient entre 11 et 13°C, janvier étant le mois le plus froid. Cela reflète un hiver relativement doux et un été extrêmement chaud à Ouargla. Ces variations sont encore plus accentuées lorsque l'on compare les températures du sol à celles de l'air.

I.2.3. Humidité relative

L'humidité constitue un paramètre climatique évaluant la quantité d'eau présente dans l'atmosphère. Le tableau présente les moyennes mensuelles de l'humidité relative dans la région.

Tableau I. 3. Humidité relative moyenne mensuelle

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A
HR%	30,39	38,89	49,17	60,2	58,73	49,25	40	33,34	28,3	22,03	18,81	21,27

Source : la Nasa (<https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>).

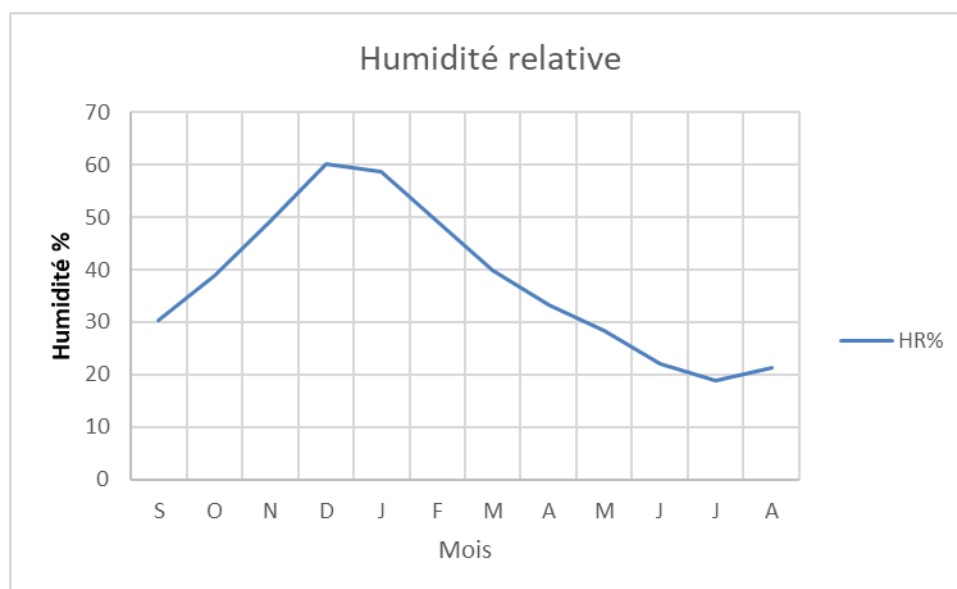


Figure I. 5. Variation de l'humidité relative

Selon les données de la figure 5, l'humidité atteint son pic à 60,2 % en décembre, mais elle décroît de manière significative jusqu'à 18,08 % en juillet, entraînant une évapotranspiration intense et signalant une accentuation de la sécheresse.

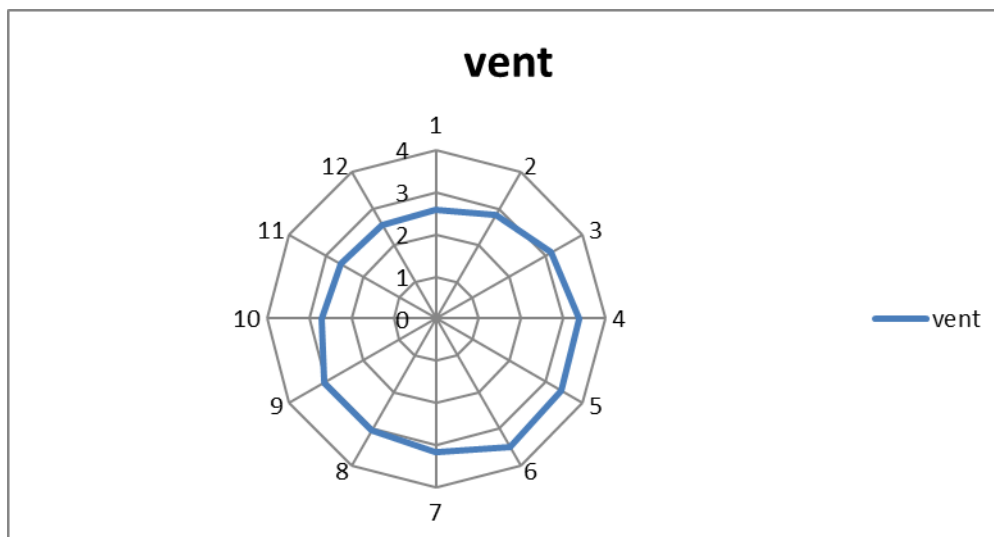
I.2.4. Le vent

Le vent représente un élément climatique essentiel dans la définition du climat. Sa vitesse et sa direction sont les paramètres déterminants. L'analyse de ces données s'avère indispensable pour guider l'orientation et l'installation des protections contre le vent. Les moyennes mensuelles de la vitesse du vent enregistrées à la station de Ouargla (1980-2014) sont exposées dans le tableau qui suit :

Tableau I. 4. La vitesse du vent moyen mensuelle

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	Moy
V(m/s)	3.06	2.69	2.58	2.54	2.57	2.82	3.13	3.38	3.41	3.5	3.14	3.04	2.57

Source : la Nasa (<https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>).

**Figure I. 6.** Diagramme de la vitesse du vent

D'après les données du tableau, la vitesse minimale du vent est relevée au cours des mois de novembre, décembre et janvier, atteignant un minimum de 2,54 m/s. En revanche, la vitesse maximale du vent est enregistrée en juin, atteignant 3,5 m/s. Par ailleurs, le vent souffle dans diverses directions.

I.2.5. Rayonnement solaire

Le rayonnement solaire est un composant climatique souvent pris en considération lors du calcul de l'évapotranspiration potentielle. Les valeurs moyennes mensuelles observées sont présentées dans le tableau ci-dessous :

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	Moy
Insolation (h/j)	8.5	8.2	7.9	6.9	7.6	7.9	8.6	9.4	9.3	10.2	11	10.5	9.2

Source : ONM Ouargla

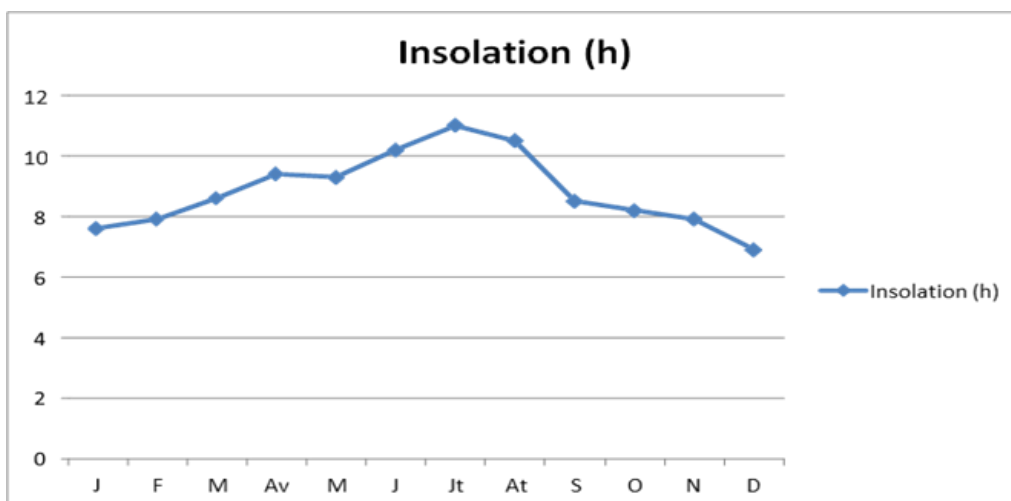


Figure I. 7. Diagramme de l'Insolation moyenne mensuelle

I.2.6. L'évaporation

L'évaporation constitue un processus physique amplifié par la hausse de la température et la sécheresse de l'air. La quantité d'eau évaporée au cours d'une période donnée est influencée par divers facteurs, englobant à la fois les conditions atmosphériques et les caractéristiques de la surface où se déroule l'évaporation.

Tableau I. 5. Evaporation mensuelle

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A
Evapo (mm)	237.2	174.4	102.7	85.7	85.68	110	144.9	201.9	236.6	278.06	307.2	314.3

Source : ONM Ouargla

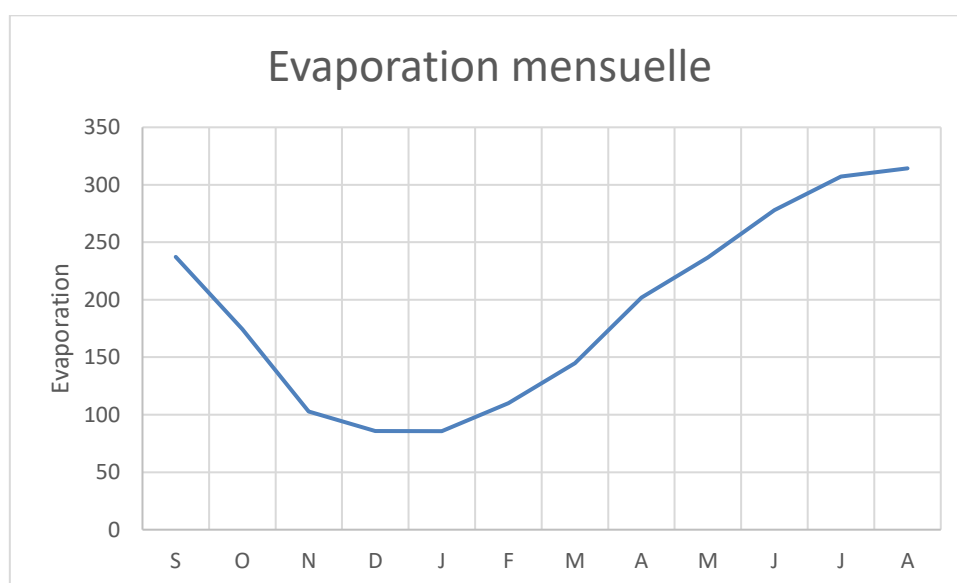


Figure I. 8. L'évaporation dans la région d'Ouargla

I.2.7. Classification du climat

Pour comprendre globalement le climat, on peut recourir à des indices ou à des diagrammes climatiques. Pour définir le climat de Ouargla, nous nous appuyerons sur les indices de De Martonne et d'Emberger, ainsi que sur le diagramme ombrothermique de Gaussen.

I.2.7.1. Selon l'indice de « DE MARTONNE » :

Cet indice permet d'évaluer le niveau de sécheresse de la région et, par conséquent, de fournir des informations sur la disponibilité de l'irrigation.

$$IA = P/T+10$$

Avec :

- P : précipitation moyenne annuelles en (mm)
- T : température moyenne annuelle en (°C)
- IA : indice d'aridité

Les limites des climats d'après l'indice climatique de MARTON sont données dans le tableau ci-dessous :

Tableau I. 6. Classification de climat selon « DE MARTONNE »

Valeur de I	Type de climat	Irrigation
I<5	Désertique	Indispensable
5<I<10	Très sec	Indispensable
10<I<20	Sec	Souvent indispensable
20<I<30	Relativement humide	Par fois utile
I>30	Humide	Inutile

Pour : P =55.64 mm et T=23.27°C, on obtient : Ia = 1.67

On obtient un indice d'aridité : Ia < 5

Selon la classification de MARTON, il s'agit d'un régime Désertique, où l'irrigation est indispensable.

I.2.7.2. Selon le quotient pluviothermique d'Emberger (1955) :

Cet indice permet de définir la classification bioclimatique de la zone d'étude et est calculé à l'aide de la formule suivante :

$$Q = 2000 \frac{P}{M - m}$$

- **P** : Moyenne annuelle pluviométrique (mm).
- **M** : Moyenne des températures maxima du mois le plus chaud (Kelvin).
- **m** : moyenne des températures minima du mois le plus froid (Kelvin).
- **Q** : Quotient pluvio thermique d'Emberger.

Pour :

- $M = 47.45^{\circ}\text{C} = 320.45 \text{ k}$;
- $m = 0.51^{\circ}\text{C} = 273.51 \text{ k}$;
- $P = 55.46 \text{ mm}$.

Un coefficient d'Emberger égal à 3.98 situe la région d'Ouargla (Temaçine) dans l'étage bioclimatique saharienne à hiver chaud sur le climogramme d'EMBERGER (Figure 9).

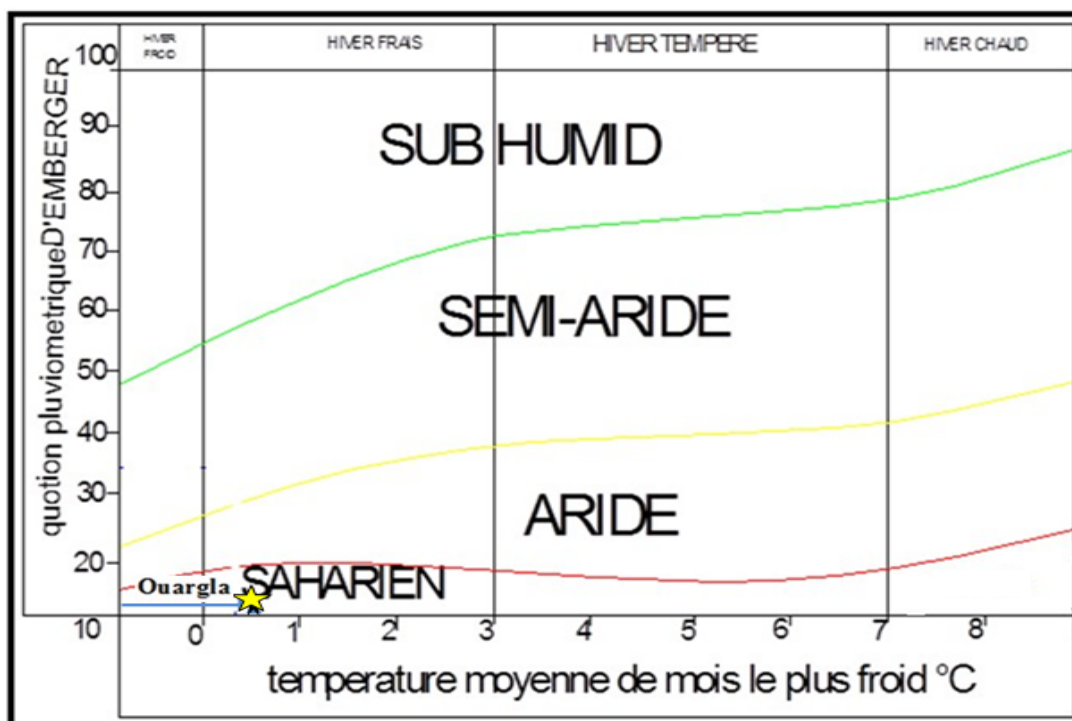


Figure I. 9. Position de Ouargla dans le diagramme d'EMBERGER

I.2.7.3. Diagramme ombrothermique de gausсен :

Le diagramme ombrothermique de Gausсен illustre les variations des précipitations et des températures au fil du temps (mois). Il aide à identifier la période où l'irrigation est nécessaire, c'est-à-dire la période sèche.

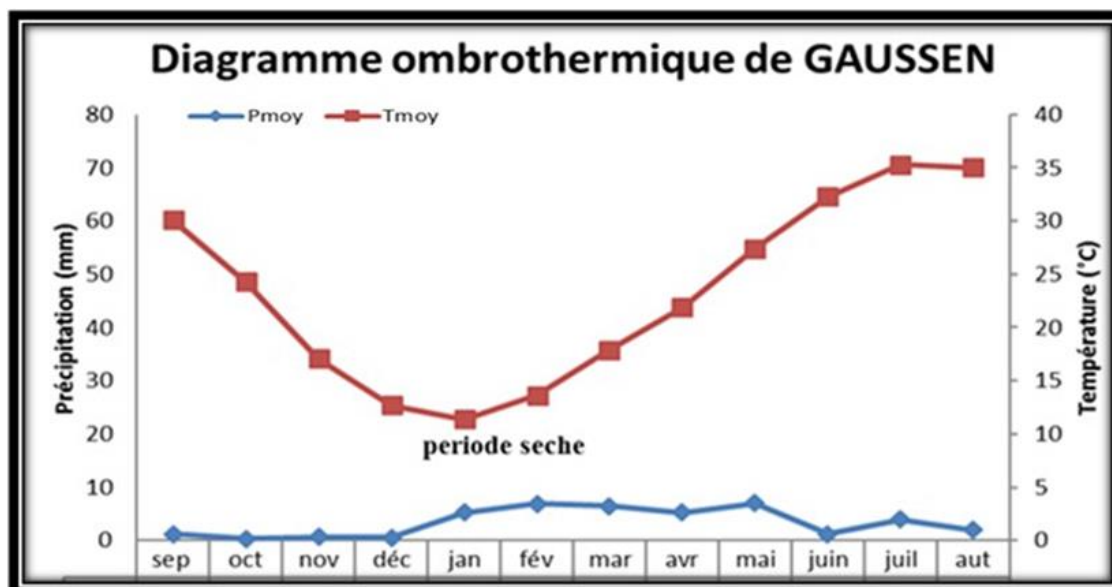


Figure I. 10. Diagramme ombrothermique de Gausсен.

En examinant ce graphique, il est clair que l'année hydrologique dans la région d'étude est marquée uniquement par une période sèche, sans période humide. Identifier cette période est essentiel pour évaluer les besoins en eau pour l'irrigation.

I.3. Conclusion

Le climat de la région de Ouargla est aride, se distinguant par des précipitations minimales tout au long de l'année, avec une moyenne annuelle ne dépassant pas 56 mm, ce qui en fait l'une des zones les plus arides d'Algérie.

Les vents sont fréquents dans la région, surtout au printemps où des vents forts soufflent environ 50 jours, pouvant causer des problèmes d'ensablement. Les vents prédominants soufflent du Nord-Nord-Est et du Sud-Sud-Est, influençant le mouvement des sables et des dunes.

Ouargla bénéficie d'une exposition importante au soleil tout au long de l'année. En juillet, la durée moyenne d'ensoleillement atteint environ 341 heures, tandis qu'en février, elle diminue à environ 213,9 heures. Cette abondance de soleil contribue à une évaporation annuelle élevée estimée à environ 2277,88 mm.

L'humidité de l'air varie de manière significative selon les saisons. En juillet, le mois le plus chaud, l'humidité moyenne descend à 18,08 %, indiquant une atmosphère très sèche. En décembre, le mois le plus frais, l'humidité moyenne est de 60,2 %, relativement faible même pendant les mois les plus froids.

En conclusion, la région étudiée est soumise à un climat saharien, caractérisé par des précipitations très faibles voire nulles, des températures élevées et une évaporation importante.

CHAPITRE II
Géologie et hydro-géologie

CHAPITRE II : Géologie et Hydrogéologie

II.1. Géologie de la région

La géologie de la région de l'Oued Mya, dans le nord du Sahara, révèle une histoire sédimentaire riche et complexe qui remonte à l'ère secondaire. La région, anciennement un massif primaire, a subi plusieurs phases d'immersion marine qui ont contribué à l'accumulation d'épais dépôts sédimentaires. Voici un aperçu des principales formations géologiques de l'ère secondaire dans cette région.

II.1.1. Le secondaire

Au secondaire, nous trouvons :

- A. Le Jurassique est composé du Lias Dogger inférieur, constitué principalement d'anhydrite et de sel gemme, avec une épaisseur notable d'environ 430 mètres. Le Bathonien présente une partie inférieure composée d'anhydrite, d'argiles et de carbonate, accompagnée d'une faune abondante. La partie supérieure de la série est homogène dans son caractère conducteur en raison d'une teneur élevée en argiles, avec une présence importante d'éléments d'exportation continentale aux côtés de quartz détritiques. On observe également une fréquence notable de lignites, de charbons, de débris végétaux et de fer d'origine continentale, tels que les argiles limonitiques,
- B. L'intervalle Callovien-Oxfordien-Kimméridgien est caractérisé par la présence d'argiles et de grès, avec des carbonates se présentant essentiellement sous forme de dolomie beige et de quelques passes marneuses. On observe une fréquence notable de lignite dans les faciès gréseux.
- C. Le Crétacé est constitué du Néocomien (Valanginien et Hauterivien), qui se caractérise par des couches d'argiles inférieures à la base, suivies de grès moyens, d'argiles intermédiaires, puis de grès supérieurs et enfin d'argiles sommitales. Son épaisseur est estimée à environ 175 mètres.
- D. L'Aptien se distingue par des concentrations de carbonates allant de 50 à 75 % et de 10 à 20 % d'argiles. Ces carbonates sont principalement constitués de dolomies, avec des épaisseurs remarquablement constantes variant entre 20 et 26 mètres.
- E. L'Albien présente des épaisseurs significatives allant de 350 à 432 mètres. Les composants détritiques non argileux deviennent largement dominants, représentant de 70 à 90 % : on trouve des grès fins accompagnés occasionnellement de grès moyens

parfois argileux ou fréquemment carbonatés. On observe également la présence d'argiles brun-rouge, gris-vert et beige, qui sont elles-mêmes pélitiques et sableuses et peuvent se métamorphoser en marne et en argiles dolomitiques gris-vert.

- F. L'AlboVraconien, anciennement connu sous le nom d'Albien, correspond au faciès carbonaté situé dans la partie supérieure de l'Albien. Son épaisseur varie généralement entre 40 et 60 mètres et se caractérise par la présence d'environ 50 % de carbonate de dolomite.
- G. Le Cénomaniens se compose d'environ 20 à 25 % de carbonate et de 10 à 20 % d'anhydrite (gypse), avec une épaisseur variante entre 130 et 155 mètres. La partie inférieure est principalement constituée d'argiles dolomitiques grises ou grises blanchâtres, conductrices et d'une épaisseur de 65 à 80 mètres. La partie supérieure est robuste et épaisse de 60 à 70 mètres, avec une alternance d'argiles et de marne dolomitique grise, parfois d'argiles salifères, de bancs d'anhydrite et quelques occurrences de calcaire dolomitique et de sel gemme.
- H. Le Turonien présente une faible épaisseur variant de 65 à 85 mètres du nord au sud. Il est principalement composé de calcaire crayeux de teinte beige à blanche, avec une base de marne grise, suivi de calcaire argileux, et quelques bancs de calcaires dolomitiques au sommet.
- I. Le Sénonien lagunaire se distingue par son épaisseur considérable, atteignant parfois 400 mètres ou plus. Il se compose d'une couche inférieure d'anhydrite d'une épaisseur variant de 40 à 50 mètres, entrecoupée de quelques intercalations d'argiles grises à grises-vertes et de dépôts de sel. La formation salifère, d'une épaisseur allant de 151 à 167 mètres, se caractérise par des couches d'argile brun-rouge, parfois grise-verte, d'anhydrite blanche et de quelques calcaires recristallisés à débris. L'anhydrite de taille moyenne atteint une épaisseur de 100 mètres, atteignant 149 mètres au sud. La zone calcaire argileuse est composée de calcaires (30 %), de dolomie (20 %), d'argiles (25 %) et d'anhydrites (25 %), avec une épaisseur d'environ 50 mètres. L'anhydrite supérieure présente une épaisseur importante, avec une proportion de 55 à 70 % de l'intervalle total, souvent sous forme de gypse massif.

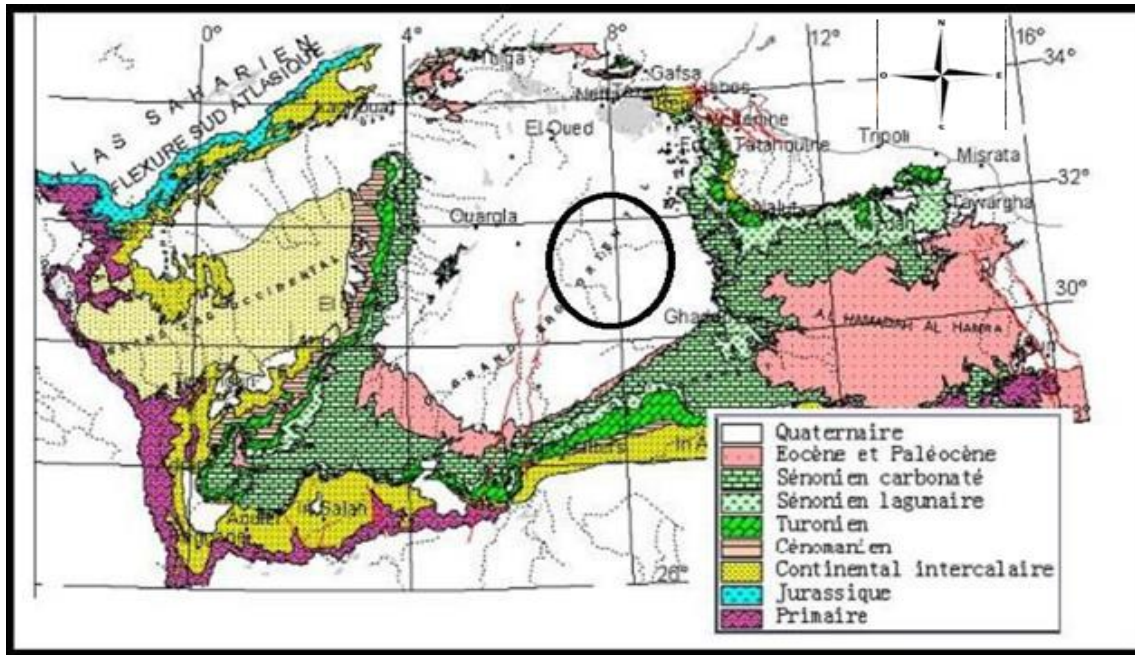


Figure II. 1. Carte géologique de l'Algérie de la zone saharienne (OSS2003).

II.2. Géomorphologie

La région de Ouargla se distingue par les caractéristiques suivantes :

- Elle est principalement recouverte par une formation dunaire constituée de sables fins, certains atteignant des hauteurs de 150 mètres, et qui prédomine sur la majeure partie de la région.
- Des terrains de chotts et de sebkhas sont également présents, représentant les zones les plus basses de la cuvette. Ces zones se composent de sable et renferment d'importantes concentrations de sels, couvrant une superficie dépassant les 4 000 hectares.
- En outre, on trouve des zones où les dépôts alluviaux sont favorables à la culture des palmeraies.

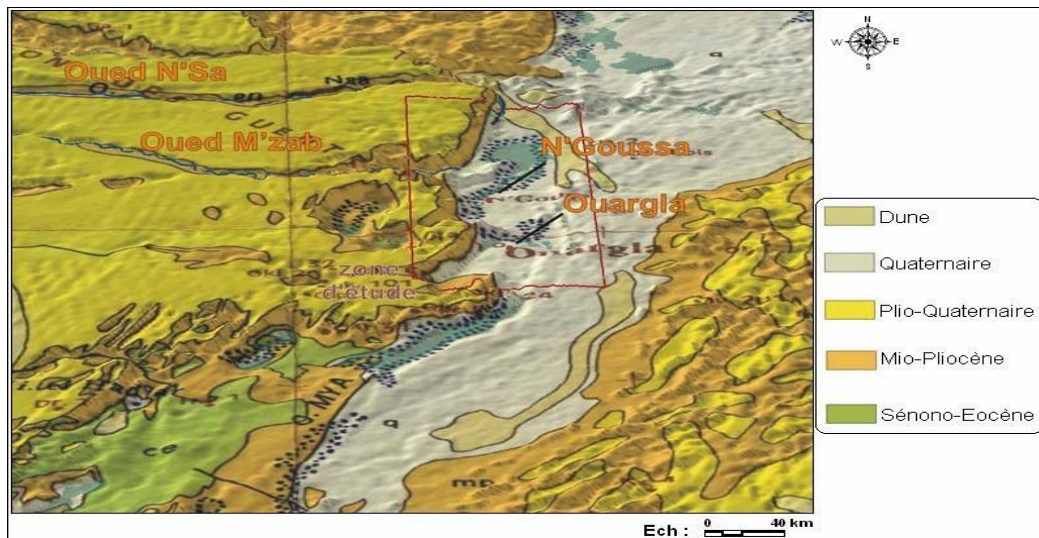


Figure II. 2. Carte géologique locale (BG,2004)

II.3. Topographie

Le relief de la région de Ouargla se caractérise par des pentes légèrement inférieures à 1 pour mille, bien que cette inclinaison ne soit pas uniforme. La région est située en contrebas, au sein d'une vaste cuvette formée dans la basse vallée fossile quaternaire de l'Oued M'ya. Cette cuvette descend en pente douce vers le plateau de Tademaït et s'étend jusqu'à environ 20 kilomètres au nord de Ouargla, avec une largeur d'environ 45 kilomètres, selon les observations de ROUVILLOIS-BRIGOL (1975).

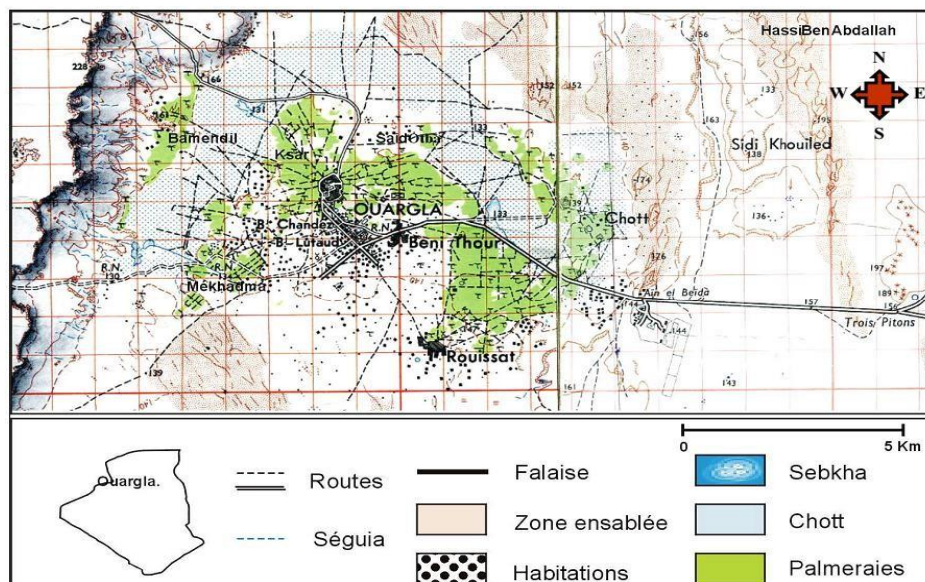


Figure II. 3. Carte topographique de la cuvette de Ouargla (I.G.N.,1960inDADDIBOUHOUN,2010).

II.4. Hydrogéologie

L'essor de l'agriculture dans les régions arides est conditionné par le recours à l'irrigation, du fait de la rareté et de l'imprévisibilité des précipitations. Néanmoins, la région de Ouargla bénéficie d'un des plus grands réservoirs d'eau souterraine du Sahara, ce qui constitue une ressource précieuse pour son développement.

II.4.1. Nappe du complexe terminal

La nappe du Complexe Terminal, également désignée sous le nom de nappe Miopliocène, représente la principale source d'eau exploitée pour répondre aux besoins en irrigation agricole et en eau potable. Elle s'étend du Sud-Sud-Ouest vers le Nord-Nord-Est en direction du chott Melghir, avec des profondeurs variant de 60 à 200 mètres. La salinité de l'eau oscille entre 1,8 et 4 g/l (atteignant parfois 7 g/l dans certains cas), selon les observations de ROUVILLOIS-BRIGOL (1975), tandis que sa température se situe généralement entre 23 et 25°C. Son exploitation se fait par pompage, avec une capacité allant de 15 à 40 litres par seconde.

En plus du Complexe Terminal, d'autres nappes moins connues sont présentes, telles que le Sénonien Lagunaire, le Sénonien Carbonaté et le Turonien. Parmi celles-ci, le Sénonien Carbonaté est la plus utilisée pour l'approvisionnement en eau potable en raison de sa qualité chimique supérieure par rapport aux autres nappes.

II.4.2. Nappe du continental intercalaire

La nappe du Continental Intercalaire, un aquifère fossile hautement artésien, ne bénéficie pas d'un réapprovisionnement par les conditions climatiques actuelles, comme l'indiquent CORNET et GOUSCOV (1952). Captée à des profondeurs allant de 1000 m (Gassi Touil) à 1500 m (Ouargla), elle dépasse les 1500 m au Nord-Est, à Oued Righ et aux Ziban, selon les observations de NESSON (1978). Avec une extension sur plus de 600 000 km² et un volume estimé à 50 000 milliards de mètres cubes, selon les estimations du PNUD-UNESCO (1972), cette nappe se distingue par un débit considérable pouvant excéder les 200 litres par seconde, une salinité relativement basse (généralement inférieure à 2 g/l de résidu sec) et des températures pouvant dépasser les 60°C, selon KHADRAOUI (2006) et ZAHROUNA (2011). Présente dans le sud-ouest algérien, elle est exploitée depuis longtemps par les foggaras de Gourara, du Touat et du Tidikelt, selon DUBOST (1992).

Quant à la nappe albienne, elle a été exploitée pour la première fois à Ouargla en 1956, à des profondeurs de 1100 à 1400 mètres. Son débit se situe entre 200 et 250 litres par seconde,

avec une température avoisinant les 50°C et une salinité inférieure à celle du Sénonien. Toutefois, la température élevée de ses eaux pose des problèmes en agriculture, comme le soulignent PILLET et IDDER (1995). La salinité des eaux albiennes varie entre 1,6 et 3 g/l, selon les données de l'A.N.R.H. (2000).

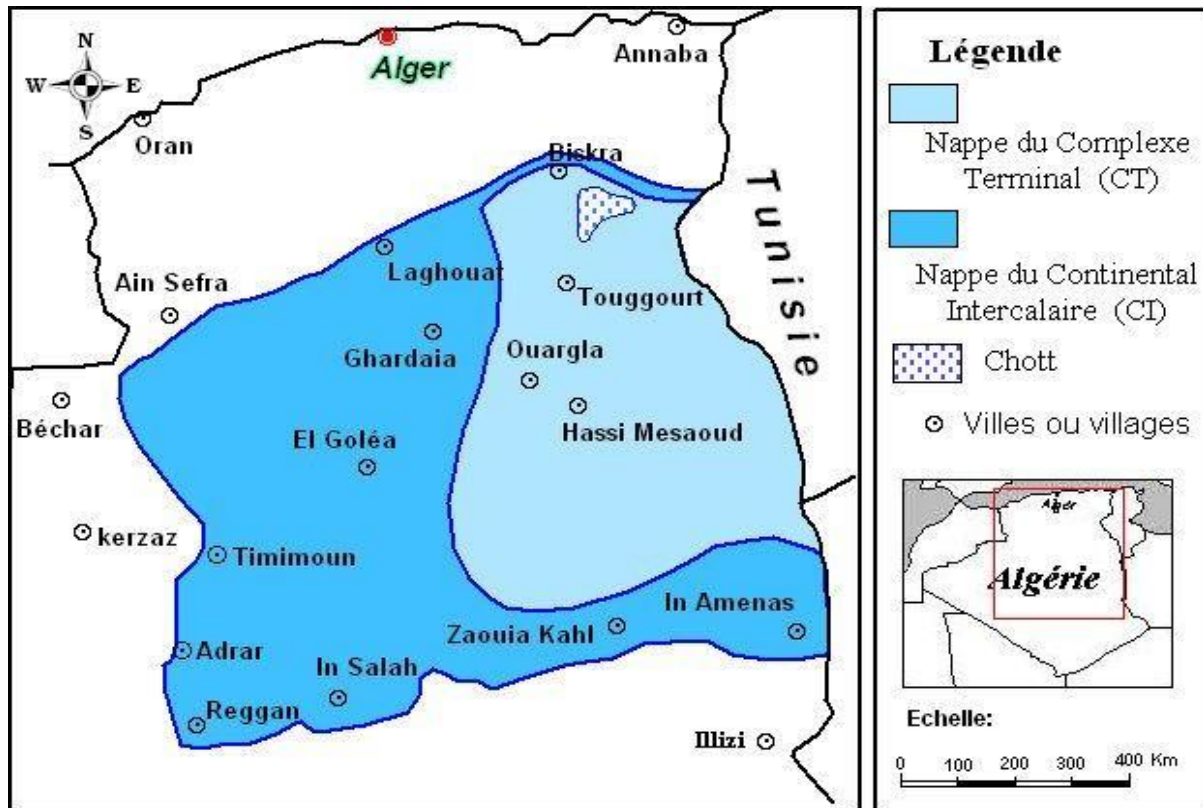


Figure II. 4. Carte des ressources en eaux souterraines (UNESCO,1972)

II.4.3. Nappe phréatique

La nappe phréatique est logée dans des formations alluviales récentes, situées dans la vallée, et son sens d'écoulement n'est pas clairement défini. Apparemment, il semble y avoir deux directions : du sud vers le nord, suivant la pente de la vallée, et de l'ouest vers l'est pour les parties de Bamendil Chott (anciennement Ouargla). La profondeur de la nappe peut être à peine à 50 cm sous la surface et peut même affleurer le sol, avec une qualité d'eau très saline. Cette nappe phréatique est exploitée dans certaines zones comme Bamendil, N'goussa, El Hadjira et Taibet, où elle est également considérée comme une source d'eau pour les palmeraies boursières. Des études menées par l'ANRH (1994) ont fourni des informations sur la qualité de ces eaux, leur minéralisation et leur concentration. En effet, ces études montrent que les variations saisonnières des niveaux piézométriques sont irrégulières, influencées par les apports

saisonniers et les conditions climatiques. On peut distinguer deux états : des niveaux bas au printemps et en été, et des niveaux élevés en automne et en hiver.

D'autres études donnent les résultats suivants quant au niveau de la nappe phréatique :

- En zone urbaine agricole, il varie entre -0,3 et 1,5 mètres.
- Dans les chotts, il est compris entre +0,2 et +0,8 mètres.
- Dans les sebkhas, il varie entre +0,3 et -1,5 mètres.

L'alimentation des nappes phréatiques, notamment celles de la ville, pose un défi majeur en termes de gestion et de développement de l'agriculture irriguée. Selon une étude de l'UNESCO, environ 80 % des eaux usées et 30 % des eaux d'irrigation se déversent dans la nappe, les précipitations ayant une contribution moins significative. La nécessité d'un apport supplémentaire en eau pour l'irrigation, appelé lessivage, a accentué la recharge excessive de la nappe, entraînant la remontée des eaux à la surface dans les zones centrales, telles que les palmeraies, ainsi que dans les périphéries de la région, notamment les dépressions telles que les chotts et les sebkhas. Cela a conduit à la salinisation des sols sous l'effet des conditions climatiques. De plus, le système d'irrigation utilisé dans la région contribue également à l'alimentation importante de la nappe phréatique par le biais des fuites provenant des réseaux de distribution et irrigation.

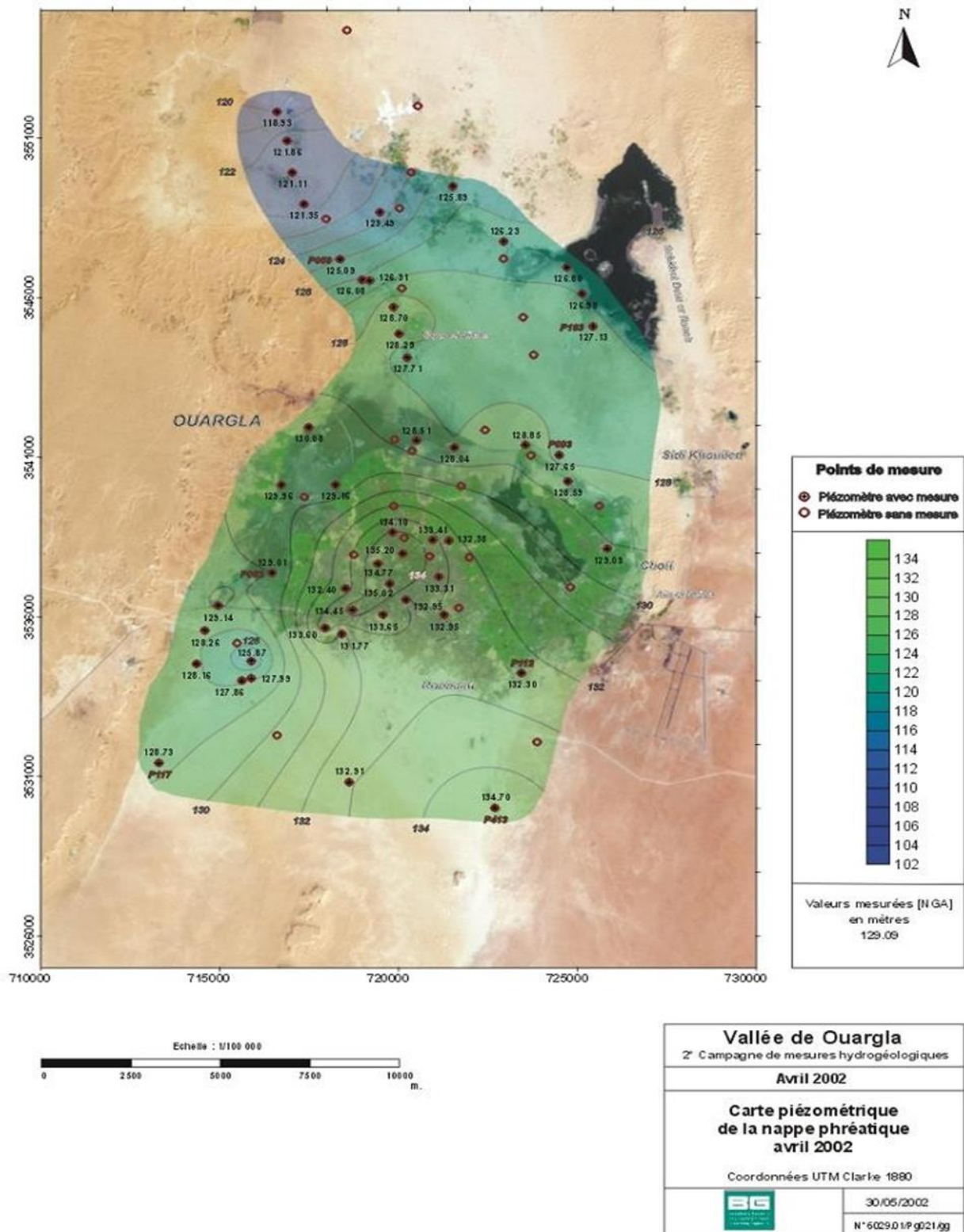


Figure II. 5. Carte piézométrique de la nappe phréatique en avril 2002 (BONNARD et GARDEL, 2005).

II.5. Conclusion

Dans cette introduction, nous avons déterminé que notre zone d'étude est située dans une région au climat saharien, marqué par un ensoleillement intense et une rareté d'eau. Les traits distinctifs de cette région incluent une aridité extrême, des précipitations très rares voire inexistantes, des températures estivales élevées contrastant avec un froid relatif en hiver, des vents forts et une évaporation importante.

CHAPITRE III

Ressource en eau et en sol

CHAPITRE III : Ressources en eau et en sol

III.1. Qualité des eaux

L'eau utilisée pour l'irrigation, si elle est trop salée, peut altérer la composition chimique du sol. Ainsi, il est crucial de gérer cette ressource avec soin pour éviter tout dommage potentiel au sol. Habituellement, la qualité de l'eau d'irrigation est évaluée selon deux critères principaux : la salinité totale et l'alcalinité.

III.1.1. La salinité totale

Elle s'exprime par la conductivité électrique mesurée à 25°C et est proportionnelle à la quantité d'ions en solution. Il existe une relation directe entre la salinité, représentée par la conductivité électrique, et la pression osmotique, donnée par la relation de BRYSSINE (1975).

$$P_o = K' \cdot CE$$

Avec :

- P_o : Pression osmotique en atmosphère
- CE : conductivité électrique en m.S/cm
- K' : coefficient dépendant du type de sel

On donne quelques valeurs de K' dans le tableau suivant :

Type de sel	K'
Na Cl et KCl	0.35 _ 0.36
Na ₂ SO ₄	0.30
MgSO ₄	0.28

III.1.2. L'alcalinité

L'alcalinité de l'eau utilisée pour l'irrigation est un paramètre crucial à considérer. Cette eau contient des cations courants qui se répartissent en deux catégories : d'un côté, le sodium (Na⁺), qui a tendance à déstructurer le sol en le dispersant, et donc est préjudiciable, et de l'autre côté, le calcium (Ca⁺⁺) et le magnésium (Mg⁺⁺), qui ont un effet agglomérant et bénéfique pour la structure du sol. La détérioration de la perméabilité du sol par l'eau d'irrigation peut être attribuée à une carence en calcium et en magnésium ou à un excès de sodium. L'alcalinité de cette eau est évaluée par le rapport d'adsorption du sodium (SAR), qui révèle l'équilibre des

cations et indique le potentiel alcalinisant de la solution. Cette valeur est déterminée par la formule suivante :

$$SAR = \frac{[Na^+]}{\sqrt{\frac{[Ca^{2+}] + [Mg^{2+}]}{2}}}$$

Où : [Na+], [Ca++] et [Mg++] sont exprimés en méq/l.

Il est à noter qu'il existe plusieurs relations entre le SAR et le sodium échangeable, comme celle donnée par SERVANT (1974).

$$ESP = 1.049 SAR - 0.381$$

Il est possible de prévoir les risques d'alcalinisation d'un sol en contact avec une eau dont le SAR est connu.

III.1.3. Classification de l'eau d'irrigation

La classification des eaux d'irrigation prend en compte les conditions d'utilisation de ces eaux ainsi que les caractéristiques du sol, telles que le taux d'infiltration, le drainage et la tolérance des cultures, selon DURAND (1983). Le diagramme de l'U.S.S.L. (1954), modifié par DURAND (1958) pour inclure une cinquième classe de salinité, est le plus pratique pour les eaux algériennes. Ce diagramme, basé principalement sur des observations en Afrique du Nord, suppose des conditions de culture adéquates, un bon drainage et des sols suffisamment perméables. Il s'appuie sur la salinité de l'eau (CE à 25°C) et le risque d'alcalinisation des sols exprimé par le SAR.

Selon DURAND (1958), la salinité de l'eau (CE) permet de définir cinq classes d'eau en fonction de la relation entre la conductivité électrique à 25°C de l'eau et le risque de salinisation du sol :

- **C1 : CE à 25°C < 0,25 dS/m** : eaux non salines, adaptées à l'irrigation de la majorité des cultures sur la plupart des sols, avec un risque minimal de salinisation du sol.
- **C2 : CE à 25°C entre 0,25 et 0,75 dS/m** : eaux à salinité modérée, nécessitant un léger lessivage pour être utilisées.
- **C3 : CE à 25°C entre 0,75 et 2,25 dS/m** : eaux à forte salinité, inutilisables même avec un bon drainage ; des pratiques spéciales de contrôle de la salinité sont nécessaires et seules les plantes tolérantes peuvent être cultivées.

- **C4 : CE à 25°C entre 2,25 et 5 dS/m** : eaux à très forte salinité, généralement impropres à l'irrigation ; elles peuvent être utilisées exceptionnellement sur des sols très perméables avec un bon drainage et une irrigation abondante pour assurer un fort lessivage du sol. Les plantes cultivées doivent être très tolérantes aux sels.
- **C5 : CE à 25°C > 5 dS/m** : eaux à salinité excessive, généralement inutilisables, sauf sur des sols sableux bien drainés et pour des cultures extrêmement tolérantes comme le palmier dattier.

Selon l'U.S.S.L. (1954), quatre classes ont été établies en fonction du risque d'alcalinisation des sols. Ces classes ne sont pas définies par des valeurs absolues, mais par des droites à pente négative en fonction de l'augmentation de la salinité. Cette classification prend en compte non seulement le SAR, mais aussi la quantité totale de sels dissous dans l'eau :

- **S1 : SAR de 0 à 10** : eaux faiblement sodiques, adaptées à l'irrigation de la plupart des sols avec un faible risque d'alcalinisation, bien que certaines cultures sensibles au sodium, comme l'avocatier, puissent être affectées.
- **S2 : SAR de 10 à 18** : eaux modérément sodiques, avec un risque notable d'alcalinisation des sols dans les sols à texture fine et à forte capacité d'échange. Elles peuvent être utilisées sur des sols à texture grossière ou en présence de gypse.
- **S3 : SAR de 18 à 26** : eaux très sodiques, susceptibles d'induire une alcalinité nocive dans la plupart des sols. Leur utilisation nécessitera des mesures spéciales telles qu'un bon drainage, un lessivage intense et l'ajout de matières organiques.
- **S4 : SAR de 26 à plus de 30** : eaux extrêmement sodiques, présentant un risque très élevé d'alcalinisation. Ces eaux sont généralement inappropriées pour l'irrigation, à moins que leur salinité soit faible et qu'elles permettent l'ajout de calcium soluble, ou que le sol en contienne suffisamment.

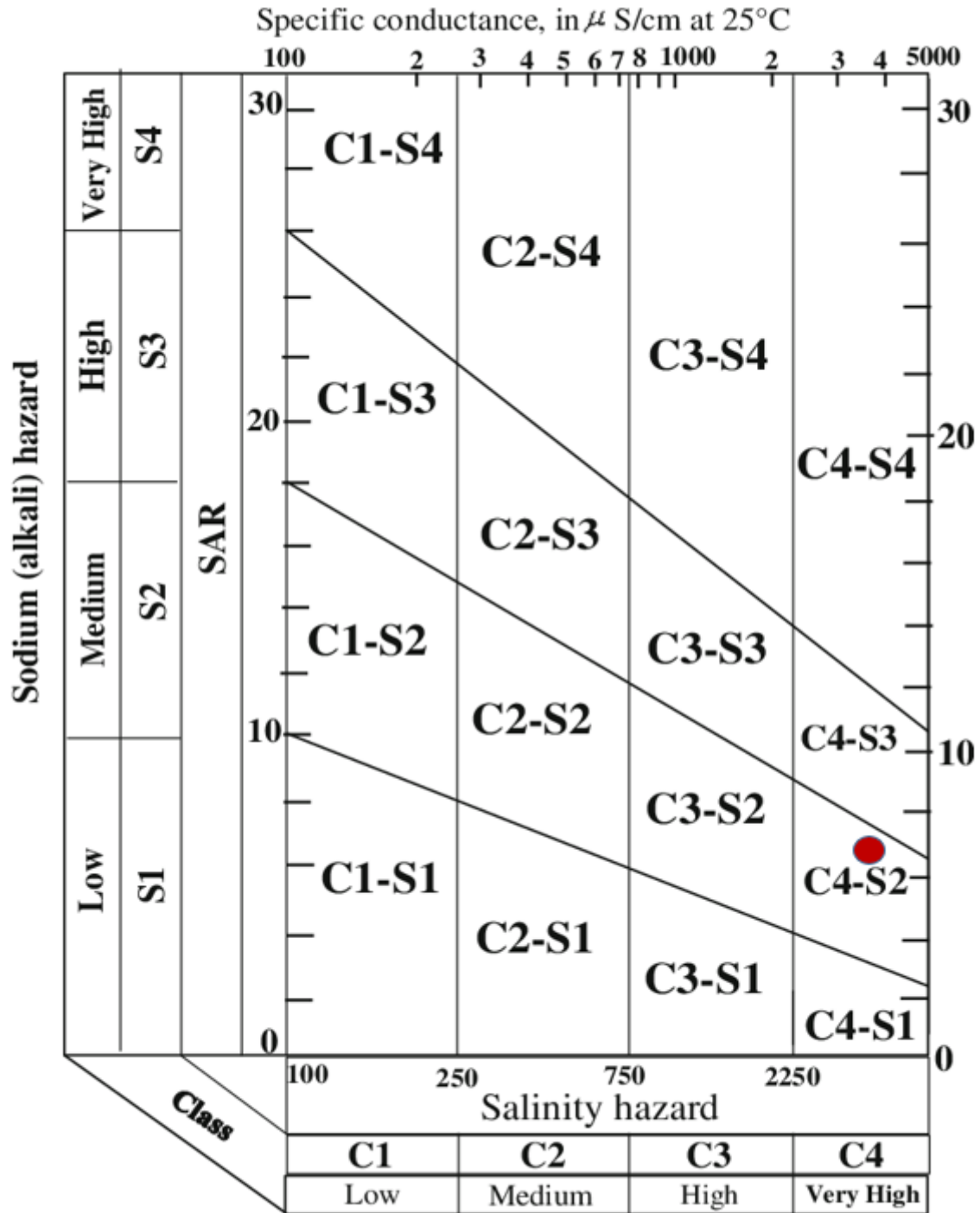


Figure III. 1. Diagramme de classification des eaux d'irrigation (D'après United States Salinity Laboratory, U.S.S.L établi 1954)

Tableau III. 1. Les classes de l'eau d'irrigation (DURAND,1958)

Classe	Qualité	Interprétation
C1- S1	Bonne qualité	Précaution avec les plantes Sensibles
C1 -S2 C2 - S1	Qualité Moyenne à bonne	A utiliser avec précaution dans les sols lourds mal drainés et pour les plantes sensible (arbres fruitières).
C2 - S2 C1 - S3 C3 - S1	Qualité Moyenne à médiocre	A utiliser avec précaution. Nécessite de drainag eavec doses de lessivage et/ou apportsde gypse
C1 - S4 C2 - S3 C3 - S2 C4 - S1	Qualité mediocre à mauvaise	Exclure les plantes sensibles et les sols lourds. Utilisable avec beaucoup de précautions dans les sols légers, bien drainés avec doses de lessivage et/ou apports de gypse.
C2 - S1 C4 - S2 C3 - S3	Qualité mauvaise	A utiliser, avec beaucoup de précautions que dans les sols légers et bien drainés et pour des plantes résistantes. Risques élevés. Lessivage et apports de gypse indispensable
C3-S4 C4-S3	Qualité très mauvaise	A utiliser que dans des Circonstances exceptionnelles
C4- S4	Déconseiller pour l'irrigation	
C5 - S1 C5 - S2 C5 - S3 C5 - S4	Très déconseillée pour l'irrigation	

III.1.4. L'analyse de l'eau d'irrigation

Selon les données recueillies et les enquêtes réalisées, il a été observé que la plupart des forages d'irrigation sont alimentés par le Complexe Terminal. Les résultats des analyses de ces eaux sont présentés ci-dessous.

III.1.4.1. Caractéristiques physico-chimiques des eaux de la nappe C.T

En novembre 2006, l'ANRH a entrepris des recherches sur 104 forages puisant dans le Complexe Terminal. Ces recherches ont permis de relever les caractéristiques suivantes de ces forages :

Tableau III. 2. Caractéristiques physico-chimiques des eaux de la nappe C.T

Elément	mg/l	meq/l
Ca ²⁺	272,50	13,63
Mg ²⁺	176,70	14,48
Na ⁺	655	28,48
K ⁺	28	0,72
Cl ⁻	1062,50	29,93
(SO ₄)-2	1387,50	28,91
(CO ₃)-2	00	0,00
(HCO ₃)-	125,05	2,05
(NO ₃)-	14	0,23
Somme des cations(méq/l)	57,36	
Somme des anions(méq/l)	61,10	
Résidus secs à 105°C(mg/l)	4166	
Conductivité 25°C (ms/cm)	3,86	
PH	7,54	
SAR	7.6	

Source : ANRH novembre 2006

D'après les valeurs de conductivité électrique et de SAR, les eaux du Complexe Terminal dans la région de El-Mekhadma sont classées en C4S2. La classe S2 indique que le SAR se situe entre 10 et 18, ce qui signifie que la teneur en sodium est modérée et que l'eau peut présenter des risques pour les sols à texture fine. La classe C4 indique que la conductivité électrique se situe entre 2,25 et 5 mmhos/cm, indiquant une salinité très élevée. Cette eau ne peut être utilisée que si un lessivage intense est pratiqué et pour des cultures très résistantes ; sinon, elle est généralement inutilisable car elle présente un danger élevé pour les sols peu drainés et peut être préjudiciable à la plupart des cultures dans une certaine mesure.

III.1.4.2. Caractéristiques physico-chimiques des eaux de la nappe CI

Depuis que les forages exploitant le Complexe Intercalaire (C.I) dans la région de Ouargla sont entrés en service, de nombreux prélèvements et analyses chimiques ont été réalisés pour surveiller l'évolution de la qualité chimique des eaux. Le tableau 2-3 présente les résultats d'une analyse effectuée par l'ANRH en novembre 2006 sur six forages du CI, exposant les caractéristiques physico-chimiques des eaux de la nappe du C.I.

Tableau III. 3. Caractéristiques physico-chimiques des eaux de la nappe CI

Paramètres	Valeurs moyennes
PH	7.34 – 7.64
Température	74.4 – 54.5 C°
Conductivité	2 – 2.9 mmhos/cm
Faciès chimiques	Sulfate – Chlorure – Alcalin SO ₄ >CL>HCO ₃ et NA >Ca>Mg
La minéralisation totale	1.8 – 2.5 g/l

Source : ANRH nov2008

III.1.4.3. Caractéristiques physico-chimiques des eaux de la nappe phréatique

Le tableau expose les propriétés chimiques de la nappe phréatique de la région.

Tableau III. 4. Caractéristiques physico-chimiques des eaux de la nappe phréatique.

Paramètre	El-Mekhadma
PH	7.9
Conductivité mmhos/cm	5
Température °C	18
Minéralisation totale en mg/l	2800
Calcium mg/l	641.28
Magnésium mg/l	77.7
Sodium potassium mg/l	36.2
Chlorures mg/l	940
Sulfates mg/l	744.7
Bicarbonates mg/l	0
TAC °F	0
Fer mg/l	11.4
Zinc mg/l	0.2

Source : ANRH juin2007

III.2. Ressources en sol

L'analyse pédologique revêt une importance cruciale pour évaluer le degré de fertilité des sols et pour identifier les stratégies visant à optimiser leur exploitation en vue d'accroître la production agricole. Elle offre également un aperçu des défis inhérents aux sols de la région, permettant ainsi de proposer des solutions appropriées pour améliorer leur qualité et leur rendement.

III.2.1. Les sols de Sahara

La formation et l'évolution des sols dans cette vaste région sont largement influencées par le climat et la salinité. Le climat extrêmement aride joue un rôle crucial dans la pédogenèse en entraînant une évaporation intense, ce qui conduit à des accumulations de sel importantes dans certaines zones, surtout après l'introduction de l'irrigation. Ce phénomène est souvent exacerbé par une topographie généralement plate, qui entrave le drainage naturel des eaux excédentaires, ainsi que par une eau d'irrigation contenant relativement beaucoup de sels.

La roche mère des sols de ces régions est principalement constituée du Continental Intercalaire (Sahara septentrional), caractérisé par des formations gréseuses plus ou moins compactes avec des intercalations argileuses. Ces formations sont variées, présentant généralement une texture sableuse, mais parfois aussi des textures limono-sableuses, des dépôts marneux ou un niveau d'eau à des profondeurs variables. Ces sols ne sont généralement pas calcaires, mais ils sont tous plus ou moins affectés par la salinité. Ces caractéristiques des sols expliquent en grande partie l'importance des facteurs pédogénétiques tels que la texture, la structure, la salinité et l'action de l'eau (hydromorphie) dans l'évolution des sols du Sahara.

III.2.2. Caractéristiques physico-chimiques des sols

III.2.2.1. Texture

La composition de ces sols d'origine éolienne est généralement sableuse ou limono-sableuse. La stratification de ces dépôts éoliens n'est pas toujours clairement définie, mais elle se manifeste principalement en surface par des variations entre des couches de sable grossier et de sable fin.

III.2.2.2. La structure

La configuration de ces sols est habituellement granulaire, parfois avec une structure polyédrique peu définie. Ils sont généralement peu compacts et présentent des teintes variantes entre le brun-rougeâtre, le brun clair et le beige.

III.2.2.3. La densité apparente D_a

La densité apparente d'un sol représente la relation entre le poids d'un volume spécifique de sol sec, obtenu par dessiccation en étuve, et le poids d'un volume équivalent d'eau. Son calcul dépend de la texture du sol et est effectué en laboratoire. Dans ce contexte, la densité apparente est de 1,2.

III.2.2.4. Le PH

Le pH de ces sols se situe entre 7,6 et 8,4, révélant une tendance légèrement alcaline. Cette alcalinité est vraisemblablement attribuable à une concentration élevée d'ions sodium dans la solution du sol. De plus, la présence de gypse est courante dans de nombreux sols de cette région.

III.2.2.5. Gypses et calcaire

L'accumulation de gypse en profondeur peut se manifester de diverses manières. Elle peut consister en une quantité importante de petits cristaux, comme des formes fibreuses ou des roses de sable, conférant au sol un aspect poreux et spongieux. Elle peut aussi se présenter sous forme de nombreuses taches ou amas de gypse pulvérulent, répartis de manière diffuse ou en forme de mycélium. La teneur totale en calcaire varie selon les sols. Dans certains cas, les dépôts calcaires en surface peuvent atteindre 8 à 12 %, mais les accumulations très importantes en profondeur sont rares. En général, les sols présentent des taux de calcaire faibles, tant en surface que sur toute la profondeur, car les roches mères sont généralement peu calcaires, voire dépourvues de calcaire.

III.2.2.6. Salinité

Dans la région analysée, tous les sols présentent une concentration élevée de sel, se situant entre 15 et 38 mmhos/cm, particulièrement pour les sols irrigués. Cette présence de sel est détectée à la fois en surface et en profondeur, et elle semble indépendante de la profondeur.

III.2.3. Classification des sols

Tableau III. 5. Classification des sols salsodiques selon Servant

Classes	Désignation	C.Em.S/cm à 25°C	Σ des anions enmég./l
0	Non salé	<2.5	<25
1	Faiblement salé	2.5-5	25-50
2	Moyennement salé	05-oct	50-105
3	Salé	oct-15	105-165
4	Fortement salé	15-20	165-225
5	Très fortement salé	20-27.5	225-315
6	Excessivement salé	27.5-40	315-620
7	Hypersalé	>40	>620

Les diverses classifications de la salinité des sols utilisent souvent des paramètres similaires, tels que les caractéristiques physico-chimiques (teneur en sels, en sodium échangeable et pH), le profil de salinité et son évolution dans le temps, ainsi que les caractéristiques morphologiques (développement du profil) et l'état structural. Nous présentons ici la classification proposée par Servant en 1975, qui classe la salinité en fonction de la conductivité électrique de l'extrait de pâte saturée et de la somme des anions.

III.2.4. Les résultats d'analyse physico-chimique du sol de la palmeraie

Les résultats obtenus sont présentés dans les deux tableaux suivants :

Tableau III. 6. Les résultats d'analyse physique du sol

Sol	Perméabilité K en cm/h	La masse volumique en kg/l	Le coefficient d'uniformité
Sol de la palmeries	15.29-42.89	1.57-1.60	1.70-1.74

Source (TOUIL, 2003)

Tableau III. 7. Les résultats d'analyse chimique du sol

Sol	PH	CE m.S/cm	Insoluble%	Les sulfates %	Les carbonates %	Les chlorides %
Sol de la palmeries	8.16-6.23	6.00 - 1.45	86.2 – 84.0	4.72 – 1.82	0.16-0.03	1.17-0.40

Source (TOUIL, 2003)

III.3. Conclusion

L'étude pédologique réalisée dans la zone d'étude a permis de classer les sols en fonction de leurs caractéristiques morphologiques et physico-chimiques, d'identifier les contraintes à leur mise en valeur, et de proposer des mesures d'aménagement pour surmonter les obstacles limitant l'utilisation de ces sols. Les sols étudiés sont peu évolués ou halomorphes, caractérisés par une faible teneur en matières organiques et en réserves minérales, et présentent les contraintes suivantes :

- Une salinité extrême qui entrave actuellement le développement de toute végétation.
- Une texture grossière, entraînant une faible capacité de rétention en eau et en éléments fertilisants.
- Une réserve minérale très limitée.
- Un encroûtement gypseux observé dans la plupart des profils.

Avant toute exploitation agricole, il est essentiel de procéder à des pré-irrigations pendant quelques jours afin de lessiver les excès de sels dans la zone racinaire, et de prévoir une dose de lessivage adaptée en fonction de la qualité de l'eau d'irrigation pendant la période de croissance des plantes. Le drainage interne est indispensable pour les sols de notre région d'étude.

CHAPITRE IV
Analyse hydro-agricole
et problématique

CHAPITRE IV : Analyse hydro-agricole et problématique

IV.1. Introduction

Le défi de la montée du niveau de la nappe phréatique est façonné par plusieurs facteurs. Pour avoir une compréhension globale de cette problématique, il est crucial de prendre en compte la situation hydrologique et agricole actuelle ainsi que les spécificités de la région.

IV.2. Organisation administrative

Tableau IV. 1. Organisation administrative

DAIRA	Commune
Ouargla	Ouargla – el mekhadma
Sidi Khouiled	Sidi Khouiled – Ain Beida -Hassi Ben Abdalah
N'goussa	N'goussa

IV.3. Répartition des sols selon la nature

Le tableau ci-dessous indique la superficie en hectares occupée par chaque type de terrain, ainsi que le pourcentage correspondant :

Tableau IV. 2. Répartition des sols selon la nature

	Classification détaillée	Surface totale (ha)	Pourcentage %
1	Sable et sols nus	75461	80
2	Zones humides	12011	13
3	Zone bâtie	3183	3
4	Végétation	3214	3
5	Plan d'eau	1105	1

Source (satellite Landsat7 2000)

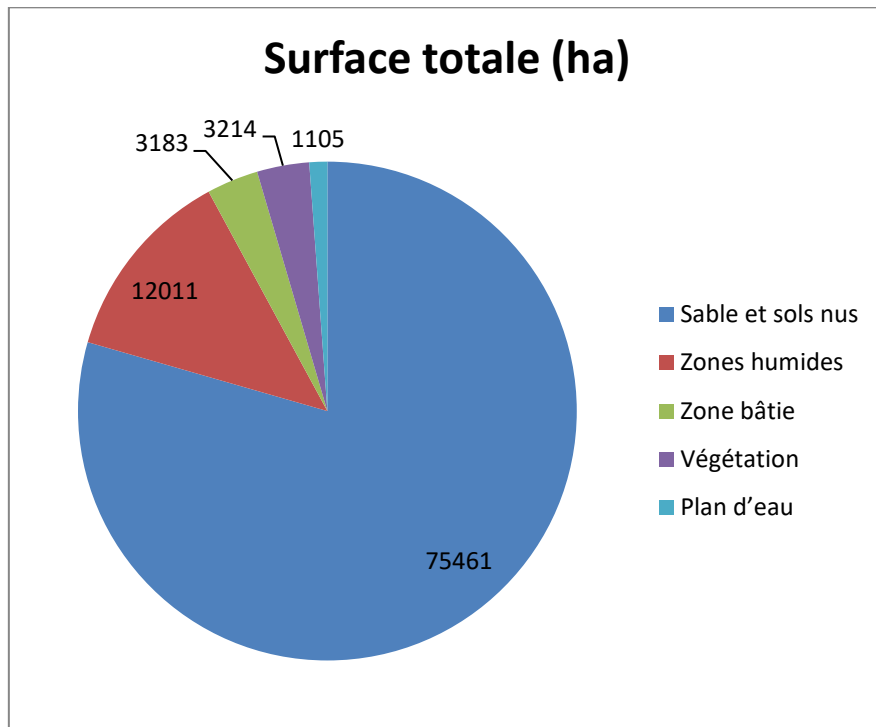


Figure IV. 1. Répartition des sols selon la nature

IV.4. Population

La localité d'Ouargla comprend trois municipalités : Ouargla, Rouisset et Ain Beida. Les données démographiques présentées dans le tableau suivant proviennent des recensements. Ce tableau illustre l'évolution de la population dans la région d'Ouargla.

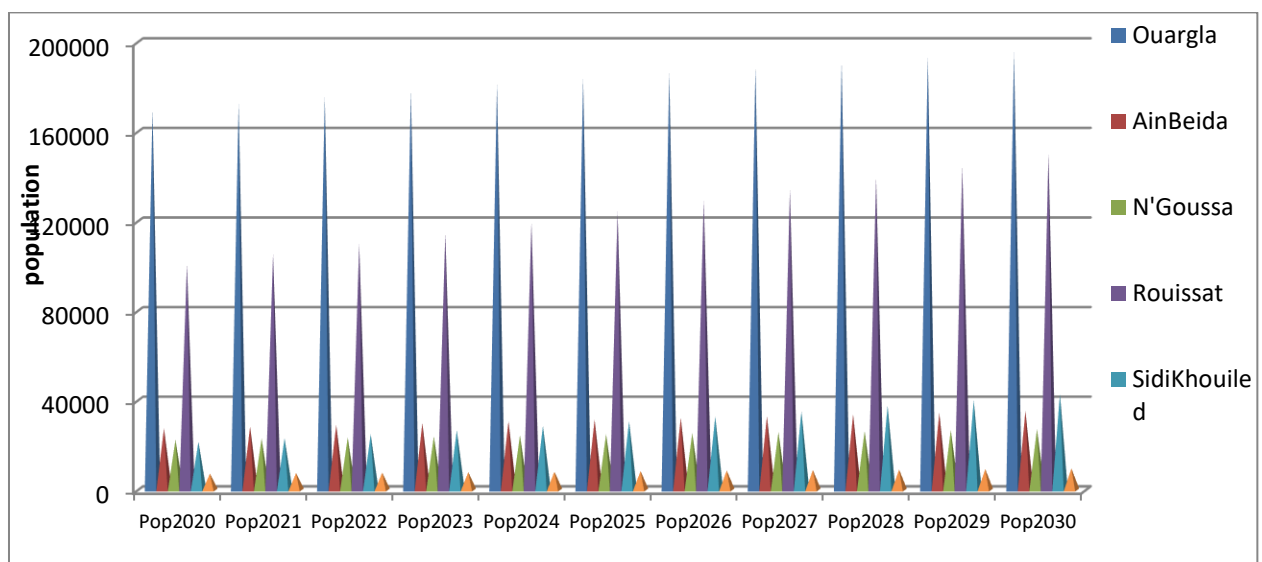


Figure IV. 2. Population de la cuvette d'Ouargla (ABHS-2021)

Tableau IV. 3. Population de la cuvette d'Ouargla (ABHS-2021)

Commune	Ouargla	AinBeida	N'Goussa	Rouissat	SidiKhouiled	Hassi BenAbdella	Total
Pop2020	169 870	27 562	22 460	100 973	21 561	7347	349 773
Pop2021	172 799	28 340	22 962	105 406	23 170	7570	360 247
Pop2022	175 674	29 122	23 463	109 960	24 885	7795	370 899
Pop2023	178 510	29 911	23 963	114 647	26 709	8023	381 763
Pop2024	181 284	30 704	24 461	119 455	28 649	8252	392 805
Pop2025	184 012	31 500	24 956	124 391	30 713	8485	404 057
Pop2026	186 448	32 263	25 416	129 310	32 867	8709	415 013
Pop2027	188 843	33 029	25 874	134 346	35 152	8934	426 178
Pop2028	191 175	33 798	26 328	139 512	37 575	9162	437 550
Pop2029	193 439	34 569	26 778	144 793	40 142	9389	449 110
Pop2030	195 634	35 340	27 223	150 202	42 860	9619	460 878
Taux d'accroissement	1,42	2,52	1,94	4,05	7,11	2,73	2,8

IV.5. Aménagements hydrauliques et captages

IV.5.1. Les réseaux hydrauliques existants

Les données actualisées sur les réseaux hydrauliques de l'ensemble du bassin pour la période de 1999 à 2000 sont présentées dans le tableau ci-dessous.

Tableau IV. 4. Inventaire des réseaux hydrauliques existantes

(Ouargla.2000) Réseaux	AEP	Assainissement	Irrigation
Longueur du réseau	1466000 ml	484000 ml	93000 ml
Taux de recouvrement	97.8%	70%	50%
Ouvrages annexes	20 châteaux d'eau	32 stations de relevage	15 réservoirs+2stations refroidissement

Source : DHW, DSA et ANRH

IV.5.2. Système de drains

Depuis 1968, le système de drains, qui comprend principalement les flux d'eaux usées et d'irrigation, s'est considérablement étendu, passant de 49 150 mètres à 66 650 mètres, surtout dans le sud du bassin. Dans les palmeraies, des canaux ouverts de 0,5 à 1 mètre de profondeur drainent les eaux urbaines et agricoles vers les chotts. Une station de pompage à l'aval des réseaux de drainage de Ouargla, Ain El-Beida et Rouissat évacue 45 000 mètres cubes d'eau par jour vers le Chott Oum el Raneb. Le réseau de drainage du bassin d'Ouargla est peu dense et en mauvais état, avec des canaux secondaires et tertiaires presque inexistantes, sauf à Rouissat et Béni-Thour. En moyenne, de l'eau est évacuée à un débit de 0,015 litre par seconde par hectare d'octobre à février, et de 0,156 à 0.252 litre par seconde par hectare en été, n'atteignant que 20 % de la capacité totale des canaux.

IV.5.3. Système d'irrigation de la palmeraie

La palmeraie de Ouargla s'étend sur 2 297 hectares. Ses besoins en irrigation sont divisés en deux catégories :

- **Irrigation estivale** : Destinée à contrer l'aridité et à soutenir la production, elle nécessite environ 15 400 mètres cubes d'eau par hectare par an, avec une teneur en sel de 3 à 6 grammes par litre. L'évaporation élevée entraîne une accumulation de 50 à 70 tonnes de sel par hectare chaque année dans les couches supérieures du sol.

- **Irrigation hivernale** : Utilisée pour rincer le sel accumulé, elle nécessite environ 5 000 mètres cubes d'eau par hectare par an. Un réseau de drainage interne dirige ces eaux vers des canaux extérieurs qui les évacuent par pompage vers le Chott Oum El Raneb, au nord-est de la ville.

Cependant, le système de drainage actuel n'est pas suffisamment efficace pour réduire le niveau de la nappe phréatique, ce qui affecte la production des palmiers. Pour améliorer l'oxygénation et surélever les palmiers au-dessus du niveau de la nappe, certains agriculteurs ajoutent une couche de sable de 20 à 30 centimètres d'épaisseur.

IV.5.4. Prélèvement d'eau (Captage)

Dans la région d'Ouargla, les principales nappes exploitées sont le Continental Intercalaire (Albien) et le Complexe Terminal (Mio-Pliocène et Sénonien). En revanche, la nappe phréatique est peu utilisée, sauf dans des cas spécifiques comme Bor El Haicha et Hassi-Miloud. Actuellement, 274 forages sont en service, principalement pour la nappe du Complexe Terminal, fournissant de l'eau aux réseaux domestiques et d'irrigation.

IV.6. Agriculture

La région d'Ouargla est extrêmement aride, avec des températures élevées, une forte évaporation, des vents sableux et très peu de pluie, rendant l'agriculture impossible sans irrigation. L'agriculture y est dominée par le système oasien, principalement la phoeniciculture, couvrant plus de 2 000 hectares avec plus de 680 000 palmiers dattiers. Cela place l'Algérie au cinquième rang mondial pour la production de dattes.

L'utilisation des terres agricoles à Ouargla dépend de la disponibilité de l'eau, provenant de puits ou de forages. La région bénéficie de deux atouts essentiels pour l'agriculture :

Une abondance d'eau dans certaines zones, bien que son utilisation soit strictement réglementée.

De vastes étendues de sol nécessitant des améliorations pédogénétiques.

L'État encourage le développement agricole par la création de petites exploitations et de grands périmètres irrigués, nécessitant des investissements en infrastructures d'irrigation, drainage, électrification et autres.

L'agriculture est la principale source de revenus et stabilise les populations locales, mais dans les oasis, elle reste de subsistance et ne couvre pas les besoins fondamentaux des habitants.

Cela pousse les jeunes à quitter la région pour des emplois dans d'autres secteurs, notamment l'industrie pétrolière.

IV.6.1. Production agricole des palmiers et leur superficie

La majeure partie des terres agricoles de la région d'Ouargla se situent dans la cuvette et ses environs, et sont principalement dédiées à la culture des palmiers dattiers. Ainsi, la production de dattes est classée en tant que catégorie 1 (une) de production par la Direction des Services Agricoles (DSA). Ces terres sont irriguées, et les spécificités de la production sont détaillées dans le tableau suivant :

Tableau IV. 5. La production des diverses zones dans la région de Ouargla

	Région	Surface occupée (Ha)	Nombre des palmeraies existe	Nombre Palmeraie en rapport	Production qx
1	Ouargla	1696	293219	288285	128530
2	Rouissat	438	116087	109865	48500
3	Sidi khouiled	799	54001	39772	28229
4	Ain-El Beida	163.1	216671	178746	97866
5	Hassi-ben Abdella	1961.98	176317	50860	35281
6	N'goussa	1630.62	163733	129118	730638

Source DSA 2008

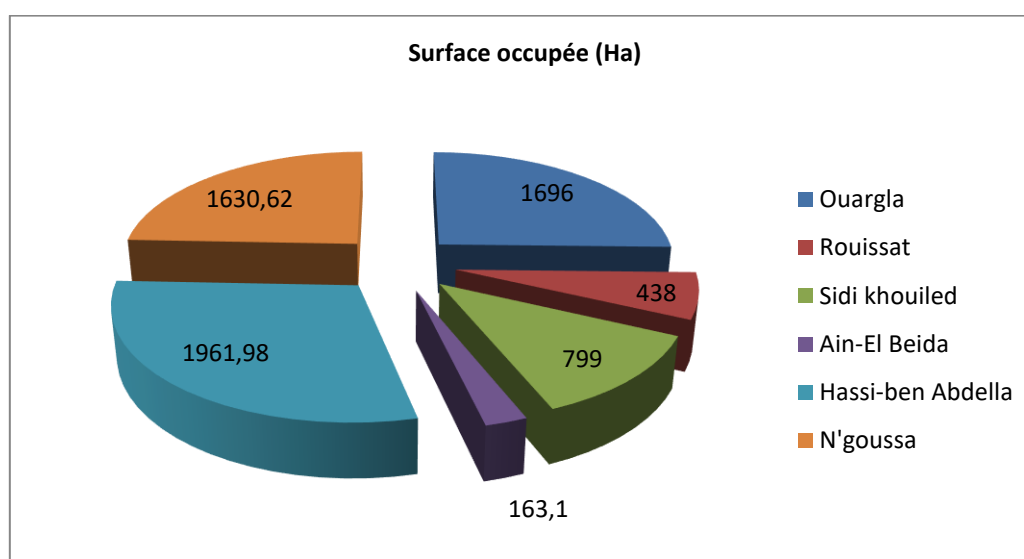


Figure IV. 3. La superficie des palmerais des diverses zones dans la région de Ouargla

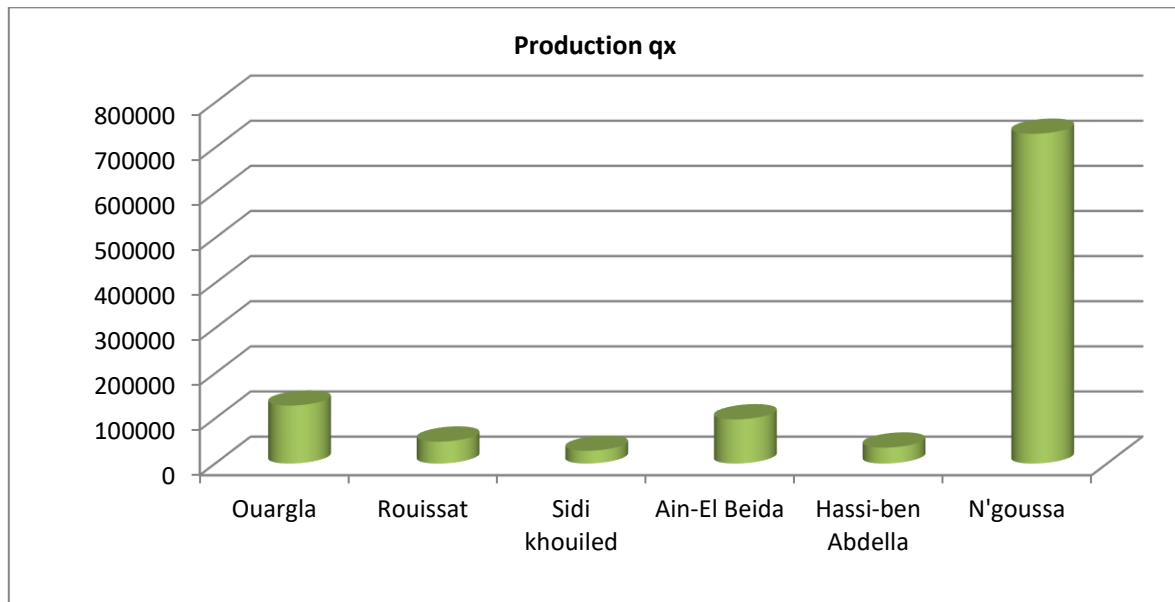


Figure IV. 4. La production des diverses zones dans la cuvette de Ouargla

IV.7. Description générale des problèmes

Depuis un certain temps, la région d'El mekhadma est confrontée à un excès d'eau, entraînant des problèmes écologiques tant dans les zones urbaines que rurales. Les fluctuations saisonnières du niveau de la nappe phréatique provoquent souvent des affaissements du sol. Dans les zones agricoles, la nappe phréatique crée un environnement anaérobie qui nuit aux cultures, y compris aux palmiers. Au cours de la dernière décennie, le niveau piézométrique de la nappe a régulièrement augmenté, atteignant désormais un seuil critique.



Figure IV. 5. Le problème de la salinité et l'excès d'eau

La situation actuelle pose d'importants défis dans ma région d'étude. La présence d'eau stagnante, parfois en surface, avec une forte salinité, menace la pérennité des palmiers et de l'agriculture oasienne dans son ensemble. De plus, les eaux usées non traitées déversées directement dans les principaux canaux de drainage (Est et Ouest) ne sont pas pompées pour être évacuées vers un point d'exutoire, ce qui entraîne une stagnation et constitue ainsi une grave source de pollution environnementale.

IV.7.1. Facteurs contribuant à la remontée de la nappe phréatique

- Pertes dans le réseau d'Approvisionnement en Eau Potable (AEP).
- Pertes dans le réseau d'assainissement.
- Systèmes d'assainissement autonome.
- Irrigation non régulée des palmiers.
- Absence d'exutoire naturel.
- Topographie extrêmement plate.
- Manque d'un réseau de drainage adéquat pour les palmiers, ainsi qu'une insuffisance à cet égard.



Figure IV. 6. Décharges et rejets anarchiques des déchets d'urbanisme dans des palmeraies



Figure IV. 7. Stagnation des eaux dans les palmeraies

IV.8. Conclusion

Ce chapitre représente une synthèse complète de l'analyse approfondie des défis associés à la montée de la nappe phréatique dans la localité d'El mekhadma. Nous avons examiné ces questions sous différents angles afin de fournir une vue d'ensemble précise de l'ensemble du réseau, comprenant une évaluation détaillée de ses paramètres hydrauliques. Notre objectif était d'atteindre une compréhension exhaustive et précise de ces aspects cruciaux.

Notre démarche visait à assurer le fonctionnement optimal du réseau en mettant en évidence les éléments nécessaires à sa performance maximale. Notre engagement à analyser minutieusement les calculs et les aspects hydrauliques a contribué à éclairer les approches permettant de résoudre ces problèmes de manière plus efficace et fonctionnelle

CHAPITRE V

Calcul des besoins hydrauliques

CHAPITRE V : Calcul des besoins hydrauliques

V.1. Introduction

L'agriculture dans les régions arides, comme celle d'El Mekhadma, dépend fortement de la gestion efficace des ressources en eau. Dans ce chapitre, nous nous concentrons sur l'évaluation précise des besoins hydriques des palmiers dattiers, culture prédominante dans cette région. L'objectif est de déterminer la quantité d'eau nécessaire pour assurer une irrigation optimale, tout en minimisant les pertes. Pour ce faire, nous analysons l'impact des précipitations, l'évapotranspiration, et les caractéristiques spécifiques du climat local. Ce calcul des besoins en eau est un élément clé pour garantir la durabilité des pratiques agricoles tout en préservant les ressources hydriques limitées de la région.

V.2. Influence des irrigations

V.2.1. Besoins en eau pour la culture des palmiers

Dans cette partie, notre attention sera portée sur l'évaluation des besoins en eau spécifiques à la culture des palmiers. Nous utiliserons les données préalablement recueillies, en particulier les volumes d'eau et les moments d'irrigation requis tout au long du processus de croissance des palmiers. Notre principal objectif est de corriger le manque d'eau au niveau de la couche supérieure du sol, en tenant compte des conditions de culture des palmiers dans la région.

V.2.2. Évaluation des prélèvements

En raison de la multitude de facteurs susceptibles d'influencer l'évapotranspiration, des méthodes simplifiées ont été élaborées pour estimer les volumes d'eau absorbés par les plantes et l'évaporation dans la zone racinaire.

- Référence d'évapotranspiration.
- Évapotranspiration maximale.

V.2.2.1. Concept d'évapotranspiration de référence (ET₀)

L'évapotranspiration de référence (ET₀) désigne la quantité maximale d'eau absorbée par une culture de référence, typiquement du gazon, qui couvre entièrement le sol avec une hauteur uniforme de quelques centimètres. Cette évaluation repose sur deux hypothèses fondamentales :

- La culture est à son stade de développement végétatif maximal.
- Le sol est suffisamment pourvu en eau, c'est-à-dire qu'il a atteint sa capacité maximale de rétention d'eau.

L'ET0 est calculée principalement à l'aide de formules empiriques, parmi lesquelles on trouve :

- La formule de Blaney-Criddle.
- La formule de Thornthwaite.
- La formule de Turc.
- La formule de Penman.
- La formule de Bouchet.
- La formule de Penman-Monteith, et bien d'autres.

Exemples de formules de calcul d'ET0 :

- **Formule de BLANEY-CRIDDLE :**

$$ET0 = (8.13 + 0.46T) \times P$$

- ✓ **ET0** : évapotranspiration de référence en mm/moi
- ✓ **T** : température moyenne mensuelle, en°C
- ✓ **P** : pourcentage d'éclairement (en fonction de la latitude)

- **Formule TURC :**

$$ET0 = 0.4 (Rs + 50) (t/t + 15)$$

Rs : Radiation globale, en cal/cm²j.

Si Rs n'est pas connu :

$$Rs = Ra(0.18 + 0.62(n/N))$$

- ✓ **Ra** : rayonnement extra-terrestre, en cal/cm²
- ✓ **N** : durée astronomique possible d'insolation (W/mois)
- ✓ **n** : durée d'insolation effective (W/mois)
- ✓ **Ra et N** : en fonction de latitude du lieu uniquement

- **Méthode de M. PENMAN & MONTHEIT modifiée :**

La formule révisée de Penman & Monteith incorpore l'influence de la vitesse du vent, en plus d'intégrer des ajustements supplémentaires qui prennent en compte les conditions météorologiques diurnes et nocturnes.

Des observations ont montré que cette version modifiée permet de prédire avec précision l'évapotranspiration de référence, non seulement dans des régions humides et fraîches comme l'Angleterre, mais également dans des zones très chaudes et semi-arides. La formulation révisée de la méthode de Penman & Monteith est la suivante :

$$ET_0 = C * [W * R_n + (1 - W) * F(u) * (e_a - e_d)]$$

- ✓ **ET₀** : Représente l'évapotranspiration de référence, exprimées en mm/jour.
- ✓ **W** : Facteur de pondération rendant compte de l'effet de rayonnement à différente température et altitude.
- ✓ **R_n** : Rayonnement net en évaporation équivalente, exprimée en mm/jour.
- ✓ **F(u)** : Fonction liée au vent.
- ✓ **e_a** : Tension de vapeur saturante à la température moyenne de l'air, en millibars.
- ✓ **e_d** : Tension de vapeur réelle moyenne de l'air exprimée en millibars.

La différence(e_a-e_d) constitue le facteur de correction, afin de compenser les conditions météorologiques diurnes et nocturnes.

V.2.2.2. Évapotranspiration maximale (ETM)

L'évapotranspiration réelle est soumise à l'influence de nombreux facteurs, notamment le type de culture, le stade de développement, la santé des plantes, la disponibilité en eau, la fertilité du sol, entre autres.

En ce qui concerne l'irrigation, l'objectif est de maximiser les conditions de croissance des plantes en déterminant les besoins en eau en se basant sur la valeur de l'évapotranspiration maximale (ETM).

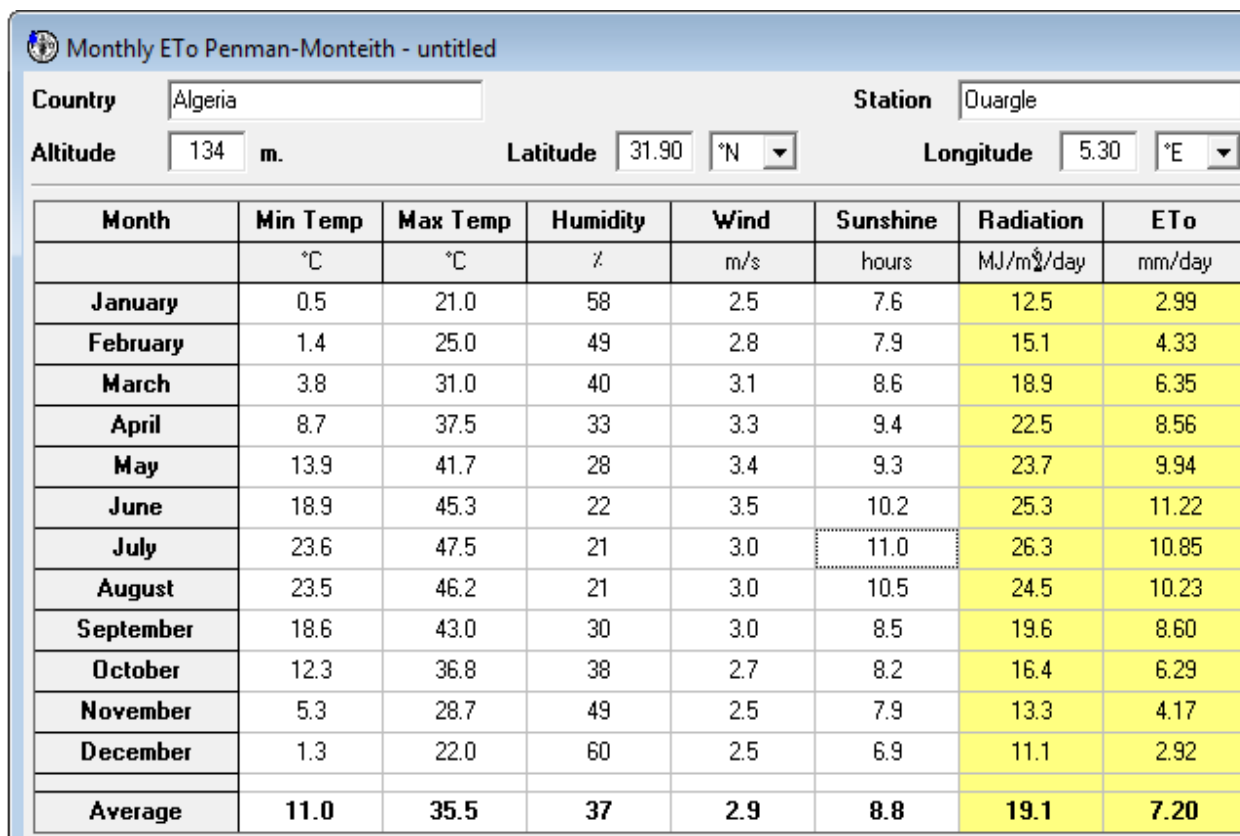
$$ETM = K_c * ET_0$$

Avec : K_c coefficient cultural.

Tableau V. 1. Valeurs du coefficient (K_c) pour le palmier dattier (DOORENBOS et PRUITT, 1977)

Mois	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jui	Jul	Aou	Sép	Oct	Nov	Déc
K_c	0,80	0,85	0,90	0,95	1,00	1,00	1,00	1,00	0,90	0,85	0,85	0,80

L'évaluation de l'évapotranspiration de référence est réalisée à l'aide d'un logiciel appelé CROPWAT 8. Cette méthode repose sur la formulation révisée de Penman & Monteith, une approche recommandée par des spécialistes lors d'une réunion de consultation de la FAO qui s'est déroulée à Rome en mai 1990.



Monthly ETo Penman-Monteith - untitled

Country: Algeria Station: Ouargle

Altitude: 134 m. Latitude: 31.90 °N Longitude: 5.30 °E

Month	Min Temp °C	Max Temp °C	Humidity %	Wind m/s	Sunshine hours	Radiation MJ/m ² /day	ETo mm/day
January	0.5	21.0	58	2.5	7.6	12.5	2.99
February	1.4	25.0	49	2.8	7.9	15.1	4.33
March	3.8	31.0	40	3.1	8.6	18.9	6.35
April	8.7	37.5	33	3.3	9.4	22.5	8.56
May	13.9	41.7	28	3.4	9.3	23.7	9.94
June	18.9	45.3	22	3.5	10.2	25.3	11.22
July	23.6	47.5	21	3.0	11.0	26.3	10.85
August	23.5	46.2	21	3.0	10.5	24.5	10.23
September	18.6	43.0	30	3.0	8.5	19.6	8.60
October	12.3	36.8	38	2.7	8.2	16.4	6.29
November	5.3	28.7	49	2.5	7.9	13.3	4.17
December	1.3	22.0	60	2.5	6.9	11.1	2.92
Average	11.0	35.5	37	2.9	8.8	19.1	7.20

Figure V. 1. Interface du logiciel CROPWAT8.

Pour utiliser le logiciel, il est crucial de fournir les données mensuelles provenant de la station météorologique. La méthode sélectionnée repose sur des données homogènes et fiables, telles que définies dans le chapitre 1.

- **Température** = Les températures moyennes sont données en degré Celsius.
- **Humidité de l'air** = L'humidité relative de l'air exprimé en pourcentage de (10 à 100).
- **Insolation journalière** = L'insolation journalière donnée en heures d'insolation de (1 à 20).
- **Vitesse de vent** = La vitesse du vent peut être introduite en m/sec de (0 à 10).

Les résultats de l'évapotranspiration de références sont récapitulés dans le tableau suivant

:

Mois	T moy	Humidité	Vent	Insolation	Radiation	ET0
	C°	%	m/s	(hours)	MJ/m ² /j	mm/j
Janvier	11.09	58.73	2.57	7.6	12.5	2.99
Février	13.21	49.25	2.82	7.9	15.1	4.33
Mars	17.45	40	3.13	8.6	18.9	6.35
Avril	23.09	33.34	3.38	9.4	22.5	8.59
Mai	27.85	28.3	3.41	9.3	23.7	9.94
Juin	32.06	22.03	3.5	10.2	25.3	11.22
Juillet	35.55	18.08	3.14	11	26.3	10.85
Août	34.91	21.27	3.04	10.5	24.5	10.23
Septembre	30.85	30.39	3.06	8.5	19.6	8.60
Octobre	24.59	38.89	2.69	8.2	16.4	6.29
Novembre	17.01	49.17	2.58	7.9	13.3	4.17
Décembre	11.68	60.2	2.54	6.9	11.1	2.92
Moyen	23.71	37	2.9	8.8	19.1	7.20

V.3. L'impact de l'oasis

D'après les conclusions de l'étude réalisée par Toutain (1990), une diminution de la consommation d'eau a été observée pour les cultures cultivées sous les palmiers. En effet, les cultures sous les palmiers nécessitent moins d'eau que celles en plein champ, surtout lorsque la densité de la couverture des palmiers est élevée. Cette réduction s'explique par l'amélioration des conditions climatiques sous le couvert des palmiers, entraînant ainsi une baisse de l'évapotranspiration réelle (ETR).

Par conséquent, nous incluons le coefficient de réduction de l'évapotranspiration potentielle (ETP) proposé par Toutain. Dans le cas d'une palmeraie dense de 6 mètres sur 6 mètres, la réduction de l'évapotranspiration est estimée à 40%.

V.4. Analyse des données de précipitations

Dans le dessein d'évaluer le déficit de précipitations pour les besoins en eau d'irrigation, une analyse statistique a été entreprise dans le but de déterminer la proportion des précipitations qui véritablement contribue à répondre aux besoins en eau d'une culture spécifique.

Tableau V. 2. Pluies totale mensuelles moyennes

Mois	JAN	FEB	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SEP	OCT	NOV	DEC
P (mm)	11,7	2,14	6,26	5,12	5,48	0,19	0,16	1,49	5,52	6,27	6,53	4,78

V.5. Calcul de la précipitation efficace

Pour tenir compte des pertes, l'utilisation du programme Cropwat 8 nous permettra de calculer la précipitation efficace. Celle-ci est définie comme la partie des précipitations qui contribue réellement à répondre aux besoins en évapotranspiration de la culture, après avoir déduit les pertes dues au ruissellement de surface et à l'évaporation.

Tableau V. 3. Pluies totale mensuelles moyennes

Mois	ET0	Pluie moy	Pluie efficace
	mm/j	mm	mm
Janvier	2.99	11.7	8.2
Février	4.33	2.1	1.5
Mars	6.35	6.3	4.4
Avril	8.59	5.1	3.6
Mai	9.94	5.5	3.8
Juin	11.22	0.2	0.1
Juillet	10.85	0.2	0.1
Août	10.23	1.5	1.0
Septembre	8.60	5.5	3.9
Octobre	6.29	6.3	4.4
Novembre	4.17	6.5	4.6
Décembre	2.92	4.8	3.3
	Totale	55.6	38.9

V.6. Besoin en eau des palmiers dattiers

Les exigences en eau des cultures sont déterminées par leur évapotranspiration maximale (ETM), visant à assurer que les plantes ne subissent pas de stress hydrique, préférablement satisfaites par l'irrigation (Young, 1995 ; Czarnes et al., 2000 ; Whalley et al., 2005). Pour la région d'Ouargla, nous avons utilisé CROPWAT 8 pour calculer l'évapotranspiration potentielle (ETP) ainsi que l'ETM. Les valeurs obtenues représentent une moyenne annuelle sur la période de 1990-2021 (Tableau 23).

En général, les valeurs de l'ETP dictent la fréquence des irrigations (Ollier et Poirée, 1983). Plus l'ETP est élevé (notamment en mai, juin, juillet et août), plus la fréquence d'irrigation est ajustée en conséquence (Dubost, 1992).

Tableau V. 4. Estimation des besoins en eau des palmiers dattiers à Ouargla

Mois	ETP (mm)	KC	ETM (mm)
Janvier	92.69	0,80	74.15
Février	121.24	0,85	103.05
Mars	196.85	0,90	177.16
Avril	257.7	0,95	244.81
Mai	308.14	1,00	308.14
Juin	336.6	1,00	336.6
Juillet	336.35	1,00	336.35
Août	317.13	1,00	317.13
Septembre	258	0,90	232.2
Octobre	194.99	0,85	165.74
Novembre	125.10	0,85	106.34
Décembre	90.52	0,80	72.42

✓ **Interprétation**

Quand les niveaux d'évapotranspiration potentielle (ETP) sont élevés, il devient crucial d'entreprendre des lessivages saisonniers réguliers sur les sols salins afin de limiter l'accumulation excessive de sels nocifs (Dutil, 1960). Cette nécessité met en avant l'importance d'une considération minutieuse lors de la conception des systèmes de drainage (Daeshiner, 1985).

- Les parcelles sont irriguées avec des dimensions de 50 mètres de longueur sur 4 mètres de largeur, comme représenté dans (le schéma 1). Chaque irrigation est réalisée toutes les 6 jours.
- Les agriculteurs pratiquent 5 irrigations par mois, avec une fréquence d'irrigation de 6 jours. Il est à noter que les méthodes de culture des palmiers dans ces palmeraies sont principalement traditionnelles, avec une distance entre les palmiers variant généralement de 5 à 6 mètres pour la plupart des parcelles.

Par conséquent, la dose d'arrosage est calculée comme suit :

$$D = B / (\text{Nombre d'irrigations}). \implies D = 336.6 / 5$$

Alors on obtient : **D = 67.32 mm**

La dose d'irrigation corrigée, notée D_{oasis} , est obtenue en multipliant D par 0.6, ce qui équivaut à 40.39 mm.

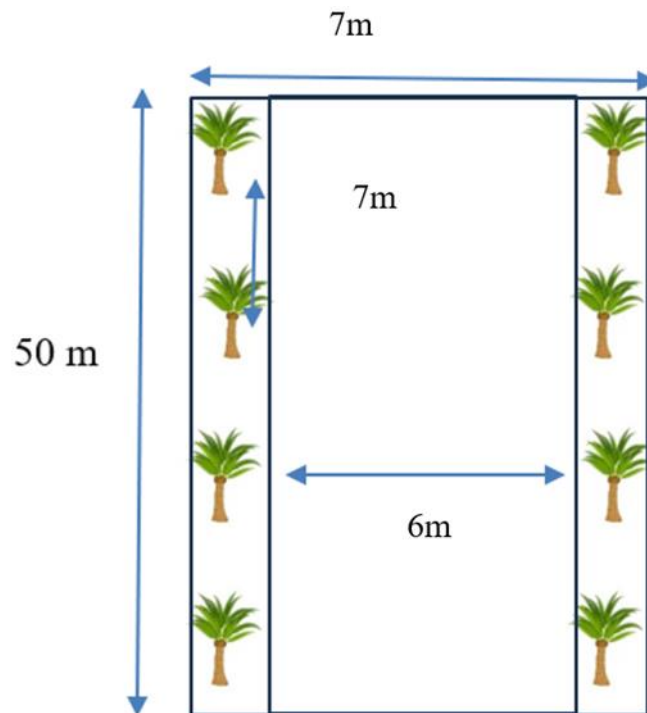


Figure V. 2. Schéma de projection de réseau d'irrigation

V.7. Programme d'irrigation de la palmeraie et gestion des pertes hydriques

Dans le cadre du programme d'irrigation de la palmeraie, nous avons appliqué une dose de 40,39 mm, équivalente à 403,9 m³/ha. Cette irrigation est réalisée par planche, avec un rendement compris entre 50 % et 55 % dans un sol de type sablonneux, ce qui entraîne une perte d'eau de 50% à 45%.

Pour calculer le volume net (I_d) délivré après ces pertes, nous utilisons la formule suivante

$$I_d = (404.1 * 100) / 55$$

Cependant, pour obtenir le volume brut (B_{brute}), nous divisons le volume net par le rendement.

Sur ce volume brut de 734,36 m³/ha, il est important de considérer les pertes dues à la percolation et à l'évapotranspiration (ETP), ce qui nous permet de déterminer les pertes totales.

$$\text{Pertes totales} = 734.36 - 403.9 = \mathbf{330.46 \text{ m}^3/\text{ha.}}$$

V.7.1. Les pertes spécifiques

Se répartissent comme suit :

- Pertes pour évaporation : $330.43 \text{ m}^3/\text{ha} * 0.1 = 33.04 \text{ m}^3/\text{ha}$
- Pertes pour percolation : $330.43 \text{ m}^3/\text{ha} * 0.35 = 115.65 \text{ m}^3/\text{ha}$

V.7.2. Calcul du débit critique

L'excédent de débit provient principalement des pertes par percolation dans le sol. Pour calculer ce débit excédentaire (q_c), nous utilisons la formule suivante :

$$q_c = \text{pertes percolation} / \text{Nbr j.} \implies q_c = 23.13 \text{ m}^3/\text{j}$$

Ce débit de $23,13 \text{ m}^3/\text{jour}$ représente l'excès d'eau dû aux pertes par percolation sur une base quotidienne. Cette valeur est cruciale pour la gestion et l'optimisation de l'irrigation dans la palmeraie.

V.7.3. Lessivage des sols

Le lessivage est une pratique agricole consistant à fournir aux cultures des quantités d'eau excédentaires par rapport à leurs besoins hydriques fondamentaux. Cette méthode vise à déplacer les sels dissous dans le sol vers des couches plus profondes, les éloignant ainsi de la zone racinaire des plantes.

Le lessivage est essentiel pour maintenir la salinité du sol à un niveau optimal. Toutefois, il est important de noter que, dans la plupart des cas, le lessivage doit être accompagné d'un système de drainage, en particulier en présence de la nappe phréatique, pour garantir son efficacité.

V.7.3.1. Rôle du lessivage

Dans les cultures irriguées, le lessivage vise à éliminer les sels accumulés dans la zone du sol où les racines sont actives. Ces sels peuvent être naturellement présents ou introduits par les eaux d'irrigation.

Pour mettre en œuvre le processus de lessivage, deux éléments sont nécessaires :

Des conditions de drainage interne adéquates, permettant l'évacuation des sels en excès hors de la zone racinaire, ou du moins les maintenant à une profondeur où ils n'affectent pas les cultures.

Une connaissance précise de la quantité d'eau supplémentaire requise pour réduire la salinité à un niveau acceptable.

V.7.3.2. Calcul du lessivage d'entretien

Dans cette approche, la dose de lessivage est administrée par fractions en même temps que les doses d'irrigation, ce qui prévient l'accumulation de sels dans le sol tout en les éliminant progressivement. Ainsi, le système d'irrigation existant est utilisé pour appliquer les doses de lessivage en même temps que les doses d'irrigation. En 1972, M. Rhodes a proposé une formule qui permet une évaluation plus méthodique de la fraction de lessivage d'entretien.

$$LR = \frac{EC_w}{5EC_e - EC_w}$$

Suivant la quelle :

- **LR** : Fraction minimal de lessivage d'entretien en%.
- **EC_w** : Conductivité électrique de l'eau d'irrigation (EC_w = 4 mmhos/cm)
- **EC_e** : Conductivité électrique du sol qui provoque une chute de rendement de 10% (d'après la table de FAO)

Il faudra donc à chaque irrigation augmenté la dose de 13%

V.7.3.3. Calcul de la dose de lessivage DL

Les doses de lessivage peuvent également entraîner un excès d'eau dans le sol, ce qui nécessite leur évacuation et une comparaison avec les pertes par percolation. Il est primordial de surveiller attentivement ces doses de lessivage afin de maintenir un équilibre hydrique approprié dans le sol et d'éviter tout risque de saturation.

Donc la dose de lessivage est :

$$DL = B * C_{eiw} / C_{ees} (1 - LR).$$

Avec : C_{ees} = 6 mmhos/cm

$$DL = 387.04 \text{ m}^3 = 38.704 \text{ mm}$$

Donc :

$$qsp = 38.704 / 7 = 5.52 \text{ mm / j}$$

V.8. Conclusion

En résumé, il est important de souligner que le débit spécifique du lessivage est supérieur à celui des pertes par percolation résultant de l'irrigation. Par conséquent, nous allons prendre en compte cette valeur lors de la conception du débit de drainage.

CHAPITRE VI

Dimensionnement du réseau de drainage

CHAPITRE VI : Dimensionnement du réseau du drainage

VI.1. Introduction

Le drainage est le processus d'évacuation des eaux excédentaires, qu'elles soient en surface ou souterraines, à l'aide de méthodes naturelles ou artificielles. Son principal objectif est de rendre un terrain trop humide ou inondé utilisable pour des activités telles que l'agriculture, l'élevage ou la construction.

Le drainage joue un rôle essentiel en régulant l'excès d'humidité du sol, causé soit par la nature même du sol, soit par la proximité de sources d'eau ou de nappes phréatiques. Un excès d'humidité peut entraîner divers problèmes : diminution de l'activité biologique du sol, conditions thermiques défavorables à la croissance des cultures, vulnérabilité accrue des plantations à la sécheresse, moindre efficacité des engrais, manque d'oxygène provoquant l'asphyxie des racines, dégradation des particules du sol, et instabilité générale du terrain.

VI.2. Avantages de l'Assainissement du Sol

- Amélioration de l'aération du sol.
- Renforcement de la structure du sol.
- Facilitation de la pénétration profonde des racines.
- Accélération de la montée en température du sol.
- Augmentation des processus de nitrification.
- Réduction des mauvaises herbes et des maladies des cultures.
- Possibilité d'accéder aux parcelles en temps opportun.
- Augmentation du rendement des cultures et amélioration de la qualité des récoltes.

VI.3. Drainage par fosses à Ciel Ouvert

Cette technique consiste à creuser régulièrement des tranchées dans le sol, atteignant des profondeurs de 2 mètres ou plus, avec une largeur de 0,3 à 0,5 mètre.

VI.3.1. Le rôle des fosses

- Intercepter le ruissellement de surface et évacuer l'excès d'eau de la surface.
- Créer un gradient hydraulique permettant à l'eau de s'écouler naturellement du sol vers le fossé de drainage.

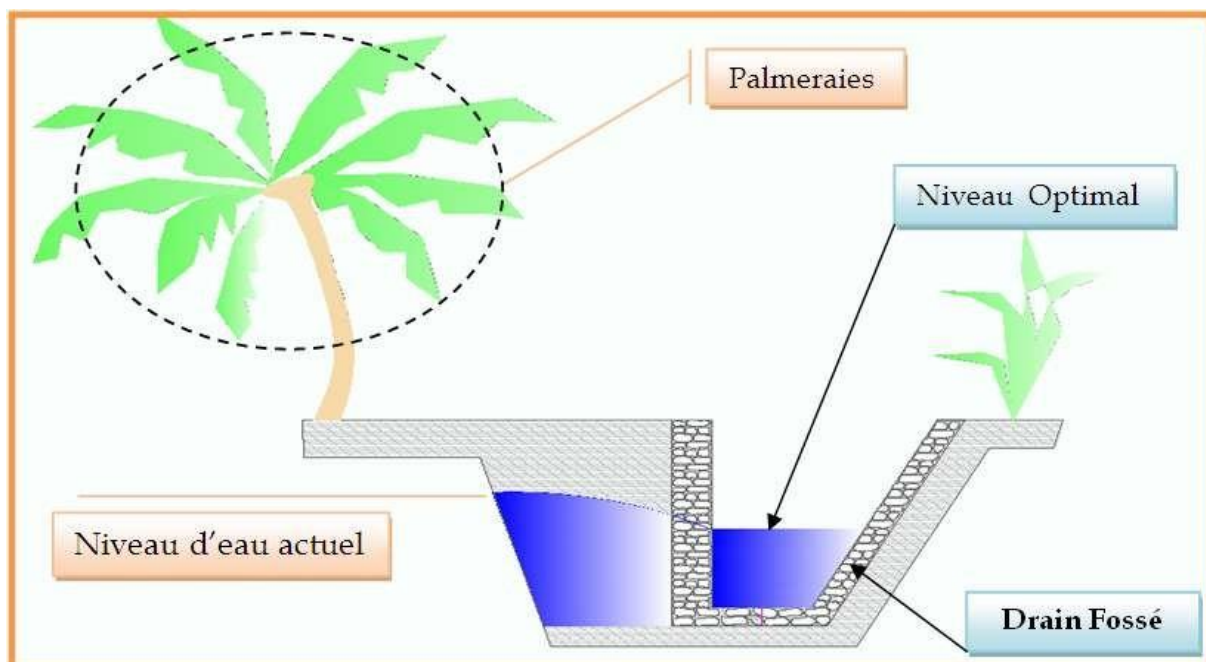


Figure VI. 1. Schéma du principe drainage par fossé



Figure VI. 2. Drainage par fossé OUARGLA

VI.4. PROFONDEUR DES DRAINS

La profondeur des fossés ou des drains est principalement déterminée par deux facteurs essentiels : la profondeur des racines des cultures concernées et la topographie du terrain. Dans notre situation, nous avons choisi une profondeur de 2 mètres pour les fossés, car les racines des palmiers atteignent généralement environ 1,5 mètre de profondeur. Cependant, il est

important de noter que plusieurs considérations techniques et économiques influencent notre choix, limitant ainsi la profondeur des fossés.

VI.4.1. Niveau de rabattement de la nappe

Étant donné que la nappe phréatique se situe généralement à environ 0,5 mètre sous la surface du sol dans des conditions défavorables, notre objectif de rabattement vise à l'abaisser à une profondeur de 1,55 mètre à l'aide d'un système de drainage. Il est donc nécessaire de réduire le niveau de la nappe de 1,05 mètre (la différence entre 0,5 mètre et 1,55 mètre) pour atteindre cet objectif.

0.5m =====> le niveau actuel

1.55m =====> le niveau à atteindre

Donc le pourcentage de rabattement est de 70%.

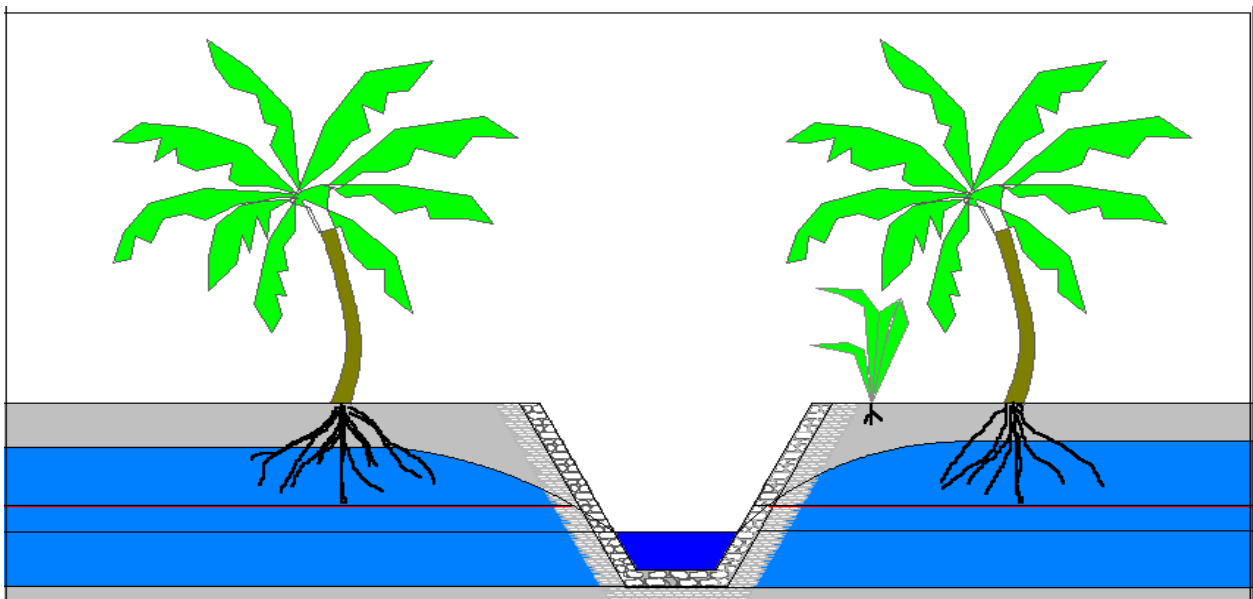


Figure VI. 3. Schéma explicatif de système de drainage à faire.

VI.4.1.1. Niveau d'eau (h)

Pour concevoir un système de drainage efficace, il est primordial de déterminer la profondeur nécessaire pour abaisser la nappe phréatique (h). Dans notre zone de projet, majoritairement peuplée de palmiers dattiers, il est crucial de maintenir la nappe phréatique entre 1,50 mètre et 2,00 mètres de profondeur. Ainsi, l'objectif initial est de l'abaisser à environ 1,55 mètre. Il est important de noter que cette valeur constitue une référence de départ et pourra être ajustée en fonction des spécificités du terrain.

VI.4.2. Calcul de L'écartement théorique

En théorie, la distance entre les drains peut être calculée en utilisant les équations du régime permanent.

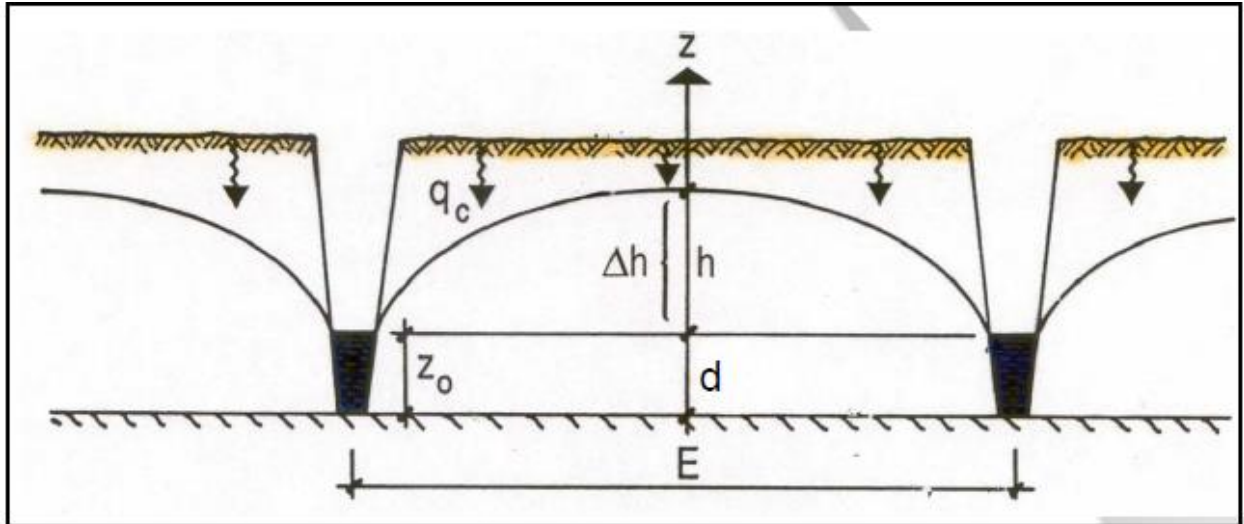


Figure VI. 4. Les paramètres intéressant pour calculer l'écartement

Pour le calcul de l'écartement nous avons utilisé le logiciel de calcul "drflow" c'est un logiciel qui permet d'utiliser la formule de "HOOGHOUDT"

Avec :

- **E** : Ecartement des drains (m)
- **K** : Perméabilité de terrain (m/j)
- **q** : Module de drainage ou débit à évacuer (mm/j)
- **d** : La profondeur fictive de l'imperméable
- **h** : charge des drains (m)

Nous disposons des données suivantes :

- La perméabilité du sol a été calculée à partir de l'analyse physique du sol, donnant une valeur moyenne de $K=12.38$ cm/heure, soit $K=3$ m/jour.
- Le débit à évacuer est de $q=5.52 \cdot 10^{-3}$ mm/jour.
- Nous avons également la profondeur fictive de la couche imperméable, que nous pouvons exprimer comme $d=Z-P$, où $Z=15$ mètres et $P=2$ mètres, donc $d=13$ mètres.

En utilisant ces valeurs, nous pouvons calculer E comme suit :

$$E= 104 \text{ m}$$

VI.4.3. Largeur du fond (b) du fossé

Pour la largeur du fond (b) des fossés dans le cas général, nous avons choisi une valeur de 0,75 mètre. Cette dimension est couramment recommandée pour le module de drainage, bien qu'elle puisse varier lorsque la hauteur normale dépasse 0,45 mètre (tirant d'eau). Dans notre situation spécifique, nous avons retenu une largeur de 1 mètre pour le fond des fossés.

VI.4.4. Pente des talus m

En ce qui concerne la pente des talus (m) des drains proposés dans ce projet, il est conseillé de choisir des valeurs qui assurent la stabilité. Pour les sols sableux, des pentes de talus de 1 à 1.7 sont recommandées pour les drains collecteurs, tandis que pour les autres drains, des pentes de 0.8 à 1,5 sont préconisées.

VI.4.5. Pente des fossés

La pente de drainage se situe généralement entre 0,3 % et 3 %, sauf dans des cas particuliers imposés par la topographie.

VI.5. Calcul hydraulique

La méthode prédominante pour le calcul de l'écoulement permanent uniforme est couramment référencée par la formule de Manning.

$$Q = \left(\frac{1}{n}\right)R^{2/3} \times i^{1/2} \times \omega$$

- **Q** : Débit véhiculé par le drain en (m³/s)
- **R** : Rayon hydraulique en (m)
- **ω** : Section mouillée en (m²)
- **i** : Pente en (m/m)
- **n** : Coefficient de rugosité n=0.025 pour les drains dans moyennes conditions.

Avec :

$$R = \omega / \chi$$

- **R** : Rayon Hydraulique en (m)

- ω : Section mouillée en (m²)
- χ : Périmètre mouillé en (m)

Pour une section trapézoïdale on :

$$\omega = (b + m + h) \times h$$

$$\chi = b + 2h\sqrt{(1 + m^2)}$$

- m : Pente du talus

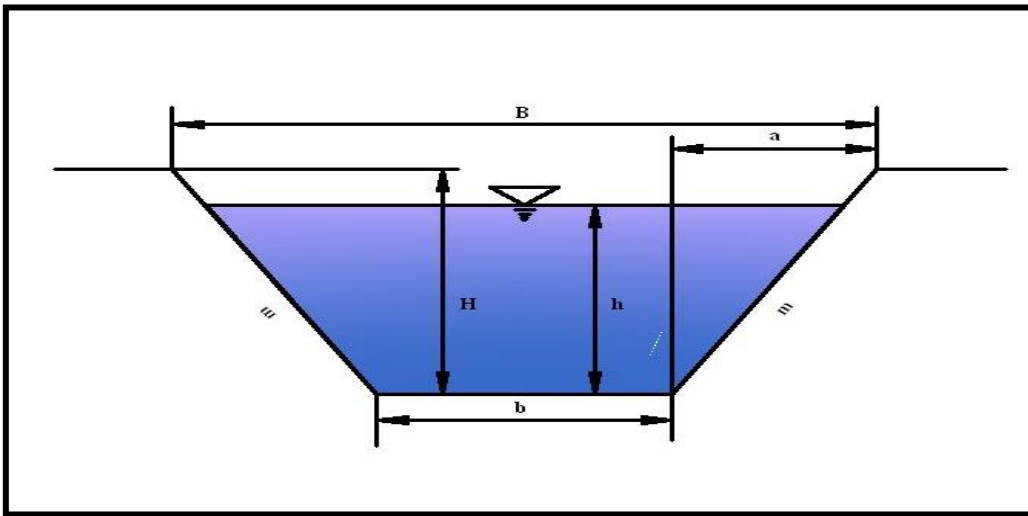


Figure VI. 5. Section transversale trapézoïdale du drain

Sur la figure, il apparaît que des paramètres essentiels tels que le débit Q , la vitesse V , la pente du talus m , et la hauteur d'eau h sont cruciaux pour la stabilité des systèmes de drainage et affectent le comportement de l'écoulement des eaux évacuées.

VI.5.1. Les interventions prévues sur le système de drainage

Dans le cadre de notre intervention sur le système de drainage par fossé pour une parcelle sélectionnée dans la zone d'étude d'El Mekhadma d'une superficie de (200ha), nous prévoyons l'installation de fossés espacés de $E=104$ mètres. Les drains seront conçus conformément au schéma explicatif réalisé avec le logiciel AutoCAD, comme le montre le dessin ci-dessous :

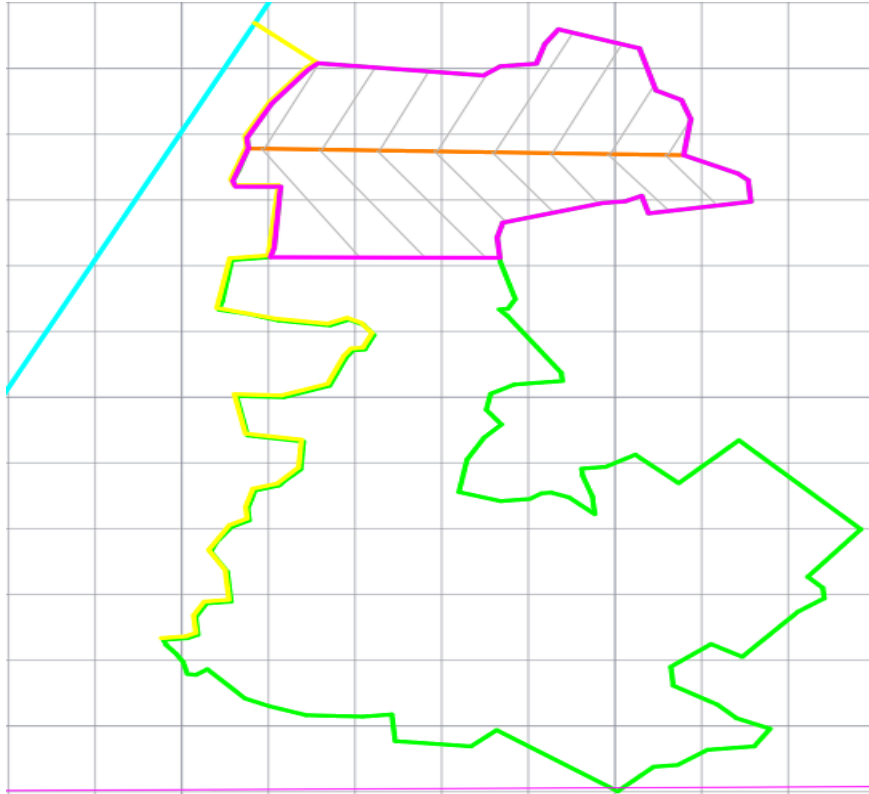


Figure VI. 6. La projection d'un réseau de drainage dans une parcelle

VI.5.2 Estimation de débits de drainage

Les essais effectués sur terrain, nous ont permis de déterminer les débits par la relation suivante :

$$Q = L * E * q_c$$

Avec :

q_c : le débit spécifique (mm/j)

L : la longueur du drain (m)

E : l'écartement (m)

Les résultats des débits sont présentés dans le tableau ci-dessous :

Tableau VI. 1. Les débits de drainage du collecteur principale 1

Drains	L(m)	Q(m3/j)	l/s
1	322	184,92	2,14
2	212	121,76	1,41
3	313	179,54	2,08
4	321	184,2	2,13
5	173	99,57	1,15
6	153	87,66	1,01
7	182	104,24	1,21
8	151	86,59	1,00
9	209	120,08	1,39
10	204	116,88	1,35
11	227	130,2	1,51
12	218	124,99	1,45
13	182	104,21	1,21
14	95	54,32	0,63
15	318	182,53	2,11
16	286	164,28	1,90
Collecteur p1	785	2045,97	23,68

Tableau VI. 2 : Les débits de drainage du collecteur secondaire 1

Drains	L(m)	Q(m3/j)	l/s
1	314	180,26112	2,08635556
2	365	209,5392	2,42522222
3	390	223,8912	2,59133333
4	398	228,48384	2,64448889
Collecteur s1	497	842,17536	9,7474

Tableau VI. 3 : Les débits de drainage du collecteur secondaire 2

Drains	L(m)	Q(m3/j)	l/s
1	130	74,6304	0,86377778
2	131	75,20448	0,87042222
3	130	74,6304	0,86377778
4	382	219,29856	2,53817778
5	229	131,46432	1,52157778
6	108	62,00064	0,7176
7	129	74,05632	0,85713333
8	158	90,70464	1,04982222
9	130	74,6304	0,86377778
10	301	172,79808	1,99997778

11	116	66,59328	0,77075556
12	178	102,18624	1,18271111
13	207	118,83456	1,3754
14	254	145,81632	1,68768889
Collecteur s2	730	1482,84864	17,1626

Tableau VI. 4 : Les débits de drainage du collecteur principale 1

Drains	L(m)	Q(m ³ /j)	l/s
1	288	165,33504	1,9136
2	375	215,28	2,49166667
3	340	195,1872	2,25911111
4	299	171,64992	1,98668889
5	367	210,68736	2,43851111
6	326	187,15008	2,16608889
7	359	206,09472	2,38535556
8	377	216,42816	2,50495556
Collecteur s1	497	842,17536	9,7474
Collecteur s2	730	1482,84864	5,13615556
Collecteur P2	1269	3892,83648	45,0559778

VI.5.3. Profils en long

Le profil en long du collecteur des drains, créé pour protéger la région d'El Mekhadma contre la remontée de la nappe phréatique, a été développé avec le logiciel COVADIS. Les détails de ce profil en long, élaboré dans le cadre du projet, sont inclus et annexés aux planches.

VI.6. Conclusion

En conclusion, le projet de drainage par fossé et de collecteur vers le drain principal de l'EST ne se limite pas à résoudre le problème de la remontée de la nappe phréatique, mais il contribue également de manière significative au développement agricole le long du collecteur.

CHAPITRE VII

Gestion, entretien et exploitation

du réseau

CHAPITRE VII : Gestion, entretien et exploitation du réseau

VII.1. Introduction

Le réseau de drainage se divise en deux systèmes principaux : les réseaux de drainage parcellaire et un réseau central qui entoure la ville. Ce dernier, relié à la station de pompage d'Oum Rneb, évacue les eaux dans la sebkha de Safioune.

La mise en service progressive de ce réseau est une étape clé. Il est essentiel que les travaux soient finalisés, le fonctionnement du réseau vérifié et les dispositifs d'évacuation testés. Une gestion optimale repose sur la durabilité des infrastructures et une maintenance régulière, en tenant compte des contraintes spécifiques comme l'accessibilité des ouvrages.

VII.2. Acquisition des informations sur le réseau

La première étape d'une gestion efficace du système de drainage consiste à rassembler des informations détaillées, incluant :

- Le tracé exact du réseau.
- Les caractéristiques hydrauliques telles que le débit et la vitesse des écoulements.
- Les données topographiques, y compris les pentes et altitudes.

VII.2.1. Suivi du réseau de drainage

La surveillance d'un système de drainage commence par l'établissement d'une fiche d'identité complète. Celle-ci permet d'obtenir une vision claire des caractéristiques du réseau, en fonction des résultats souhaités. Elle comprend :

Les données géographiques et géométriques, telles que la disposition spatiale, les sections du réseau, les altitudes du terrain et des cours d'eau, ainsi que les pentes. Le suivi du réseau poursuit plusieurs objectifs, dont :

- La sécurité du personnel intervenant.
- La gestion efficace des opérations de maintenance.
- La préservation de l'environnement, tant urbain que naturel.

VII.2.2. Élimination des dépôts

Un des problèmes courants des réseaux de drainage est l'accumulation de matières en suspension, notamment du sable. Le nettoyage peut être automatisé grâce à des dispositifs de lavage, bien que leurs capacités soient parfois limitées. Il est donc souvent nécessaire de

recourir à des méthodes de nettoyage hydrodynamique ou, dans certains cas, à un nettoyage manuel.

VII.2.3. Détection des fuites

Les fuites dans un réseau de drainage sont principalement causées par :

- Des fissures dans les collecteurs ou regards.
- Des défaillances des joints d'étanchéité.

VII.2.4. Maintenance des joints

Les infrastructures de drainage subissent parfois des défaillances d'étanchéité ou des ruptures dues à des facteurs comme les mouvements de terrain, les vibrations liées à la circulation ou des agressions chimiques. Ces problèmes surviennent souvent au niveau des joints, qui nécessitent alors une maintenance spécifique. Celle-ci comprend :

- La réparation des joints défectueux.
- L'élimination des infiltrations de racines.
- La restauration des sections corrodées par des déversements chimiques.
- L'amélioration de l'étanchéité pour empêcher les infiltrations d'eau, tant de l'extérieur vers l'intérieur que l'inverse.

VII.2.5. Maintenance par inspection télévisée

Le diagnostic des canalisations non accessibles est une tâche complexe. Lorsque les tronçons entre deux regards dépassent les 40 à 50 mètres, ou que le diamètre est inférieur à 600 millimètres, il est difficile de repérer les anomalies telles qu'un joint endommagé, une fissure, un dépôt ou un corps étranger.

Grâce à l'inspection télévisée, une caméra montée sur un câble est insérée entre deux regards pour visualiser l'intérieur de la canalisation. Cette méthode offre de nombreux avantages :

- Une identification rapide et précise des anomalies, ainsi que leur localisation exacte.
- Une surveillance continue de l'évolution des matériaux des canalisations.
- Une évaluation à long terme des méthodes de pose des conduites.
- Un contrôle des niveaux d'eau souterraine dans le réseau.

- La possibilité de planifier des programmes de nettoyage selon le taux d'encrassement des canalisations.
- Une vérification de l'efficacité des équipements de nettoyage hydrodynamique et la sélection du matériel le plus adapté en fonction des débris.

VII.3. Maintenance et exploitation du réseau

L'exploitation du réseau de drainage couvre l'ensemble des actions nécessaires pour assurer son bon fonctionnement au service des utilisateurs et de la collectivité. La fiabilité des infrastructures et des équipements mécaniques dépend de plusieurs facteurs essentiels :

- 1) **Compréhension des objectifs** : Assurer l'efficacité des installations tout en respectant les normes environnementales et les exigences des milieux récepteurs.
- 2) **Expertise technique** : Maîtriser le fonctionnement et la gestion du réseau pour anticiper les besoins d'extension dus à l'urbanisation.
- 3) **Entretien régulier** : Effectuer des travaux de maintenance sur le réseau et les ouvrages associés pour prévenir les dysfonctionnements.
- 4) **Sécurité et conditions de travail** : Protéger le personnel et améliorer leurs conditions d'intervention.
- 5) **Surveillance des équipements** : Contrôler régulièrement les installations pour garantir que les rejets respectent les normes exigées par les autorités avant de rejoindre l'environnement.
- 6) **Organisation des services** : Optimiser l'utilisation du personnel, des équipements et des ressources, tout en minimisant les coûts et en intégrant des économies d'énergie.

Il est évident que ces exigences d'exploitation sont aussi importantes que la conception des infrastructures.

VII.4. Techniques d'exploitation du réseau

Les réseaux de drainage, caractérisés par des débits à faible vitesse, nécessitent des opérations de curage régulières pour éviter l'accumulation de dépôts. Les méthodes de curage varient en fonction des contraintes, notamment l'accessibilité aux ouvrages. Les principales interventions sont les suivantes :

VII.4.1. Curage mécanique des regards visitables

- 1) **Curage en présence d'eau** : Ce curage utilise une vanne mobile qui se déplace le long de la conduite. La vanne, adaptée à la forme de l'égout, permet de libérer un jet d'eau

sous pression, entraînant les sédiments vers l'aval en fonction de la vitesse de l'eau et des caractéristiques des dépôts.

- 2) **Curage en l'absence d'eau** : Lorsque l'eau est insuffisante pour un curage hydraulique, un nettoyage manuel est effectué à l'aide d'outils comme des bras, des pelles et des pioches.

VII.4.2. Curage des regards non visitables

Pour les égouts non visitables, deux techniques principales sont utilisées : le curage manuel et le curage hydrodynamique.

A. Procédés manuels de curage :

- 1) **Chasse d'eau** : On obstrue la canalisation en amont pour créer un bouchon d'eau, qui est ensuite libéré rapidement, créant une chasse entraînant les dépôts. Cette méthode peut toutefois provoquer des dépôts en amont pendant la retenue.
- 2) **Boule roulante** : Une boule d'environ 50 cm, équipée de bourrelets, est placée dans les collecteurs. En roulant, elle remet en suspension les dépôts qui sont ensuite évacués.

B. Procédés hydrodynamiques de curage :

- 1) **Cureuses hydromécaniques** : Ces machines déplacent les boues en direction de l'aval à l'aide de jets d'eau. Un jet central désagrège les dépôts tandis que des jets latéraux les poussent vers un regard pour être aspirés.
- 2) **Aspiratrices** : Montées sur camions, ces machines créent une dépression dans une cuve et aspirent les boues et dépôts. Elles sont utilisées pour nettoyer les bouches d'égout, les bacs de dessablement et les collecteurs visitables.

Ces techniques de curage assurent le bon fonctionnement des réseaux de drainage, tout en préservant leur longévité et leur efficacité.

VII.5. Réhabilitation du réseau

Lorsqu'un réseau de drainage devient inefficace ou nuisible à l'environnement et à la population, deux solutions s'imposent : la réparation ou le remplacement. Cependant, remplacer un réseau d'assainissement est coûteux et cause plus de perturbations que la réparation. C'est

pourquoi les travaux de réhabilitation sont privilégiés. Les opérations de réhabilitation incluent :

- Fraisage des obstacles.
- Tubage intérieur.
- Graissage des canalisations.
- Injection de produits colmatant.

VII.5.1. Fraisage des obstacles :

Cette technique élimine les racines d'arbres qui ont envahi les conduites par les joints. On utilise une brosse circulaire dure, actionnée par un moteur électrique, pour détruire ces obstacles.

VII.5.2. Injection de produits colmatant

Cette méthode est employée pour les conduites de grand diamètre. Elle consiste à projeter une couche de mortier de ciment ou de résine époxy à l'intérieur de la canalisation. La centrifugation permet d'appliquer un gel qui bouche les fissures ou trous dans la conduite.

VII.5.3. Tubage intérieur

Le tubage intérieur est une méthode utilisée pour les conduites de plus de 1000 mm de diamètre. Il consiste à insérer des tuyaux à l'intérieur de la canalisation existante. Les tuyaux sont ensuite fixés par collage, emboîtement, joints en caoutchouc ou thermo-soudage.

VII.5.4. Gainage extérieur

Cette technique est utilisée pour les canalisations traversant des terrains marécageux ou des sols agressifs. Elle consiste à recouvrir la canalisation d'une gaine étanche, résistante aux produits chimiques, entourée de sable pour faciliter le drainage des eaux stagnantes autour de la conduite.

VII.6. Calcul technico-économique

Les travaux de terrassement sont fondamentaux pour préparer l'infrastructure des projets de génie civil. Ils consistent à créer la base des niveaux inférieurs d'une structure et à assurer un accès optimal. Ces travaux, essentiels dans tout projet de construction, peuvent être vastes, même pour des projets de taille modeste, nécessitant souvent des ressources importantes.

VII.6.1. Définition des terrassements

Le terme « terrassement » désigne l'ensemble des opérations de manipulation du sol, qu'il s'agisse de creuser (déblai) ou de remplir (remblai). Cela inclut des activités telles que l'excavation de tranchées ou de rigoles, et plus généralement, la modification de la topographie. Les travaux de terrassement, qu'ils soient pour des sites industriels, des zones résidentielles ou autres, suivent des étapes de préparation comme l'implantation et le piquetage, pour assurer une précision optimale dans les mouvements de terre.

VII.6.2. Types de terrassements

Il existe deux grandes catégories de terrassements :

- Terrassements généraux.
- Terrassements ordinaires.

VII.6.3. Terrassements ordinaires

Les terrassements ordinaires sont nécessaires pour préparer le terrain avant la réalisation des ouvrages prévus, même si le relief du terrain reste inchangé. Ces travaux se divisent en deux types

- **Excavation (déblais) :** Retrait de la terre pour abaisser le niveau du sol.
- **Remblaiement (remblais) :** Ajout de terre pour élever le niveau du sol.

VII.6.4. Calcul du volume de déblai

Les déblais représentent les volumes de terre extraits lors des fouilles pour les canaux de drainage à ciel ouvert, permettant de préparer le terrain en abaissant son niveau.

Le volume du déblai est : $V = (B + h \times m)h \times L$

Avec :

- **L :** la longueur du drain
- **h :** la profondeur du drain
- **B :** largeur du fossé

Les valeurs sont estimées dans les tableaux suivants :

Tableau VII. 1. Calcul du volume de déblai (Collecteur P1)

	L (m)	V (m³)
1	322	1569,75

2	212	1033,50
3	313	1525,88
4	321	1564,88
5	173	843,38
6	153	745,88
7	182	887,25
8	151	736,13
9	209	1018,88
10	204	994,50
11	227	1106,63
12	218	1062,75
13	182	887,25
14	95	463,13
15	318	1550,25
16	286	1394,25
Collecteur P1	785	4979,84

Tableau VII. 2 : Calcul du volume de déblai (Collecteur s1)

Drains	L(m)	V (m³)
1	314	1530,75
2	365	1779,375
3	390	1901,25
4	398	1940,25
Collecteur s1	497	2422,875

Tableau VII. 3: Calcul du volume de déblai (Collecteur s2)

Drains	L(m)	V (m³)
1	130	633,75
2	131	638,625
3	130	633,75
4	382	1862,25
5	229	1116,375
6	108	526,5
7	129	628,875
8	158	770,25
9	130	633,75
10	301	1467,375
11	116	565,5
12	178	867,75
13	207	1009,125
14	254	1238,25
Collecteur s2	730	3558,75

Tableau VII. 4 : Calcul du volume de déblai (Collecteur P2)

Drains	L(m)	V (m ³)
1	288	1404
2	375	1828,125
3	340	1657,5
4	299	1457,625
5	367	1789,125
6	326	1589,25
7	359	1750,125
8	377	1837,875
Collecteur P2	1269	6186,375

VII.6.5. Estimation de cout total de projet

Tableau VII. 5. Évaluation du cout excavation.

Désignation des Travaux	Unité	Quantité (m3)	Prix unitaire TTC (DA/m)	Montant TTC (DA)
Déblai en terrain	m3	67589,47	400	27 035 786

Alors le cout total de projet est : **[27 035 786] DA.**

CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale

En conclusion de cette étude, plusieurs enseignements significatifs peuvent être tirés. Tout d'abord, notre analyse a révélé les défis associés à la gestion des ressources hydriques dans une région au climat saharien, caractérisée par une aridité extrême, des températures élevées et des précipitations rares, voire absentes. Ces conditions créent des contraintes importantes pour l'aménagement des terres agricoles, telles que la forte salinité des sols, leur texture grossière, une réserve minérale limitée, et la présence d'encroûtements gypseux.

La prospection pédologique s'est révélée essentielle pour identifier ces contraintes et proposer des solutions adaptées, telles que des pré-irrigations visant à lessiver les sels et l'instauration d'un drainage interne pour améliorer la qualité des sols.

En outre, une analyse approfondie des problèmes de remontée de la nappe phréatique à El Mekhadma a permis de mettre en évidence des paramètres hydrauliques clés pour assurer un fonctionnement optimal du réseau de drainage. Cette approche vise à garantir l'efficacité et la performance du système, tout en identifiant des solutions viables pour résoudre ces problématiques.

Enfin, le projet de drainage par fossé et la création d'un collecteur vers le drain principal de l'EST ne se contentent pas de résoudre le problème de la nappe phréatique ; ils favorisent également le développement agricole de la région. Ce projet ouvre la voie à une exploitation agricole durable sur une large superficie, malgré les défis environnementaux.

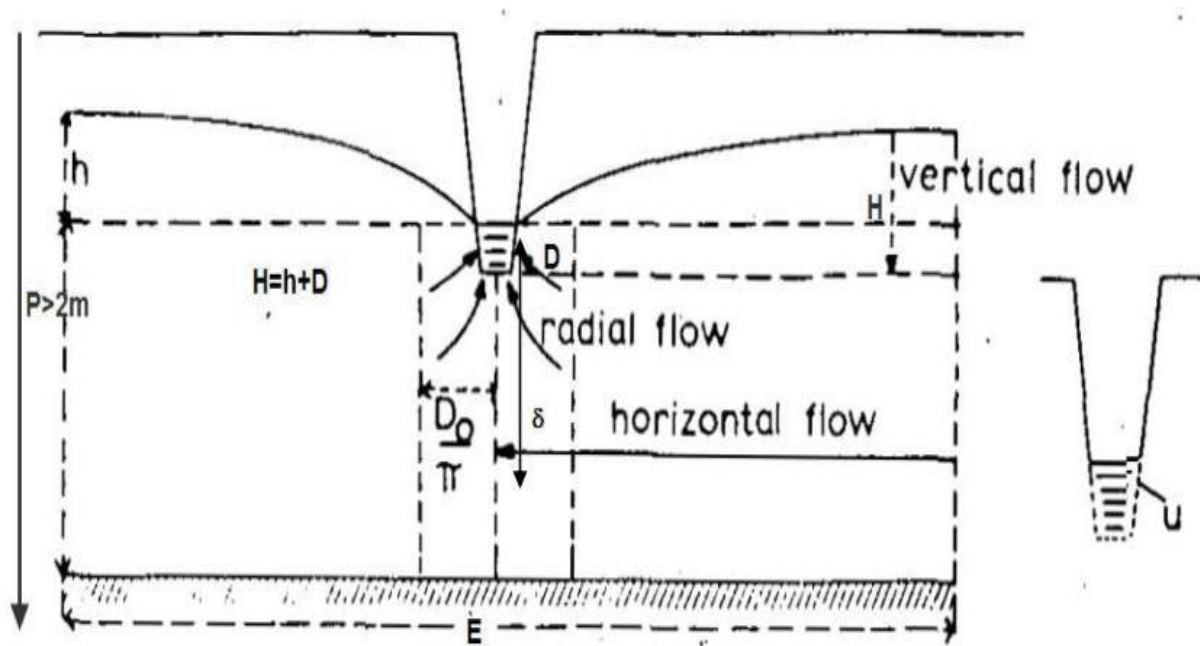
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUE

1. J Dubief ; le climat du Sahara, tome II fascicule I ; Alger ;1963
2. Rouviloise et Brigole, Le pays de Ouargla (Sahara Algérienne) ; Université de Paris Sorbonne ;1975
3. (La Nasa <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>)
4. O.N.M : Office nationale de métrologie De la Wilaya de Ouargla
5. Google Earth (<https://earth.google.com/web/>)
6. J EmbourgerJ ; Géologie Saharienne ; France 1963
7. AZIEZ BAHBOUH L., 2023 : cours et td du drainage agricole. Polycopie ENSH Blida.
8. (<http://www.oss-online.org/fr/plateforme-et-donnees>)
9. Bureau d'étude BG ; Etudes d'assainissement des eaux résiduaires ;2004
10. A Cornet ; Données sur l'hydrologie Algérienne ; les eaux du crétacé inférieur, le continental dans le Sahara Algérien ; 1952
11. Anonyme ; Etude et gestion des ressources en eau du Sahara septentrional, volume I,
12. FRANLAB, pour UNESCO: mars 1972
13. Touil Y. 2003 : étude de possibilité de réutilisation des eaux de drainage dans la cuvette de Ouargla
14. Office national d'irrigation-drainage (ONID) « Compte rendu sur la situation de drainage dans la région »
15. KAHLERRAS.,2018 : Organisation de chantier. Polycopie ENSH Blida.

Liste des abréviations

- A.E.P : Alimentation en Eau Potable.
- A.N.R.H : Agence National des Ressources Hydraulique.
- C.I : Continental Intercalaire.
- C.T : Complexe Terminal.
- D.H.W : direction Hydraulique de la Wilaya.
- D.S.A : direction de Service Agricole.
- O.N.A : Office National d'Assainissement.
- O.N.M : Office National de Météorologie.
- O.N.S : Office National de Statistique.
- SAR : L'alcalinité d'une eau d'irrigation (sodium adsorption ratio) USSL: United States Salinity Laboratory
- LR: leaching Requiment (dose de lessivage) Ce : Conductivité électrique
- Mmhos/cm : millimhos par centimètre ESP : Le taux de sodium échangeable DSA : Direction des services agricole ETR : Evapotranspiration réel
- ETP : Evapotranspiration potentiel Ha : Hectare
- J : Jour
- LR : leaching Requiment (dose de lessivage) Per : Percolé
- PH : Potentiel d'hydrogène
- SAR : L'alcalinité d'une eau d'irrigation (sodium adsorption ratio)

Annexe



Coupe transversale d'un fossé type trapézoïdal

TABLE 7.1 Equivalent depth 'd' for commonly used pipe drains ($r_e = 4-10$ cm; $u \geq 0.3$ m)

D(m)	L (m) →																		
	5	7.5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	75	80	85	90	100	150	200	250
0.50	0.45	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.75	0.75	0.75	0.75	0.95	0.95	0.95	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
0.75	0.60	0.65	0.70	0.70	0.75	0.75	0.75	0.95	0.95	0.95	0.95	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15
1.00	0.65	0.75	0.80	0.85	0.90	0.90	0.95	0.95	0.95	0.95	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15
1.25	0.70	0.80	0.90	1.00	1.05	1.10	1.10	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15
1.50	0.70	0.90	0.95	1.10	1.20	1.25	1.30	1.30	1.35	1.35	1.35	1.35	1.35	1.35	1.35	1.35	1.35	1.35	1.35
1.75	0.70	0.90	1.00	1.20	1.30	1.40	1.45	1.50	1.50	1.55	1.55	1.55	1.55	1.55	1.55	1.55	1.55	1.55	1.55
2.00	0.70	1.10	1.30	1.40	1.50	1.55	1.60	1.65	1.70	1.70	1.70	1.80	1.80	1.80	1.85	1.85	1.90	1.90	1.95
2.25	0.70	1.15	1.35	1.50	1.70	1.70	1.75	1.80	1.85	1.85	1.85	1.85	1.85	1.85	1.85	1.85	1.85	1.85	1.85
2.50	0.70	1.15	1.40	1.55	1.70	1.80	1.85	1.95	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00
2.75	0.70	1.15	1.40	1.65	1.75	1.90	2.00	2.05	2.10	2.10	2.10	2.10	2.10	2.10	2.10	2.10	2.10	2.10	2.10
3.00	0.70	1.15	1.45	1.65	1.85	1.95	2.10	2.15	2.25	2.30	2.30	2.30	2.30	2.30	2.30	2.30	2.30	2.30	2.30
3.25	0.70	1.15	1.50	1.70	1.90	2.05	2.15	2.25	2.35	2.40	2.40	2.40	2.40	2.40	2.40	2.40	2.40	2.40	2.40
3.50	0.70	1.15	1.50	1.75	1.95	2.10	2.25	2.35	2.45	2.55	2.55	2.55	2.55	2.55	2.55	2.55	2.55	2.55	2.55
3.75	0.70	1.15	1.50	1.80	1.95	2.15	2.30	2.45	2.55	2.65	2.65	2.65	2.65	2.65	2.65	2.65	2.65	2.65	2.65
4.00	0.70	1.15	1.80	2.00	2.20	2.35	2.50	2.60	2.70	2.75	2.75	2.75	2.75	2.75	2.75	2.75	2.75	2.75	2.75
4.50	0.70	1.15	1.85	2.10	2.30	2.50	2.65	2.75	2.85	2.85	2.85	2.85	2.85	2.85	2.85	2.85	2.85	2.85	2.85
5.00	0.70	1.15	1.90	2.15	2.40	2.60	2.75	2.90	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00
5.50	0.70	1.15	1.90	2.20	2.45	2.65	2.85	3.00	3.15	3.15	3.15	3.15	3.15	3.15	3.15	3.15	3.15	3.15	3.15
6.00	0.70	1.15	1.90	2.20	2.50	2.70	2.90	3.10	3.25	3.25	3.25	3.25	3.25	3.25	3.25	3.25	3.25	3.25	3.25
7.00	0.70	1.15	1.90	2.20	2.55	2.80	3.05	3.25	3.45	3.45	3.45	3.45	3.45	3.45	3.45	3.45	3.45	3.45	3.45
8.00	0.70	1.15	1.90	2.20	2.55	2.85	3.15	3.35	3.55	3.55	3.55	3.55	3.55	3.55	3.55	3.55	3.55	3.55	3.55
9.00	0.70	1.15	1.90	2.20	2.55	2.85	3.15	3.35	3.55	3.55	3.55	3.55	3.55	3.55	3.55	3.55	3.55	3.55	3.55
10.00	0.70	1.15	1.90	2.20	2.55	2.85	3.15	3.35	3.55	3.55	3.55	3.55	3.55	3.55	3.55	3.55	3.55	3.55	3.55
12.50	0.70	1.15	1.90	2.20	2.55	2.85	3.15	3.35	3.55	3.55	3.55	3.55	3.55	3.55	3.55	3.55	3.55	3.55	3.55
15.00	0.70	1.15	1.90	2.20	2.55	2.85	3.15	3.35	3.55	3.55	3.55	3.55	3.55	3.55	3.55	3.55	3.55	3.55	3.55
17.50	0.70	1.15	1.90	2.20	2.55	2.85	3.15	3.35	3.55	3.55	3.55	3.55	3.55	3.55	3.55	3.55	3.55	3.55	3.55
20.00	0.70	1.15	1.90	2.20	2.55	2.85	3.15	3.35	3.55	3.55	3.55	3.55	3.55	3.55	3.55	3.55	3.55	3.55	3.55
25.00	0.70	1.15	1.90	2.20	2.55	2.85	3.15	3.35	3.55	3.55	3.55	3.55	3.55	3.55	3.55	3.55	3.55	3.55	3.55
30.00	0.70	1.15	1.90	2.20	2.55	2.85	3.15	3.35	3.55	3.55	3.55	3.55	3.55	3.55	3.55	3.55	3.55	3.55	3.55
35.00	0.70	1.15	1.90	2.20	2.55	2.85	3.15	3.35	3.55	3.55	3.55	3.55	3.55	3.55	3.55	3.55	3.55	3.55	3.55
40.00	0.70	1.15	1.90	2.20	2.55	2.85	3.15	3.35	3.55	3.55	3.55	3.55	3.55	3.55	3.55	3.55	3.55	3.55	3.55
45.00	0.70	1.15	1.90	2.20	2.55	2.85	3.15	3.35	3.55	3.55	3.55	3.55	3.55	3.55	3.55	3.55	3.55	3.55	3.55
50.00	0.70	1.15	1.90	2.20	2.55	2.85	3.15	3.35	3.55	3.55	3.55	3.55	3.55	3.55	3.55	3.55	3.55	3.55	3.55
60.00	0.70	1.15	1.90	2.20	2.55	2.85	3.15	3.35	3.55	3.55	3.55	3.55	3.55	3.55	3.55	3.55	3.55	3.55	3.55
~	0.70	0.95	1.15	1.55	1.90	2.25	2.60	2.90	3.25	3.55	3.90	5.40	5.75	6.00	6.25	6.80	9.55	12.20	14.70

Roughly
d = constant for D > 1/2 L

Profondeur equivalente « d »

