



RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE



MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEURE ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITÉ KASDI MERBAH OUARGLA

Faculté des Sciences appliquées
Département Génie civil et Hydraulique

THÈSE

En vue de l'obtention du diplôme de doctorat

Option : Ressources Hydrauliques

THÈME

**Étude de l'évaporation des sols dans les zones arides. Cas de
la région de TOUGGOURT**

Présenté par :

BENNAMIA Mohammed Mounir

Soutenu publiquement le

Devant le jury d'examen :

OULHACI Dalila	MCA	Université de Ouargla	Président
BOUTOUTAOU Djamel	Professeur	Université de Ouargla	Rapporteur
SAGGAI Sofiane	Professeur	E.S.A. EL OUDE	Co- Rapporteur
El Fergougui Meriem	MCA	Université de Ouargla	Examineur
ZEGAIT Rachid	MCA	Université de Ouargla	Examineur
Miloudi Abdel Moneim	MCA	Université de EL OUDE	Examineur

Année Universitaire : 2024/ 2025

Remerciements

Je rends tout d'abord grâce à Dieu, le Tout-Puissant, dont la guidance et le soutien m'ont accompagné tout au long de ce parcours. Sans Sa bénédiction, cette thèse n'aurait jamais pu voir le jour.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à mon directeur de thèse, Pr BOUTOUTAOU Djamel, pour sa confiance, son encadrement rigoureux, ses conseils avisés et son soutien constant tout au long de ce travail de recherche son engagement et sa disponibilité ont été d'une aide précieuse dans l'aboutissement de cette thèse.

Mes sincères remerciements vont également à Pr. SAGGAÏ Sofiane, pour son appui scientifique et ses orientations précieuses qui ont enrichi mon travail, ainsi qu'à Pr KATEB Samir, qui m'a guidé et soutenu tout au long de ce parcours.

Je tiens à remercier chaleureusement Dr. GHERIANI Sofiane et M. BERREKBIA Mohammed pour leur soutien inestimable dans le cadre des travaux de terrain. Leur engagement et leur aide lors des expérimentations réalisées à la Station de l'Institut National de la Recherche Agronomique (INRAA) à Sidi Mahdi, Touggourt, ont été essentiels à la réalisation de cette étude.

Je remercie sincèrement l'ensemble du personnel de la station INRAA de Sidi Mahdi, Touggourt, pour leur accueil, leur assistance et leur disponibilité durant toute la période de mes recherches sur le terrain. Enfin je souhaite exprimer ma reconnaissance à toutes les personnes qui de près ou de loin, m'ont soutenu dans cette aventure scientifique et humaine, que ce soit par leurs conseils, leur aide logistique ou leur encouragement moral.

Que tous trouvent ici l'expression de ma gratitude la plus sincère.

Résumé

La région de Touggourt qui se situe au sud-est de l'Algérie (vallée de Ouad Rhig), est une zone caractérisée par un climat chaud et sec, avec des faibles précipitations. Elle a connu un développement agricole remarquable dans ces dernières années, les problèmes environnementaux graves, tels que la remontée des eaux souterraines, la salinisation des sols et la dégradation de la qualité des eaux souterraines ont accentué la chute de la production, ces problèmes sont étroitement liés à une mauvaise gestion des ressources en eau. L'évaporation du sol est un paramètre essentiel pour le développement agricole, notamment dans les zones arides et semi arides, elle influe sur le bilan hydrique du sol, la bonne évaluation de l'évaporation du sol permet de calculer les doses nécessaires d'irrigation apportées aux cultures végétales et par conséquent diminuer les problèmes de la salinité du sol et la remontée de la nappe phréatique. L'objectif de cette étude est d'évaluer la quantité d'eau qui s'évapore du sol agricole, à partir de dix mini-lysimètres de type GGI-500 fabriqués localement en PVC, plusieurs degrés de saturation ont été utilisés pour mesurer la quantité d'eau qui s'évapore du sol pendant une année complète, les résultats de l'étude obtenus montrent que l'évaporation d'eau est très importante dans la région aride, elle atteint des valeurs importantes (près de 550 mm par mois) lorsque le sol est saturé et les températures sont très élevées (en mois de juillet et août), un modèle simple et facile à utiliser a été développé pour estimer l'évaporation journalière du sol en absence de donnée, ce modèle est une précieuse aide pour les agriculteurs, et les planificateurs de la ressource en eau en zone aride.

Mots clés : Régions arides, évaporation, lysimètre, éléments météorologiques, abaque, degré de saturation du sol

Abstract

The region of Touggourt, located in the southeast of Algeria (Wadi Righ Valley), is characterized by a hot and dry climate with low precipitation, in recent years, it has experienced remarkable agricultural development, however, serious environmental issues such as rising groundwater levels, soil salinization, and the degradation of groundwater quality have significantly reduced agricultural production. These problems are closely linked to poor water resource management, soil evaporation is a crucial parameter for agricultural development, especially in arid and semi-arid regions, as it directly affects the soil water balance, accurately assessing soil evaporation helps determine the necessary irrigation doses for crops, thereby reducing soil salinity and groundwater rise. The objective of this study is to evaluate the amount of water evaporating from agricultural soil using ten locally manufactured GGI-500 mini-lysimeters made of PVC. Various levels of soil saturation were tested to measure the evaporated water over an entire year, the study results show that water evaporation is very high in arid regions, reaching significant values (around 550 mm per month) when the soil is saturated and temperatures are extremely high (in July and August), a simple and easy-to-use model was developed to estimate daily soil evaporation in the absence of data, This model serves as a valuable tool for farmers and water resource planners in arid regions.

Keywords: Arid regions, evaporation, Lysimeter, meteorological elements, nomogram, soil saturation degree.

ملخص

منطقة توقرت، الواقعة في الجنوب الشرقي للجزائر (وادي ريغ)، تتميز بمناخ حار وجاف مع معدلات هطول أمطار منخفضة. شهدت هذه المنطقة في السنوات الأخيرة تطورًا زراعيًا ملحوظًا. ومع ذلك، فإن المشاكل البيئية، مثل ارتفاع منسوب المياه السطحية، ارتفاع درجة ملوحة التربة، وتدهور جودة المياه الجوفية، قد أدت إلى انخفاض كبير في الإنتاج الزراعي. وترتبط هذه المشكلات ارتباطًا وثيقًا بسوء إدارة الموارد المائية، ويُعد تبخر التربة عاملاً أساسياً في التنمية الزراعية، لا سيما في المناطق القاحلة وشبه القاحلة، حيث يؤثر بشكل مباشر على توازن المياه في التربة. ويساعد التقدير الدقيق لتبخر الماء من التربة في تحديد كميات الري اللازمة للمحاصيل، مما يساهم في تقليل ملوحة التربة والحد من ارتفاع منسوب المياه الجوفية. تهدف هذه الدراسة إلى تقدير كمية المياه المتبخرة من التربة الزراعية باستخدام عشرة أجهزة ميني-ليزيمتر من نوع GGI-500 مصنوعة محلياً من مادة الـ PVC. تم اختبار عدة مستويات من تشبع التربة لقياس كمية المياه المتبخرة على مدار عام كامل، حيث أظهرت نتائج الدراسة أن تبخر المياه مرتفع جداً في المناطق القاحلة، حيث يصل إلى قيم كبيرة (حوالي 550 ملم شهرياً) عندما تكون التربة مشبعة ودرجات الحرارة مرتفعة بشكل كبير، خاصة خلال شهري جويلية وأوت، وتم تطوير نموذج بسيط وسهل الاستخدام لتقدير التبخر اليومي للتربة في غياب البيانات. ويعد هذا النموذج أداة قيمة للمزارعين ومخططي الموارد المائية في المناطق القاحلة.

الكلمات المفتاحية: المناطق الجافة، التبخر، المَبْخَر (اللايسيمتر)، العناصر المناخية، المخطط البياني، درجة تشبع التربة.

Liste des figures

FIGURE 1 SITUATION GEOGRAPHIQUE DE LA REGION D'ETUDE(BENNAMIA ET AL., 2024)	5
FIGURE 2.TEMPERATURES MOYENNES MENSUELLES (2008 JUSQU'A 2017)	7
FIGURE 3.PRECIPITATIONS MOYENNES MENSUELLES (2008 JUSQU'A 2017)	8
FIGURE 4.VITESSE DU VENTS MOYENNES MENSUELLES (2008 JUSQU'A 2017)	9
FIGURE 5. HUMIDITE RELATIVE MOYENNES MENSUELLES (2008 JUSQU'A 2017)	9
FIGURE 6. INSOLATION MOYENNES MENSUELLES (2008 JUSQU'A 2017)	10
FIGURE 7. COUPES GEOLOGIQUE 3D DE LA ZONE D'ETUDE(KADRI, 2023)	15
FIGURE 8.SYSTEME AQUIFERE DU SAHARA SEPTENTRIONAL(OSS, 2020)	16
FIGURE 9.CADRE GEOGRAPHIQUE ET GEOLOGIQUE DU SYSTEME AQUIFERE DU SAHARA SEPTENTRIONAL(HADDANE ET AL., 2015)	16
FIGURE 10.CARTE PIEZOMETRIQUE DU CONTINENTAL INTERCALAIRE (CI)(BESBES & HORRICHE, 2007)	17
FIGURE 11.CARTE PIEZOMETRIQUE DU COMPLEXE TERMINAL (CT)(BESBES & HORRICHE, 2007)	18
FIGURE 12.: RESEAU DE REFERENCE DU SYSTEME AQUIFERE DU SAHARA SEPTENTRIONAL (SASS) AVEC SES 73 POINTS D'EAU.(SEPTENTRIONAL)	19
FIGURE 13.DIFFERENTS ETATS DE L'EAU DONS LE SOL(COUSIN ET AL., 2017)	31
FIGURE 14. DIFFERENTS TYPES DE PORES(HUTIN, 2020)	32
FIGURE 15.DIFFERENTS TYPES D'HUMIDITE DU SOL(COUSIN ET AL., 2017)	32
FIGURE 16.BAC CLASS A(LABORDE, 2000)	34
FIGURE 17. EVAPOROMETRE PICHE(SKHIRI, 2019)	35
FIGURE 18. LE LYSIMETRE GGI-500-50M	36
FIGURE 19. STATION EXPERIMENTALE DE L'INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE AGRONOMIQUE INRAA (STATION SIDI MAHDI). TOUGGOURT	44
FIGURE 20.STATION METEOROLOGIQUE DE L'INRAA. TOUGGOURT	44
FIGURE 21. LYSIMETRES (A GAUCHE LYSIMETRE DISSOCIE)	46
FIGURE 22. SCHEMA DE CONCEPTION DU LYSIMETRE	46
FIGURE 23. BALANCE ELECTRONIQUE POUR LA MESURE DU POIDS	47
FIGURE 24 . BAC CLASS A POUR LA MESURE DE L'EVAPOTRANSPIRATION	47
FIGURE 25.ÉVAPOROMETRE PICHE	49
FIGURE 26. ANEMOMETRE	49
FIGURE 27. THERMOMETRE SEC ; THERMOMETRE HUMIDE. ABRI METEOROLOGIQUE (A DROITE)	50
FIGURE 28. INSTALLATION DES LYSIMETRES SUR LE CHAMP EXPERIMENTAL	51
FIGURE 29. COUPE TRANSVERSALE DES COUCHES DU SOL	52
FIGURE 30. COURBE GRANULOMETRIQUE REPRESENTANT LA DISTRIBUTION DES PARTICULES DU SOL.	53
FIGURE 31. SCHEMA DE CHAMP EXPERIMENTAL	55
FIGURE 32. VARIATIONS SAISONNIERES DES TEMPERATURES MEASUREES A L'AIDE D'UN THERMOMETRE SEC (TSEC) ET D'UN THERMOMETRE HUMIDE (THUM)	65
FIGURE 33VARIATIONS SAISONNIERES DES TEMPERATURES MEASUREES A L'AIDE D'UN THERMOMETRE SEC (TSEC) ET LA TEMPERATURE (TSOL)	66
FIGURE 34VARIATIONS SAISONNIERES DE L'HUMIDITE RELATIVE ET LA VITESSE DE VENT	67
FIGURE 35.VARIATIONS SAISONNIERES DE L'EVAPORATION ENREGISTRE (BAC CLASS A , PICHE)	68
FIGURE 36.RELATION ENTRE L'EVAPORATION DES LYSIMETRES ET LE BAC CLASSE A	75
FIGURE 37.RELATION ENTRE L'EVAPORATION DES LYSIMETRES ET LE PICHE	77
FIGURE 38.RELATION ENTRE L'EVAPORATION DU SOL (ÉS. MM), LA TEMPERATURE DE L'AIR (T. °C), DEGRE DE SATURATION A) Hs= 100 %, B) Hs= 80 %, C) Hs= 60 %, D) Hs= 40 %, E) Hs= 20 %	83
FIGURE 39.ABAQUE POUR LA DETERMINATION DE L'EVAPORATION JOURNALIERE DU SOLE EN FONCTION DE LA TEMPERATURE DE L'AIR (T,°C) ET DU DEGRE DE SATURATION EN EAU DU SOL (HSR,%)	84

FIGURE 40.COMPARAISON ENTRE LES VALEURS D'EVAPORATION CALCULEES ET MESUREES POUR DIFFERENTS DEGRES DE SATURATION DU SOL A : A) Hs= 100 %, B) Hs= 80 %, C) Hs= 60 %, D) Hs= 40 %, E) Hs= 20 %.....	86
FIGURE 41.COURBE DE DISTRIBUTION DES ERREURS DE CALCUL DES EVAPORATIONS JOURNALIERES PAR L'ABAQUE (36).....	88
FIGURE 42. EVAPORATIONS MENSUELLES (E_s,MM) DU SOL NU A DIFFERENTS ETATS DE SATURATION DU SOL (HSR,%).	90
FIGURE 43. EVOLUTION DE L'EVAPORATION MENSUELLE EN FONCTION DE TAUX D'HUMIDITE DU SOL EN MOIS DE JANVIER ET JUILLET.....	90
FIGURE 44. DISTRIBUTION DE LA TRANCHE D'EVAPORATION MENSUELLE DU SOL NU Es,% POUR DIFFERENTS DEGRES DE SATURATION (HSR,%)	92
FIGURE 45.COMPARAISON ENTRE LES VALEURS DE L'EVAPORATION MENSUELLE (Es,MM) CALCULEE ET MESUREE POUR DIFFERENTS DEGRES DE SATURATION (HSR,%).	93

Liste des tableaux

TABLEAU 1. DONNES METEOROLOGIQUES DE LA REGION DE TOUGGOURT (2008 -2017)	6
TABLEAU 2. COMPARATIF DES EQUATIONS D'ESTIMATION DE L'EVAPORATION	40
TABLEAU 3. VALEURS DES PARAMETRES METEOROLOGIQUES DU 03 AU 04 MAI 2022	69
TABLEAU 4.VALEURS DES PARAMETRES METEOROLOGIQUE ET DE L'EVAPORATION POUR DIFFERENTS TAUX D'HUMIDITE DU SOL.....	70
TABLEAU 5. LES RESULTATS DE MESURE ET LEUR STATISTIQUE.....	71
TABLEAU 6.LES RESULTATS DE COEFFICIENT DE CORRELATION DE PEARSON (R)	73
TABLEAU 7.EXEMPLE DE VALEURS DE L'EVAPORATION DES LYSIMETRES POUR DIFFERENTS DEGRES DE SATURATION EN PERIODE HIVERNALE	78
TABLEAU 8. EXEMPLE DE VALEURS DE L'EVAPORATION DES LYSIMETRES POUR DIFFERENTS DEGRES DE SATURATION EN PERIODE ESTIVALE	79
TABLEAU 9. MATRICE DE CORRELATION DES PARAMETRES METEOROLOGIQUES.	80
TABLEAU 10. MULTI COLINEARITE DES PARAMETRES METEOROLOGIQUES VARIABLE DEPENDANTE : EVAPORATION BAC CLASS A	81
TABLEAU 11.QUANTITES STATISTIQUES DE COMPARAISON ENTES LES VALEURS DE L'EVAPORATION CALCULEES ET MESUREES	87
TABLEAU 12. VALEURS MENSUELLES DE L'EVAPORATION DU SOL NU ET DES PARAMETRES METEOROLOGIQUES.	89

Sommaire

Introduction Générale	1
CHAPITRE I: Description De La Zone D'étude.....	4
I.1. Introduction.....	4
I.2. Cadre naturel.....	4
I.3. Situation géographique.....	5
I.4. Cadre climatique.....	6
I.4.1. Climat.....	6
I.4.2. Températures	6
I.4.3. Précipitations.....	7
I.4.4. L'indice d'aridité	8
I.4.5. Vents	9
I.4.6. Humidité de l'air	9
I.4.7. Insolation.....	10
I.5. Cadre géologique.....	10
I.5.1. Stratigraphie du Paléozoïque.....	11
I.5.2. Stratigraphie du Mésozoïque.....	11
I.5.3. Stratigraphie du Cénozoïque	11
I.5.4. Description stratigraphique	12
I.5.4.1. Le Barrémien.....	12
I.5.4.2. L'Aptien.....	12
I.5.4.3. L'Albien.....	12
I.5.4.4. Le Vraconien	13
I.5.4.5. Le Cénomanién	13
I.5.4.6. Le Turonien	13
I.5.4.7. Le Sénonien.....	14
I.5.4.8. L'Éocène :.....	14
I.5.4.9. Mio-Pliocène :.....	15
I.6. Cadre hydrologique	15
I.6.1. Continental Intercalaire (CI).	17
I.6.2. Complexe Terminal (CT).	18

.1.7	Conclusion	20
	CHAPITRE II: Evaporations Du Sols.....	22
II.1.	Introduction	22
II.2.	Phénomène d'évaporation	22
II.2.1.	L'évaporation Phénomène De Diffusion	22
II.2.2.	L'évaporation Phénomène Energétique.....	24
II.2.3.	L'évaporation Phénomène Climatique	25
II.3.	Facteurs influençant l'évaporation du sol.....	25
II.3.1.	Facteurs climatiques	25
II.3.1.1.	La température.....	25
II.3.1.2.	L'humidité relative.....	26
II.3.1.3.	La vitesse.....	26
II.3.1.4.	Le rayonnement solaire	27
II.3.2.	Caractéristiques du sol	27
II.3.2.1.	Caractéristiques physiques du sol	27
II.3.2.2.	Caractéristiques hydriques du sol.....	28
II.3.3.	Niveau de la nappe phréatique	28
II.3.4.	Couverture Végétale.....	29
II.4.	Mécanisme d'évaporation du sol.....	29
.11.4.1	L'eau et le sol	30
II.4.2.	Les pores du sol.....	31
II.5.	Méthodes de mesure de l'évaporation	33
II.5.1.	Méthodes directes.....	34
II.5.1.1.	Bac class A	34
II.5.1.2.	Évaporomètre Pich	35
.11.5.1.3	Lysimètres	36
II.5.2.	Méthode gravimétrique	37
II.5.3.	Méthodes indirectes.....	37
II.5.3.1.	Formule de Penman-Monteith (FAO1956)	37
II.5.3.2.	Formule de Thornthwaite 1948	38
II.5.3.3.	Formule de Turc 1960 (F60)	38
II.5.3.4.	Formule de Blaney-Criddle.....	39
II.6.	Conclusion.....	41
	CHAPITRE III: Etude expérimentale de l'évaporation sur les lysimètres et les champs agricoles	43

III.1.	Introduction	43
III.2.	Le Site expérimentale.....	44
III.3.	Matériels et méthodes	45
III.3.1.	Matériels.....	45
III.3.1.1.	Les Lysimètres.....	45
III.3.1.2.	Mini-lysismètres GGI-500 : Matériaux et fabrication	45
A	Matériau de base :	45
B	Caractéristiques des Mini-lysismètres.....	46
III.3.1.3.	Balances électroniques	47
III.3.1.4.	Bac class A.....	47
III.3.1.5.	Le Pich.....	48
III.3.1.6.	Anémomètre	49
III.3.1.7.	Abri météorologique.....	50
III.3.1.8.	Champ expérimental.....	51
III.3.2.	Méthodes	51
III.3.2.1.	Détermination des caractéristiques techniques du sol.....	51
A	: Étude granulométrique.....	51
III.3.2.2.	Détermination des caractéristiques hydriques du sol	53
	Humidité de saturation (Hs) :	54
	Humidités à la capacité au champ (Hcc).....	54
III.3.2.3.	Gradient de degré de saturation (variable indépendante)	54
III.3.2.4.	Enregistrement des données lysimétriques et des paramètres météorologiques.....	55
III.3.2.5.	Analyse statistique des résultats obtenus.....	56
A	- Statistique descriptive.....	56
B	- Corrélation	58
III.3.2.6.	Modélisation statistique.....	58
A	Régression Linéaire Simple :	59
B	Régression Linéaire Multiple.....	59
C	Régression Non Linéaire.....	60
III.3.2.7.	Validation du Modèle :	60
III.4	Conclusion.....	62
CHAPITRE IV: Résultats Et Discussions		64
IV.1.	Introduction	64
IV.2.	Analyse des conditions météorologiques observées pendant la période expérimentale	65

IV.2.1.	Température (sèche – humide)	65
.IV.2.2	Température (air – sol)	66
.IV.2.3	Vitesse de vent et l'humidité relative.....	67
IV.2.4.	Evaporation de Bac class A et piche.....	68
IV.3.	Résultats de l'évaporation du sol mesurée.....	69
IV.4.	Analyse statistique des résultats obtenus	71
IV.4.1.	Statistiques descriptives	71
IV.5.	Modélisation statistique	74
IV.5.1.	Relation entre l'évaporation du sol et les paramètres météorologiques	78
IV.5.2.	Analyse de Régression Statistique	79
IV.5.2.1.	Vérification de l'indépendance des variables	79
IV.5.3.	Validation du Modèle	85
IV.6.	Conclusion.....	93
Conclusion Générale	95	

Introduction Générale

Introduction Générale

L'eau est considérée comme la base de la vie et le principal moteur de tous les écosystèmes. Elle joue un rôle important dans l'équilibre environnemental et a un impact direct sur les activités humaines, en particulier dans les zones arides et semi-arides, où les ressources en eau sont limitées et les besoins souvent supérieurs à la disponibilité (Ma et al., 2019; Wu et al., 2014), une gestion durable de l'eau s'impose comme un enjeu crucial. Parmi les phénomènes influençant la disponibilité en eau, l'évaporation des sols qui représente un processus clé, complexe et multidimensionnel, dépend à la fois des caractéristiques climatiques, des propriétés des sols et des interactions avec les nappes phréatiques (Wythers et al., 1999).

L'évaporation du sol, en tant que phénomène de diffusion et d'échange énergétique (Ritchie, 1972), est directement influencée par des facteurs environnementaux tels que la température, l'humidité de l'air, la vitesse du vent, et la teneur en eau du sol. Ces facteurs interagissent pour déterminer le taux d'évaporation, qui peut varier considérablement selon les conditions locales et climatiques (Aydin et al., 2005). Une meilleure compréhension de ces interactions est essentielle pour prévoir et gérer efficacement les pertes d'eau par évaporation, en particulier dans les régions où les réserves hydriques sont critiques.

La région de Touggourt, située dans le sud-est algérien, offre un cadre idéal pour l'étude de l'évaporation des sols dans un contexte saharien. Caractérisée par un climat aride avec des températures élevées, des précipitations annuelles très faibles et une évaporation intense, cette région présente des défis majeurs pour la gestion des ressources en eau. Le développement agricole dans cette région est confronté à plusieurs problématiques, notamment l'élévation du niveau de la nappe phréatique et la salinité des sols. Ces contraintes affectent négativement la production agricole et exigent des stratégies adaptées pour préserver la viabilité des activités agricoles et la qualité des sols.

Les sols variés de la région, allant des sols sableux à forte perméabilité aux sols limoneux à rétention d'eau, combinés à la proximité de nappes phréatiques peu profondes, offrent un contexte unique pour explorer les dynamiques de l'évaporation. Cependant, ces spécificités soulèvent également des questions sur la gestion efficace des eaux de surface et souterraines, ainsi que sur la lutte contre la dégradation des terres.

Ce travail de recherche s'inscrit dans cet objectif, en visant à comprendre les mécanismes et les facteurs d'influence de l'évaporation des sols dans la région de Touggourt. En s'appuyant sur des données expérimentales obtenues à partir de lysimètres et d'observations sur le terrain, combinées à des modèles simplifiés d'évaporation basés sur la saturation en eau et la température, cette recherche contribue à enrichir la compréhension des processus locaux et leur modélisation. La présente thèse se structure autour de plusieurs chapitres interdépendants. Le premier chapitre décrit la zone d'étude, en présentant les caractéristiques géographiques, climatiques et pédologiques de la région de Touggourt. Le deuxième chapitre s'intéresse aux méthodes de détermination et de mesure de l'évaporation des sols, en explorant les approches théoriques et

expérimentales disponibles. Le troisième chapitre présente l'étude expérimentale qui est basée sur les lysimètres et les champs agricoles, tandis que le quatrième chapitre, il offre les résultats et leur interprétation. Enfin, la conclusion générale synthétise les principales contributions de ce travail et propose des perspectives pour des recherches futures.

En résumé, cette thèse ambitionne de fournir une compréhension approfondie des processus d'évaporation des sols dans un environnement aride, tout en apportant des solutions pratiques pour une gestion optimisée des ressources en eau dans la région de Touggourt.

CHAPITRE I

Description De La Zone D'étude

CHAPITRE I: Description De La Zone D'étude

I.1. Introduction

Le phénomène d'évaporation est considéré comme l'un des processus fondamentaux du cycle hydrologique. En raison de son impact direct sur l'environnement naturel, il est essentiel de comprendre ses mécanismes et son interaction avec les différents facteurs naturels (Chen et al., 2018), dans ce chapitre, nous étudierons les caractéristiques de l'environnement naturel de la zone d'étude afin de mieux appréhender son cadre naturel, dans ce contexte, la région de Touggourt, située dans le sud-est de l'Algérie, constitue un terrain idéal pour l'analyse de ces processus, En raison de ses conditions climatiques arides, de ses sols variés et de la présence de la nappe phréatique peu profonde, cette région offre une opportunité unique pour examiner les facteurs influençant l'évaporation des sols dans les climats semi-arides. La région de Touggourt est caractérisée par un climat saharien, marqué par des températures élevées, une faible précipitation annuelle et une forte intensité de l'évaporation (GHERIANI, 2022). Ces conditions extrêmes imposent une pression considérable sur les ressources en eau, faisant de la gestion et de la conservation de l'eau une priorité cruciale pour les activités agricoles et le développement économique de la région. Les sols de cette zone présentent des caractéristiques physiques et hydriques variées, allant des sols sableux perméables aux sols limoneux plus rétenteurs d'eau. Ces différences influencent directement le comportement de l'évaporation.

Dans ce chapitre, nous présentons une description détaillée de la zone d'étude afin de fournir un cadre de référence pour l'analyse des phénomènes d'évaporation. Nous aborderons les aspects géographiques, climatiques, hydrologiques et pédologiques de la région, en mettant en évidence les caractéristiques pertinentes pour notre étude. Cette description permettra de mieux comprendre les interactions complexes entre les différents facteurs et leur influence sur le processus d'évaporation.

Ainsi, l'objectif principal de ce chapitre est de fournir une compréhension globale des caractéristiques de la région de Touggourt, en identifiant les éléments clés susceptibles d'influencer l'évaporation des sols. Cette étape préliminaire est essentielle pour contextualiser les analyses et les résultats qui seront présentés ultérieurement dans le cadre de ce travail de recherche.

I.2. Cadre naturel

La région de Touggourt fait partie de la vallée d'Oued Righ qui est une bande longitudinale relativement humide qui s'étend du nord au sud sur une distance de 160 km, de Goug – Blidet Omar jusqu'à Shatt Melghigh, qui se trouve à 50 mètres sous le niveau de la mer. Sa largeur varie entre 30 et 40 km. C'est une plaine uniforme, en forme de bande étroite et allongée, qui présente une pente légère du sud au nord estimée à 1%. La région est parsemée de marais salants et de zones boueuses recouvertes de sable. On y trouve également quelques plantes

désertiques et des lacs de sources souterraines très salées. Si l'on regarde attentivement, on découvre que ces marais salants occupent une zone basse en forme de bande qui s'étend relativement en ligne droite du nord au sud, avec une rive est qui se termine par des bords surélevés de quelques mètres de dunes de sable(Elakhdar, 2005).

L'Oued Righ se situe dans un cadre distinct par sa nature désertique, faisant partie du Grand Désert qui commence au sud de l'Atlas saharien et les marges des hauts plateaux. Cette vaste étendue, principalement plate et composée de hamadas et de veines rocheuses, est divisée par les géographes en deux principales régions du désert algérien du nord : le désert bas et le désert haut. L'Oued Righ est l'une des caractéristiques les plus notables du désert bas, qui comprend les régions de Ziban, Oued Souf et le bassin d'Ouargla. Cette zone basse du désert est riche en eaux souterraines qui ont permis la vie et l'émergence d'oasis irriguées par ces eaux sur le long du Oued Righ, favorisant actuellement un développement agricole significatif dans la région(Elakhdar, 2005; KADRI, 2023).

1.3. Situation géographique

L'étude de la position astronomique et géographique revêt une grande importance, compte tenu de ses répercussions directes, notamment sur le climat de la région. La zone d'étude, la région de Touggourt, située au sud de la vallée de l'Oued Righ, se trouve astronomiquement entre les longitudes 5.54° et 6.09° Est et les latitudes 32° et 33.5° Nord. Elle s'étend sur une superficie totale estimée à 870 km²

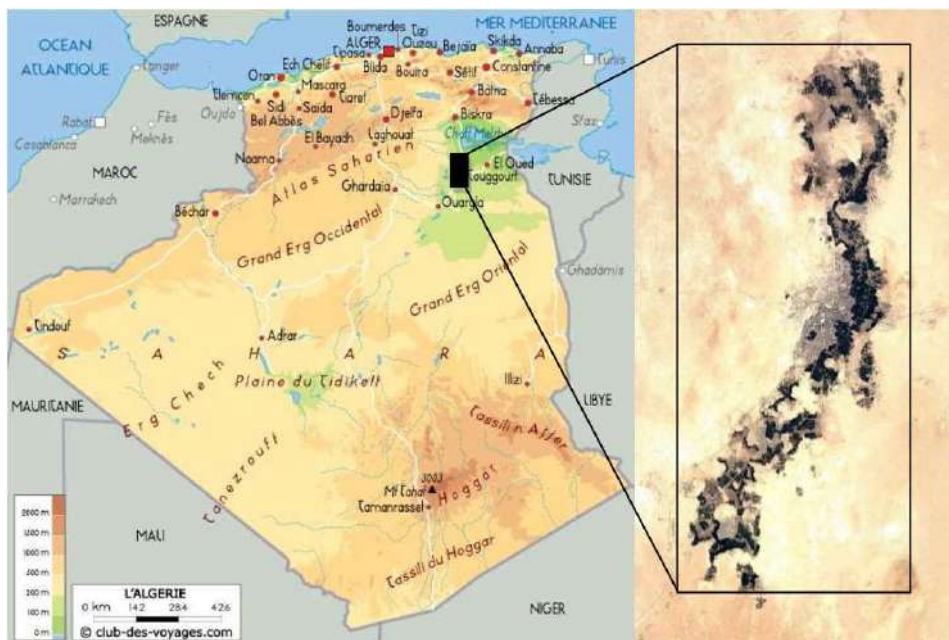


Figure 1 Situation géographique de la région d'étude

I.4. Cadre climatique

I.4.1. Climat

Étant donné que la région de Touggourt, située dans la vallée d'Oued Righ et caractérisée par sa nature aride, le climat dominant dans cette région est le climat saharien. Ce climat se distingue par ses caractéristiques rigoureuses : chaleur intense et sécheresse en été, froid intense et faibles précipitations en hiver. En effet, l'indice de sécheresse dans la région atteint 1,75 (GHERIANI, 2022). Le (tableau1) fourni quelques caractéristiques météorologiques de la région de Touggourt.

Tableau 1. Données météorologiques de la région de Touggourt (2008 -2017)

Mois	T _{min}	T _{max}	T _{moy}	H _{min}	H _{max}	Vent	Pluie	Évaporation	Insolation
Janvier	5.06	18.27	11.66	38.73	81.73	8.39	11.49	100.97	256.15
Février	6.33	19.95	13.14	30.56	75.91	9.40	5.01	132.32	239.78
Mars	10.04	24.14	17.09	27.07	71.92	9.98	6.79	163.62	268.73
Avril	14.66	29.31	21.98	23.49	66.60	10.71	9.66	207.89	292.54
Mai	19.16	33.77	26.46	21.94	59.38	10.48	1.80	245.24	328.04
Juin	23.74	38.52	31.13	19.65	53.22	9.73	0.47	285.29	324.77
Juillet	26.97	42.21	34.59	17.19	48.92	9.30	0.05	347.69	363.64
Août	26.38	41.17	33.78	19.70	53.45	9.12	1.20	309.82	345.24
Septembre	22.72	36.22	29.47	26.74	65.75	9.27	6.02	222.20	276.66
Octobre	16.77	30.50	23.63	29.55	71.32	7.99	3.75	175.41	276.36
Novembre	9.99	23.32	16.65	34.30	79.05	8.13	6.35	132.03	252.34
Décembre	5.43	18.54	11.98	39.92	84.85	7.27	3.41	90.48	238.58

I.4.2. Températures

La température est considérée comme le facteur climatique le plus systématique en termes d'influence sur le climat de la région, la vallée d'Oued Righ située au nord-est du Sahara algérien. Au cours du siècle dernier, cette région a connu une augmentation progressive des températures en raison des changements climatiques mondiaux, ce qui a influencé son environnement naturel affectant les plantes, les animaux et le sol (Benseghier-Hadjaidji et al., 2018).

À partir des données climatiques couvrant la période de 2008 à 2017, la courbe du variation mensuelle des moyennes des températures a été tracée (figure 2).

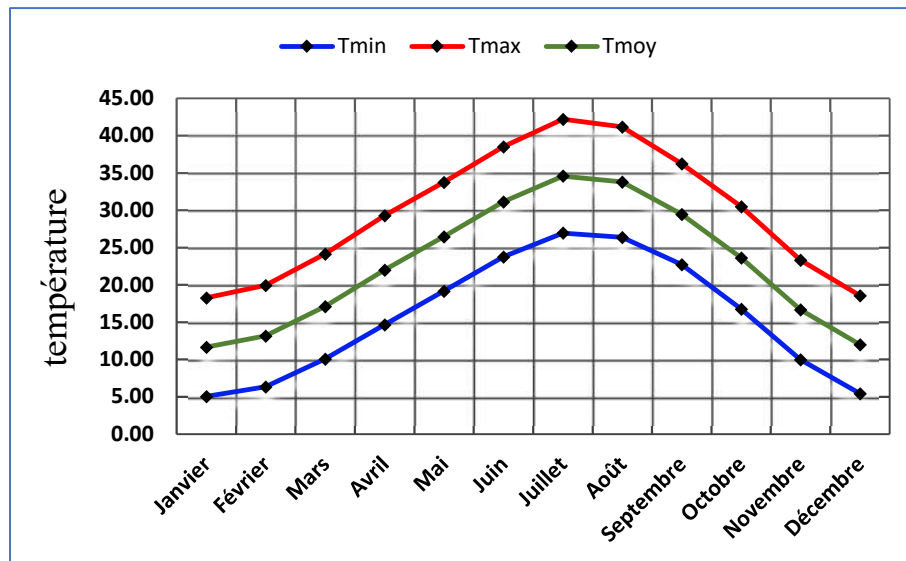


Figure 2. Températures moyennes mensuelles (2008 jusqu'à 2017)

La région de Touggourt montre des variations thermiques importantes tout au long de l'année, avec des températures mensuelles maximales (Tmax) variant entre 20°C en hiver et 45°C en été, qui peuvent atteindre jusqu'à 50°C. Les températures mensuelles minimales (Tmin) varient entre 5°C et 30°C environ, descendants parfois sous zéro en hiver. En général, la région enregistre les températures les plus élevées pendant les mois de juillet et août, tandis que les niveaux les plus bas sont atteints en janvier. Comme le montre la (**Figure 2**), la température moyenne suit le même schéma que les températures maximales et minimales, avec une augmentation notable en été et une baisse en hiver.

I.4.3. Précipitations

À partir de la (figure 3), il est possible d'analyser les précipitations dans la région d'Oued Righ sur la période 2008-2017. Cette figure met en évidence l'irrégularité des précipitations dans la région, caractérisée par deux phases distinctes. La première phase, pluvieuse, s'étend de septembre à avril avec un maximum de 12,77 mm enregistré en janvier. La deuxième phase, sèche, caractérise les autres mois de l'année, avec un minimum de 0,06 mm enregistré en juillet. La moyenne annuelle des précipitations est estimée à environ 62,22 mm, une valeur très faible pour une région caractérisée par des températures élevées. Compte tenu de ce niveau de précipitations, la région de Touggourt peut être classée comme une région aride.

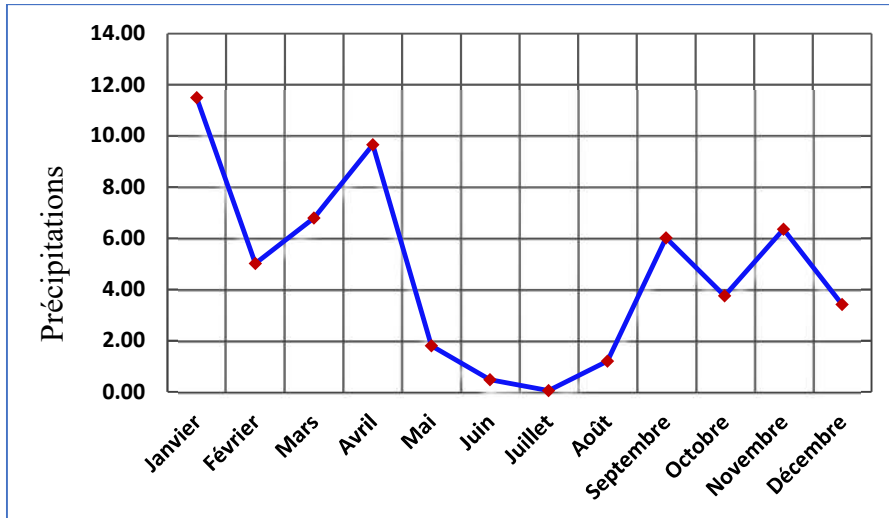


Figure 3. Précipitations moyennes mensuelles (2008 jusqu'à 2017)

I.4.4. L'indice d'aridité

L'indice d'aridité (IA) est un indicateur numérique qui mesure le degré de sécheresse d'un climat à un endroit donné. Il existe plusieurs méthodes pour calculer cet indice, mais elles ont toutes pour but d'évaluer la disponibilité en eau par rapport aux besoins climatiques (SAGGAÏ).

Par exemple, l'indice de MARTONNE se calcule en utilisant la formule suivante

$$I = \frac{P}{(T + 10)} \dots \dots \dots (1)$$

P : précipitation annuelle (mm).

T : température moyenne annuelle (C°).

I < 5 : milieu hyperaride

5-10 : milieu aride.

10-20 : milieu semi-aride.

20-30 : milieu tempéré.

D'après les données climatologiques illustre dans le tableau 1, l'indice d'aridité (**I = 1.71**), étant inférieur à 5, place la région d'Oued Righ dans la catégorie des milieux hyperarides, caractérisés par une très faible disponibilité en eau et des conditions climatiques extrêmes.

I.4.5. Vents

Le vent joue un rôle majeur dans la formation et l'évolution des paysages désertiques, avec des impacts significatifs sur l'environnement, Le vent arrache et transporte les particules du sol, réduisant ainsi la fertilité et aggravant la sécheresse. Ces processus contribuent à la désertification, dégradant les écosystèmes

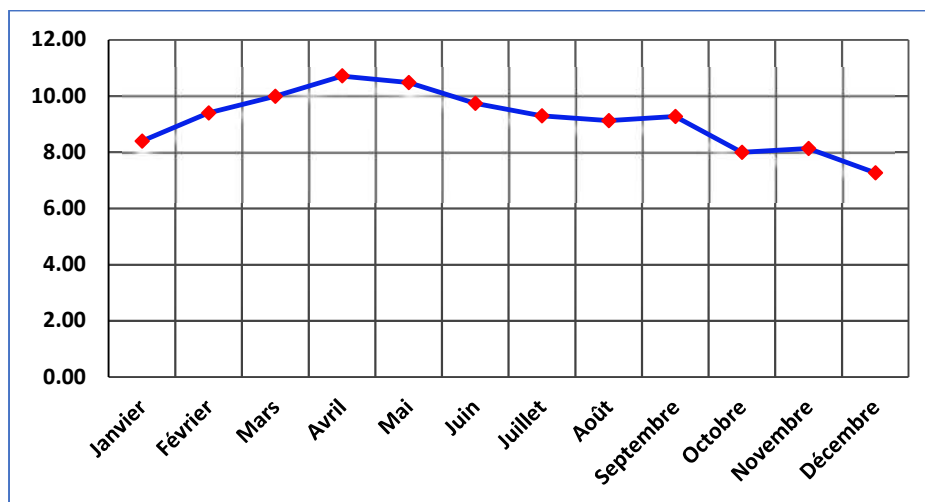


Figure 4. Vitesse des vents moyennes mensuelles (2008 jusqu'à 2017)

Selon les données climatologiques recueillies à la station météorologique de Touggourt (Figure 4), le vent souffle de manière soutenue tout au long de l'année. La vitesse moyenne annuelle est de 9,15 mètres par seconde. Les vitesses maximales sont observées en avril et mai, atteignant respectivement 10,71m/s et 10,48 m/s, tandis que la vitesse minimale est enregistrée en décembre avec 7,3 m/s. Il est à noter que la direction de ces vents est variable.

I.4.6. Humidité de l'air

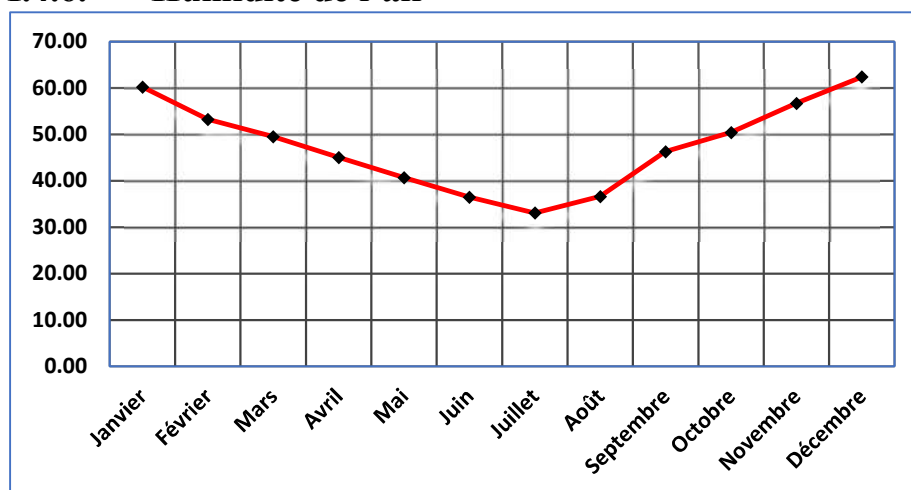


Figure 5. Humidité relative moyennes mensuelles (2008 jusqu'à 2017)

L'analyse des données hygrométriques de la région Touggourt met en évidence un cycle saisonnier marqué de l'humidité relative. La période avril-septembre correspond à une saison

sèche avec des valeurs inférieures à 50%, tandis que la période octobre-mars est caractérisée par une saison humide avec des valeurs supérieures à 50%. Le mois le plus humide est décembre avec 62,39% d'humidité, tandis que le mois le plus sec est juillet avec seulement 33,06% (Figure5).

I.4.7. Insolation

La durée de l'insolation se réfère au temps pendant lequel une surface donnée reçoit un ensoleillement direct. L'insolation intense entraîne des températures élevées et évapotranspiration importante

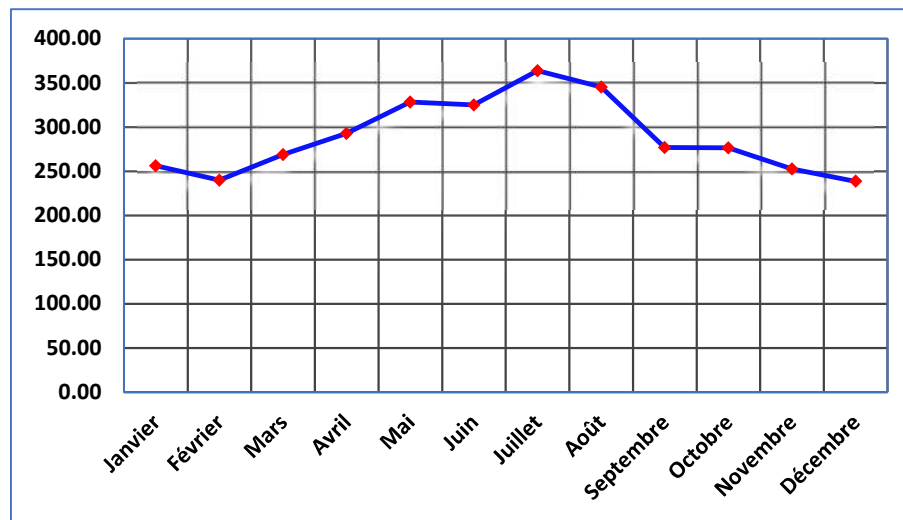


Figure 6. Insolation moyennes mensuelles (2008 jusqu'à 2017)

La durée de l'insolation à Touggourt est très élevée tout au long de l'année (Figure 6). En moyenne, la région bénéficie de 10 à 12 heures d'ensoleillement par jour, particulièrement pendant les mois d'été, où le nombre d'heures d'ensoleillement mensuel peut dépasser 300 heures. Le record a été enregistré en juillet avec 363,64 heures. Bien que cette durée diminue en hiver, elle reste relativement élevée, avec 238,58 heures enregistrées en décembre.

I.5. Cadre géologique

La région de Touggourt, située au cœur de la basse Sahara, recèle une géologie variée et bien complexe dont l'évolution sur des millions d'années a abouti à une telle configuration. Ainsi implantée dans une vaste dépression longitudinale soulignée par des relèves humbles des monts des Ouled Naïl, des Aurès et du Tinhert, s'étalant sur une superficie de 720 000 km², cette dépression régentée par des chotts et drainée par les oueds Mya et les Righ(**Doudou & Kenioua, 2018; Koull, 2010**), est constituée essentiellement par des terrains sédimentaires mésozoïques et cénozoïques. Ces formations gréseuses, calcaires et argileuses témoignent des anciens environnements marins et continentaux ayant recouvert successivement la région. La

présence de roches volcaniques, notamment des basaltes, témoigne de l'activité volcanique passée qui a contribué à façonner le paysage. Les structures d'ordonnement, notamment les plis et les failles, ont eu également une part de lion dans le dessin actuel de la région. Ces éléments géologiques, conjointement avec l'histoire climatique et sédimentaire de la région, ont abouti à un paysage alternant des plateaux, cuvettes et des dunes, mais néanmoins une offre géographique transcendante(Doudou & Kenioua, 2018).

I.5.1. Stratigraphie du Paléozoïque

La stratigraphie du Paléozoïque dans la région de Touggourt montre une séquence géologique complexe comprenant plusieurs formations, telles que le Dévonien inférieur et moyen, le Carbonifère et le Permien. Chacune de ces formations présente des caractéristiques lithologiques distinctes, avec des dépôts de grès, de calcaire et de schistes. Des fossiles marins et des trilobites ont été découverts dans les couches du Dévonien, témoignant de l'ancienne présence d'un environnement marin. L'analyse détaillée des différents membres de ces formations permet de reconstruire les environnements de dépôt et de mieux comprendre l'évolution géologique de la région au cours du Paléozoïque

I.5.2. Stratigraphie du Mésozoïque

La stratigraphie du Mésozoïque de la région de Touggourt est caractérisée par la présence de plusieurs formations géologiques. Les études ont mis en évidence la présence de plusieurs couches sédimentaires datant du Jurassique et du Crétacé. Les dépôts sédimentaires de cette période comprennent des calcaires, des grès, des argiles et des gypses, qui sont souvent associés à des événements tectoniques. La stratigraphie du Mésozoïque révèle également des indices de présence d'anciennes mers et de climats changeants, ce qui offre des informations précieuses sur l'évolution géologique de la région

I.5.3. Stratigraphie du Cénozoïque

La stratigraphie du Cénozoïque de la région de Touggourt révèle une séquence sédimentaire comprenant des dépôts allant du Paléocène à l'actuel. Les roches du Cénozoïque sont principalement composées de sables, de grès, de calcaires et d'argiles, témoignant des variations environnementales au fil du temps. Des fossiles de mammifères, de reptiles et de plantes ont également été retrouvés, offrant des informations précieuses sur la faune et la flore qui ont prospéré dans la région au cours de cette période. De plus, l'étude stratigraphique du

Cénozoïque permet de mieux comprendre les changements tectoniques, climatiques et environnementaux qui ont influencé la géologie de la région de Touggourt

I.5.4. Description stratigraphique

Structure géologique et litho-stratigraphique du Sahara Septentrional(**Doudou & Kenioua, 2018; KADRI, 2023**)

I.5.4.1. Le Barrémien

est un étage géologique du Crétacé inférieur, caractérisé par une séquence sédimentaire principalement constituée d'alternances de grès, d'argiles et de sables. Ces sédiments détritiques, d'origine continentale, témoignent d'un environnement de dépôt soumis à des cycles d'érosion et de sédimentation. D'une épaisseur variante entre 150 et 200 mètres, le Barrémien se distingue par sa porosité, qui en fait un important aquifère, notamment dans le Complexe Intercalaire du Sahara algérien. Les sédiments du Barrémien, dont l'origine est souvent attribuée à des régions plus anciennes comme le Hoggar, contiennent fréquemment des fossiles marins et continentaux, permettant ainsi de reconstituer les paléoenvironnements et la paléobiogéographie de cette période.

I.5.4.2. L'Aptien

est un étage géologique du Crétacé inférieur, caractérisé par une séquence sédimentaire principalement composée de carbonates (dolomies, calcaires, marnes) et de quelques intercalations d'évaporites (anhydrites) et de matières organiques (lignites). Ces sédiments, déposés en milieu marin, témoignent d'une alternance de phases de transgression et de régression marines, ainsi que de conditions environnementales variées allant du marin profond à des environnements plus restreints comme les lagunes. D'une épaisseur relativement constante et homogène sur de vastes étendues, notamment au Sahara algérien, l'Aptien constitue un excellent marqueur stratigraphique permettant de corréliser les différentes formations géologiques. Sa grande extension géographique et sa composition sédimentaire particulière en font une unité géologique d'une grande importance pour la compréhension de l'évolution paléogéographique et des ressources naturelles du Crétacé inférieur.

I.5.4.3. L'Albien

est une formation géologique caractérisée par des dépôts de grès, d'argiles et de calcaires, avec une épaisseur pouvant atteindre 200 à 300 mètres, croissant d'Est en Ouest. Il est marqué

par un retour massif de sédiments terrigènes (grès et argiles), indiquant un environnement continental avec quelques incursions marines. Les grès sont souvent fins à moyens, parfois grossiers et friables, tandis que les argiles sont généralement pélitiques et de couleur grise ou verdâtre. L'Albien se situe entre la barre aptienne et un horizon argileux du Cénomaniens. Il constitue le "Continental Intercalaire", la plus grande ressource d'eau du Sahara. Cette formation témoigne d'un changement majeur dans le régime sédimentaire entre le Néocomien et le Barrémien.

I.5.4.4. Le Vraconien

est une formation géologique de transition entre l'Albien continental et le Cénomaniens argilo-carbonaté, avec une épaisseur d'environ 50 à 110 mètres. Il se caractérise par une alternance irrégulière de niveaux argileux, dolomitiques, et argiles sableuses, avec parfois des passages de grès à ciment calcaire. Les dépôts du Vraconien, principalement des calcaires dolomitiques et argileux, indiquent un environnement marin. Cette formation, imperméable, marque une transgression marine sur les dépôts continentaux de l'Albien, soulignant le passage entre deux régimes sédimentaires distincts.

I.5.4.5. Le Cénomaniens

est une formation géologique caractérisée par une alternance de dolomies, de calcaires dolomitiques, de marnes dolomitiques, d'argiles, d'anhydrites, et parfois de sels, avec une épaisseur variante entre 180 et 300 mètres. À Touggourt, cette formation atteint environ 200 à 250 mètres et est constituée de dépôts imperméables. Elle marque une transition d'un environnement marin peu profond, représenté par les carbonates marins du Vraconien, vers un régime lagunaire où se sont déposées les évaporites et les argiles gypsifères. Les bancs d'anhydrite blanche, de dolomie beige à grise, ainsi que des argiles grises verdâtres y sont fréquents, témoignant de conditions sédimentaires évolutives entre le milieu marin et lagunaire.

I.5.4.6. Le Turonien

Est une formation géologique marquée par un environnement marin stable, caractérisé par le dépôt d'une barre calcaire uniforme, souvent épaisse de 50 à plus de 150 mètres. Cette formation se compose principalement de calcaires beiges et poreux, ainsi que de calcaires dolomitiques gris à blancs, avec parfois des marnes et des couches argileuses à la base. Le Turonien recouvre la série imperméable du Cénomaniens et représente une période où le régime

marin dans le Bas Sahara a atteint son extension maximale. À certains endroits, comme à Oued Righ, la stabilisation marine est temporaire.

I.5.4.7. Le Sénonien

Est une formation géologique subdivisée en deux grandes unités lithologiques, reflétant des environnements distincts :

- a. **Sénonien lagunaire** : La partie inférieure est composée d'une alternance de bancs d'anhydrites, de dolomies, d'argiles et de sels. Ces dépôts témoignent d'un régime lagunaire, avec des évaporites, et agissent comme une barrière imperméable. Son épaisseur peut varier de 40 à 350 mètres selon les régions. Cette section marque une nette distinction avec les formations sous-jacentes, notamment le Turonien.
- b. **Sénonien carbonaté** : La partie supérieure, principalement dolomitique et calcaire, est marquée par des dolomies claires, des calcaires dolomitiques, et des intercalations de marnes et d'argiles. Ces dépôts sont représentatifs d'un environnement marin peu profond résultant d'une transgression marine. Cette unité est relativement perméable et son épaisseur varie de 150 à 200 mètres.

Le Sénonien est parfois subdivisé en trois sous-étages : le **Sénonien salifère** (sel massif), le **Sénonien lagunaire** (anhydrite et dolomie), et le **Sénonien carbonaté** (calcaires dolomitiques). La limite entre le Sénonien carbonaté et l'Éocène carbonaté est souvent floue, en raison de la continuité lithologique entre les deux périodes.

I.5.4.8. L'Éocène :

Cette période est marquée par une sédimentation essentiellement carbonatée à sa base, avec des calcaires à nummulites, témoignant d'un environnement marin. L'Éocène inférieur est difficile à distinguer du Sénonien, sauf par la présence de nummulites. Dans sa partie supérieure, la sédimentation devient lagunaire, avec des alternances d'argiles, d'évaporites et de calcaires, indiquant une régression marine et un passage à un régime continental. L'épaisseur des dépôts carbonatés varie entre 140 et 250 mètres, et les fissures secondaires présentes dans cette formation lui confèrent un intérêt hydrogéologique important. Dans l'Éocène moyen, on trouve une alternance de calcaires, d'argiles, de marnes et d'anhydrites, formant un aquitard entre les sédiments Éocènes et Mio-Pliocènes.

I.5.4.9. Mio-Pliocène :

Cette formation est caractérisée par une sédimentation continentale, composée de dépôts mixtes clastiques et carbonatés, incluant des sables, des argiles et parfois des calcaires. Sa structure est très hétérogène, tant verticalement qu'horizontalement, avec une puissance importante. Le Mio-Pliocène est divisé en deux niveaux principaux : (i) un niveau inférieur grès-sableux, d'une importance hydrogéologique notable, et (ii) un niveau supérieur sableux, qui constitue le deuxième horizon aquifère du Complexe Terminal. L'ensemble repose de manière hétérogène sur les formations du Sénonien et de l'Éocène.

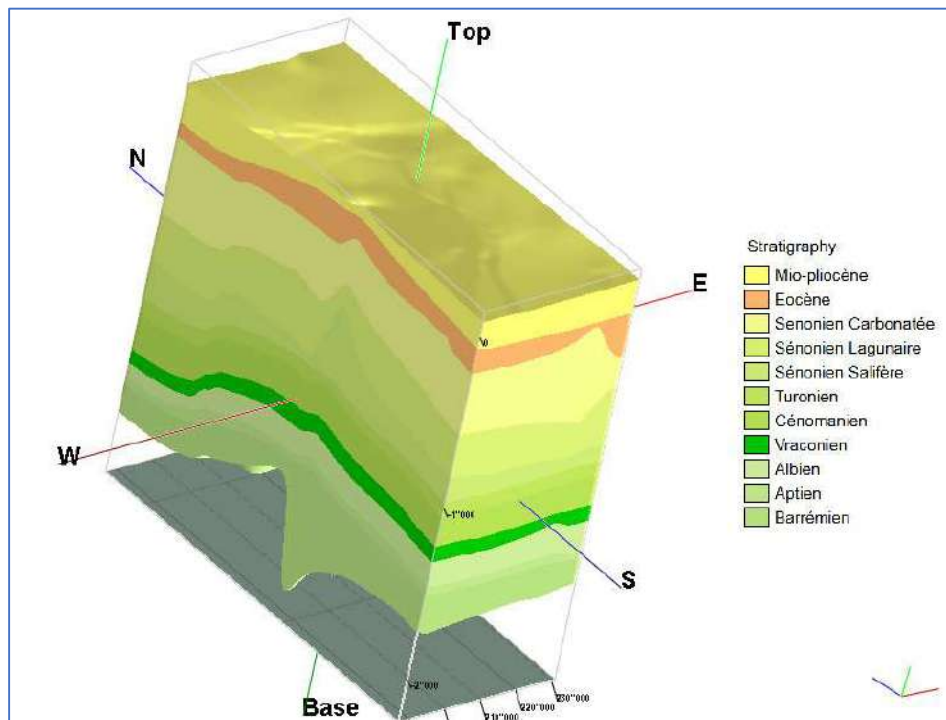


Figure 7. coupes géologique 3D de la zone d'étude(KADRI, 2023)

I.6. Cadre hydrologique

Touggourt est située au centre du Sahara algérien et contient une grande réserve d'eau souterraine connue sous le nom de Système aquifère du Sahara septentrional. Ce dispositif s'étend sur une superficie d'environ 1 million de kilomètres carrés couvrant trois pays : l'Algérie, la Tunisie et la Libye (figure 8). Ce dispositif comprend deux réservoirs principaux tels que le Continental Intercalaire et le Complexe Terminal. Ces structures géologiques sont composées de sédiments marins et continentaux. Renferment d'importantes réserves d'eau (figure 9), estimées à 60 000 milliards de mètres cubes, dans la région de Touggourt la profondeur de ces aquifères, allant de 500 mètres à plus de 1800 mètres pour le CI, fait de cette ressource une source d'eau cruciale mais vulnérable. Le sur exploitation des eaux souterraines

dans la région au fil des décennies, menant à des prélèvements massifs qui dépassent la recharge naturelle, ce qui pose des défis de gestion durable, notamment face à des risques de surexploitation et de salinisation(OSS, 2020).

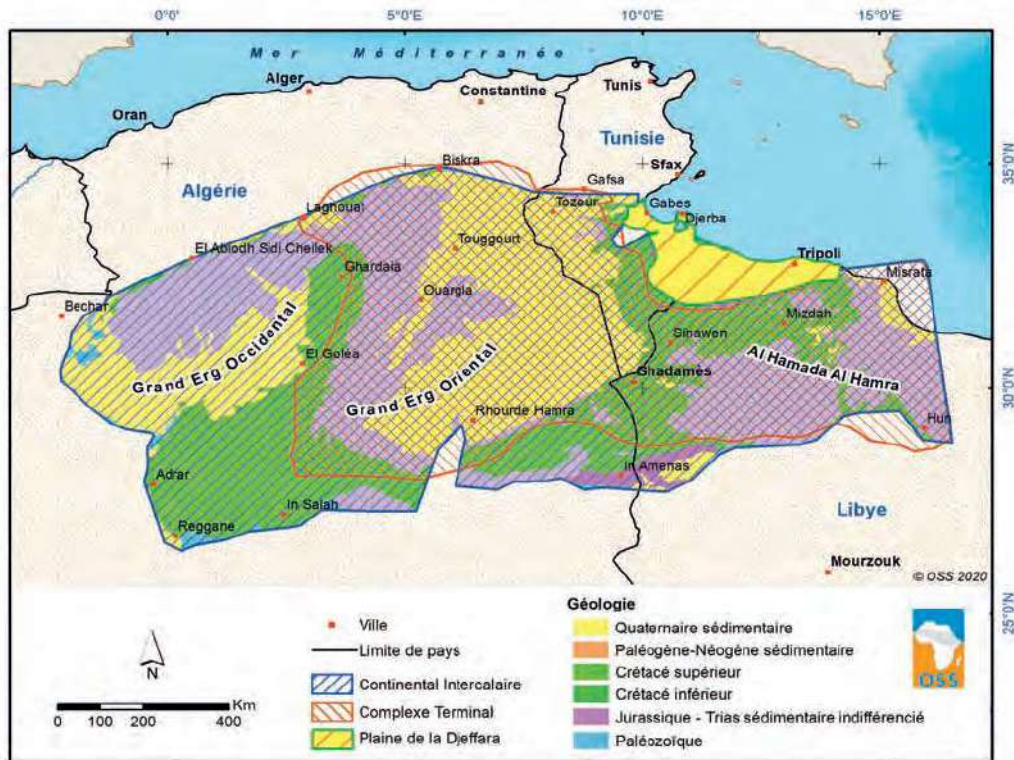


Figure 8. Système Aquifère du Sahara Septentrional(OSS, 2020)

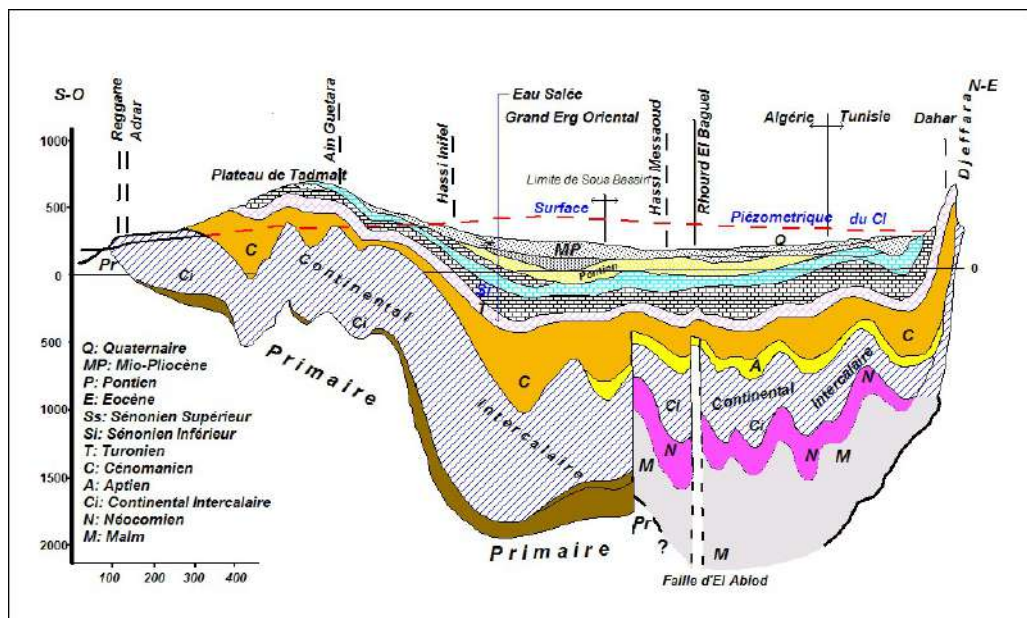


Figure 9. Cadre géographique et géologique du Système Aquifère du Sahara Septentrional(HADDANE et al., 2015)

I.6.1. Continental Intercalaire (CI).

Le système aquifère continental intercalaire (CI), ou "réservoir albien", est l'un des plus grands réservoirs d'eau d'Afrique du Nord, couvrant une superficie estimée à 600 000 km² et s'étendant sur l'Algérie, la Tunisie et la Libye (Figure10). Elle est constituée de plusieurs couches contenant des dépôts continentaux de sable, de graviers et d'argile datant du Crétacé inférieur (Barrémien et Albien), et elle renferme des eaux stockées depuis des époques géologiques anciennes, notamment lors de la période humide du Pléistocène. L'épaisseur varie de 250 à 1000 mètres, et elle atteint une profondeur de 1800 mètres dans la région de Oued Righ . La nappe est caractérisée par des eaux chaudes et une haute pression de 250 bars, avec des températures pouvant atteindre 60°C, avec un volume d'eau souterraine estimé à environ 60 000 milliards de mètres cubes, mais seulement 1/6 de ce volume est exploitable. La recharge de ces eaux est très limitée en raison de la rareté des précipitations, et elle repose principalement sur les infiltrations provenant des oueds s'écoulant des montagnes de l'Atlas saharien au nord et des reliefs du Sahar tunisien à l'est. Au fil du temps, l'exploitation excessive de ces ressources a conduit à une baisse des niveaux d'eau et à une augmentation des risques de salinisation. la perméabilité est d'environ 10-3 m/s avec une faible capacité de stockage, variant entre 1 et 50 pour mille, ce qui pose des défis quant à l'exploitation durable de cet immense réservoir d'eau.

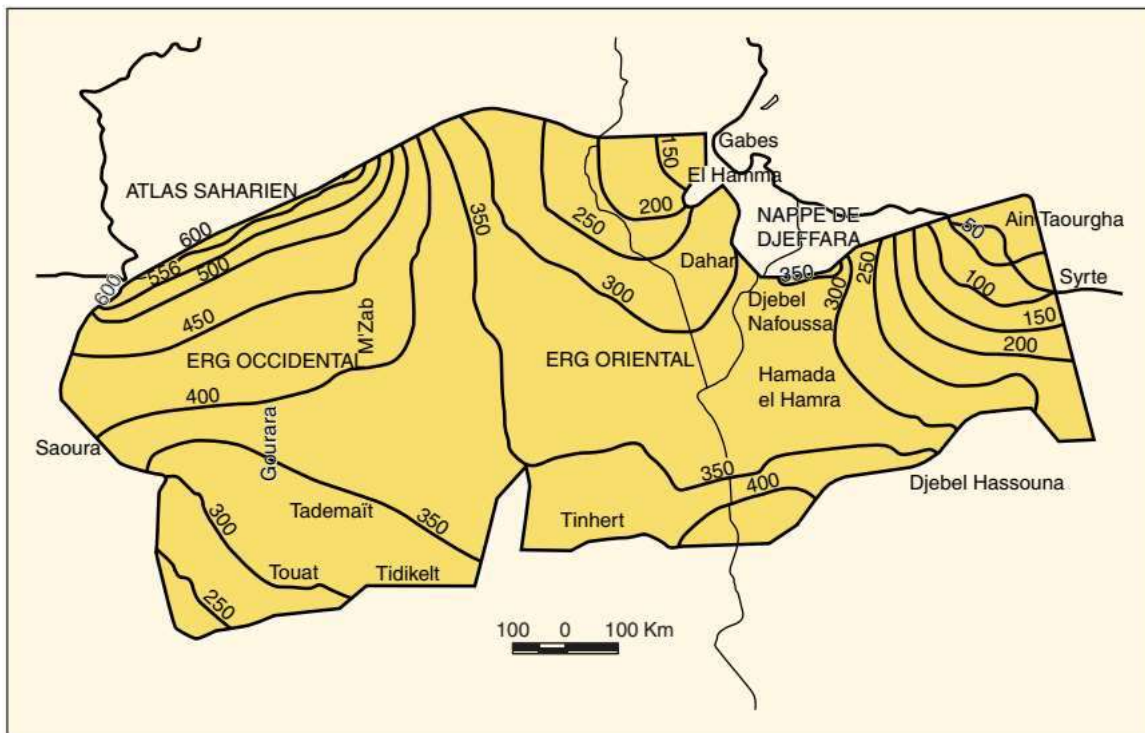


Figure 10. Carte piézométrique du Continental Intercalaire (CI) (Besbes & Horriche, 2007)

I.6.2. Complexe Terminal (CT).

Dans le Sahara oriental Le système aquifère du Complexe Terminal (CT), s'étend sur une surface environ de 350 000 km² (Figure 11), et regroupe plusieurs formations géologiques : le Sénonien supérieur (calcaires fissurés et dolomitiques), l'Éocène (carbonates et calcaires karstifiés), et le Mio-Pliocène sableux. La profondeur de cet aquifère varie de 100 à 600 mètres, avec une puissance moyenne de 300 mètres à TOUGGOURT. L'alimentation du CT est globalement faible comparée aux volumes stockés(Boualem & Salah; OSS, 2020).

- Infiltration directe sur les bordures relativement arrosées du bassin saharien,
- Infiltration des pluies exceptionnelles dans les régions du Grand Erg Occidental et Oriental.
- Drainance indirecte provenant de l'aquifère des dolomies turoniennes. Ces apports représentent un flux annuel d'environ 750 millions de m³.
- Infiltration sur les bordures nord (Atlas Saharien et M'Zab) et au sud-ouest (plateau du Tademaït). Mais l'apport en eau de pluie reste inférieur à 50 mm/an.

L'exploitation du CT a considérablement augmenté au cours du dernier siècle, avec un débit exploité d'environ 8 m³/s En 1900, tandis qu'en 2000, ce débit a atteint 45 m³/s, grâce à plus de 2 000 forages(OSS, 2020)

Le Complexe Terminal, bien qu'offrant une ressource hydrique essentielle pour la région de Touggourt, fait face à des défis liés à la surexploitation, provoquant la baisse des niveaux piézométriques et la salinisation, mettant en danger la durabilité des ressources en eau de la région.

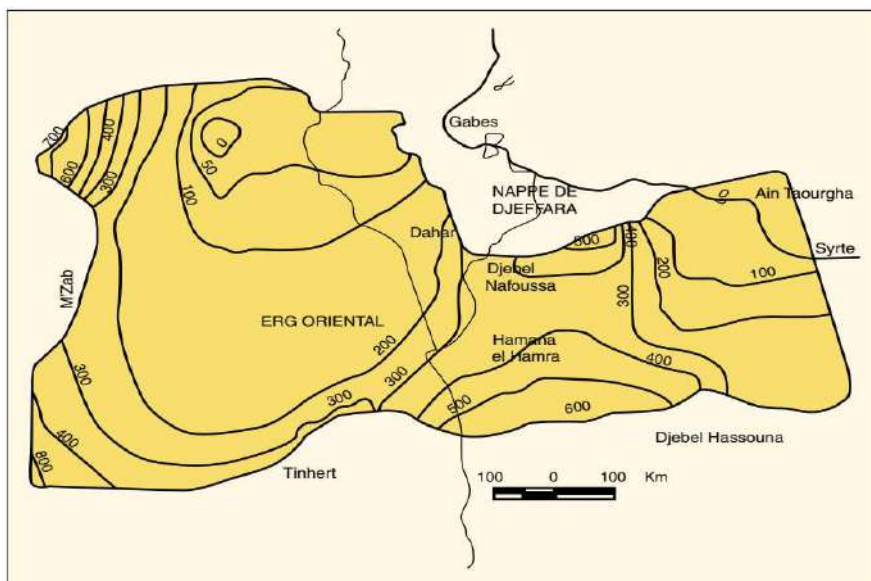


Figure 11. Carte piézométrique du Complexe Terminal (CT)(Besbes & Horriche, 2007)

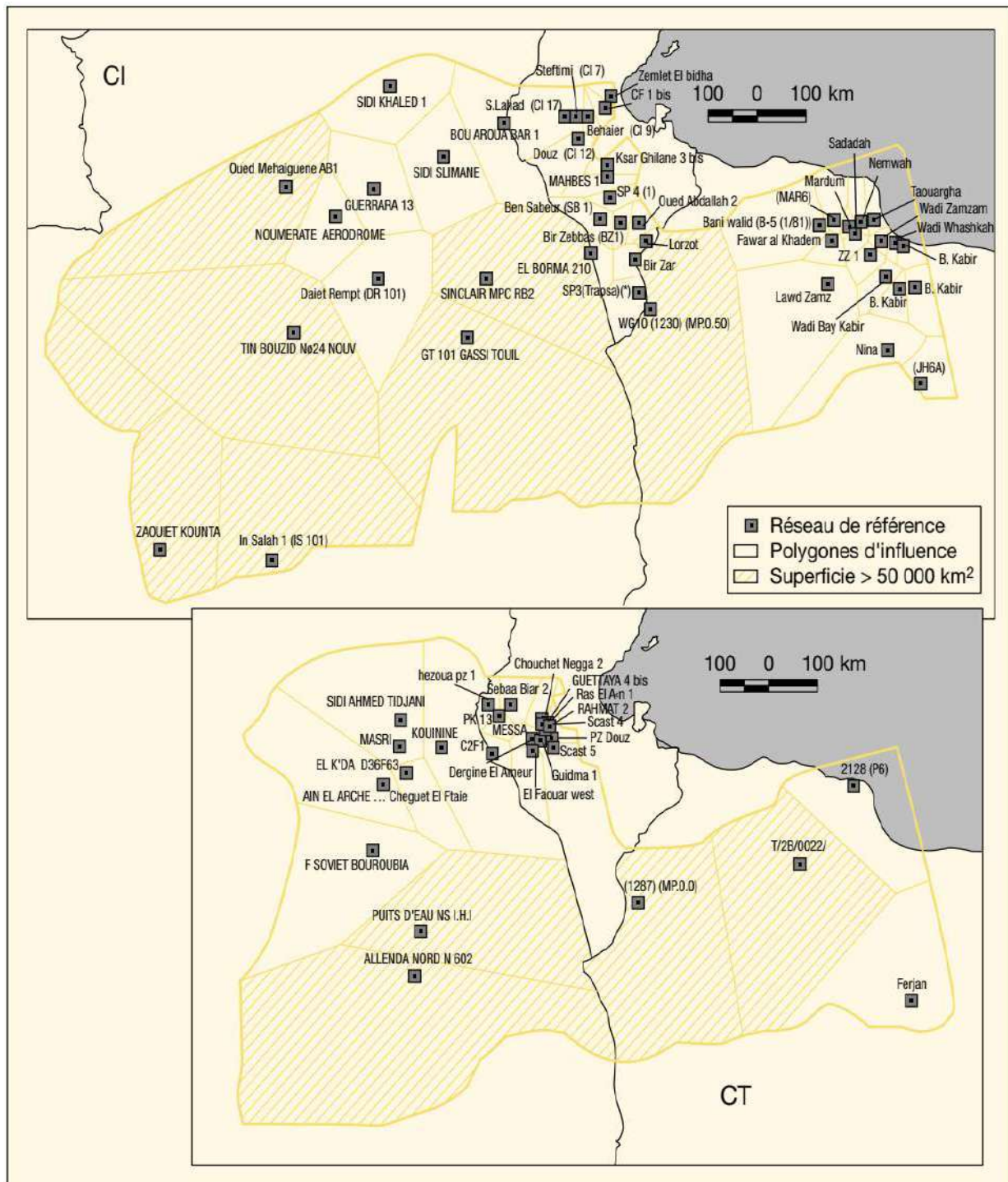


Figure 12.: Réseau de référence du système aquifère du Sahara septentrional (SASS) avec ses 73 points d'eau.(SEPTENTRIONAL)

CI : Continental Intercalaire ; CT : Complexe Terminal.

I.7. Conclusion

L'étude des caractéristiques naturelles et climatologiques de la région de Touggourt a permis de conclure, d'après l'analyse des données, que la région de Touggourt est une région saharienne qui appartient aux zones arides à cause du faible taux de précipitation annuelle et des températures élevées. Elle se caractérise par une activité agricole dans les zones proches du canal d'Oued Righ avec un sol sablonneux et un niveau d'eau superficiel élevé. Tous ces facteurs contribuent à augmenter le degré d'évaporation de l'eau du sol et influencent l'activité agricole, ce qui montre l'importance de cette étude et d'ici apparaît l'importance de connaître le cadre théorique de l'évaporation de l'eau à partir du sol.

CHAPITRE II

Evaporations Du Sols

CHAPITRE II: Evaporations Du Sols

II.1.Introduction

Dans ce chapitre, nous explorons le phénomène d'évaporation du sol en nous basant sur des recherches existantes. L'évaporation est un processus clé qui influence la disponibilité en eau, essentiel pour les écosystèmes et l'agriculture. Ce phénomène est influencé par de nombreux facteurs : il dépend de la façon dont l'eau se déplace dans le sol, de l'énergie nécessaire pour transformer l'eau en vapeur et des conditions climatiques comme la température et le vent. Les caractéristiques propres du sol, la profondeur de la nappe phréatique, et la végétation sont également des facteurs importants qui affectent l'évaporation d'eau à partir le sol. Une compréhension fiable et approfondie de ces processus est nécessaire pour évaluer de manière fiable le taux potentiel d'évaporation du sol et comprendre pleinement les implications de ce processus complexe. Cela permet de mieux comprendre les effets à long terme de l'évaporation de l'eau du sol en termes d'impact agronomique et écologique, ce qui fait de cela un domaine de recherche clé en sciences de l'environnement.

II.2.Phénomène d'évaporation

II.2.1. L'évaporation Phénomène De Diffusion

La diffusion comme mécanisme clé de l'évaporation, processus par lequel l'eau s'échappe de la surface du sol sous forme de vapeur qui se diffuse dans l'atmosphère. Ce phénomène repose sur un gradient de concentration de vapeur d'eau, existant entre la surface du sol et l'air environnant, qui entraîne les molécules d'eau vers les zones où la concentration est plus faible(Cussler, 2009). Selon les lois de Fick, qui décrivent le processus de diffusion moléculaire, le flux de vapeur d'eau vers les régions de moindre concentration est proportionnel au gradient de concentration de cette vapeur, lequel est influencé par plusieurs facteurs, dont la température, l'humidité du sol et la résistance de l'air environnant à la diffusion(Crank, 1979).

a) Première Loi de Fick:

La première loi de Fick quantifie le flux de diffusion à travers un gradient de concentration. Elle stipule que le flux de diffusion est proportionnel au gradient de concentration, et elle s'écrit comme suit :

$$J = -D \cdot \frac{dC}{dx} \dots \dots \dots (2)$$

où :

J : est le flux de diffusion (quantité de matière traversant une unité de surface par unité de temps),

D : est le coefficient de diffusion, une constante qui dépend du type de substance et de l'environnement (par exemple, de la température),

$\frac{dC}{dx}$: est le gradient de concentration en fonction de la distance.

Le signe négatif indique que le flux se fait des zones de haute concentration vers les zones de basse concentration. Cette loi est souvent utilisée pour calculer le taux auquel les molécules d'eau migrent dans un sol en fonction du gradient de concentration.

b) Deuxième Loi de Fick

La deuxième loi de Fick décrit comment la concentration d'une substance change au cours du temps sous l'effet de la diffusion. Elle est utile pour analyser l'évolution temporelle de la diffusion dans un système. Cette loi s'écrit :

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \cdot \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \dots \dots \dots (3)$$

où :

$\frac{\partial C}{\partial t}$: est la dérivée de la concentration par rapport au temps.

$\frac{\partial^2 C}{\partial x^2}$: est la dérivée seconde de la concentration par rapport à la distance.

D : est le coefficient de diffusion, une constante qui dépend du type de substance et de l'environnement (par exemple, de la température),

Cette équation montre comment la concentration d'une substance évolue en fonction du temps et de la distance. En évaporation, elle aide à modéliser comment l'humidité du sol diminue dans le temps à mesure que l'eau se déplace vers la surface pour s'évaporer. L'augmentation de la température accentue l'énergie cinétique des molécules, facilitant ainsi leur passage à l'état gazeux (Bird et al., 2007). Dans le cas du sol, certaines propriétés particulières du milieu poreux, comme la porosité et la tortuosité, influencent le coefficient de diffusion effectif, ce qui joue sur l'efficacité de transport de la vapeur au sein de la matrice du sol (Campbell & Norman, 2000). En l'absence de mouvement significatif de l'air juste au-dessus du sol, la diffusion moléculaire devient significative (Monteith & Unsworth, 2013). Le vent intervient également

en limitant la saturation de l'air en vapeur d'eau en évacuant les molécules de la couche limite, augmentant ainsi le gradient de concentration et favorisant l'évaporation depuis la surface du sol.

II.2.2. L'évaporation Phénomène Energétique

L'évaporation est un processus énergétique fondamental dans le cycle hydrologique, où l'eau passe de l'état liquide à l'état gazeux. Ce processus repose sur l'acquisition d'énergie par les molécules d'eau à la surface, leur permettant de surmonter les forces de liaison et de s'échapper sous forme de vapeur. Cette énergie provient principalement du rayonnement solaire, qui constitue la source énergétique clé alimentant l'évaporation(**Brutsaert, 2013; Shuttleworth, 1993**).

Dans les milieux poreux comme les sols, l'évaporation devient un phénomène encore plus complexe. La structure capillaire du sol joue un rôle crucial dans la disponibilité de l'eau à la surface. Lorsque l'humidité du sol diminue, l'eau migre à travers les pores pour maintenir une évaporation constante jusqu'à ce que les forces capillaires deviennent insuffisantes pour fournir l'eau nécessaire à la surface(**Priestley & Taylor, 1972; Shuttleworth, 1993**).

Les modèles mathématiques tels que le modèle de Penman (1948) offrent une compréhension détaillée de ce phénomène en intégrant des variables climatiques et énergétiques. Ce modèle combine le rayonnement net, la température de l'air, la vitesse du vent, et l'humidité pour estimer l'évaporation potentielle. Une version simplifiée, le modèle Priestley-Taylor, met l'accent sur l'énergie disponible dans les environnements humides, démontrant que la quantité d'évaporation est proportionnelle à l'énergie accessible(**Penman, 1948; Priestley & Taylor, 1972**).

L'évaporation n'est pas seulement influencée par l'énergie externe (comme le rayonnement solaire), mais aussi par les conditions thermodynamiques internes. Ces interactions permettent de lier les conditions environnementales à l'énergie interne du liquide, confirmant que l'évaporation est un phénomène énergétique multifactoriel. Elle est essentielle pour la régulation des cycles naturels de l'eau et pour des applications pratiques dans les domaines agricole et industriel(**Allen et al., 1998; Shuttleworth, 1993**).

II.2.3. L'évaporation Phénomène Climatique

L'évaporation d'eau du sol est étroitement liée aux conditions climatiques, ce qui en fait un processus profondément influencé par les facteurs environnementaux. Les éléments tels que la température, l'humidité relative de l'air, la vitesse du vent, teneur en eau du sol et l'intensité du rayonnement solaire jouent un rôle clé dans la régulation du taux d'évaporation (Ndiaye et al., 2022). Ces paramètres climatiques ne sont pas seulement des variables isolées ; ils interagissent de manière complexe pour influencer la dynamique de l'évaporation. Les études montrent que, l'évaporation pouvait être plus marquée durant la nuit, ce qui reflète l'influence des variations climatiques quotidiennes sur ce processus. Cette observation souligne que même des variations légères dans des paramètres tels que la température nocturne ou le vent peuvent avoir un impact significatif sur l'évaporation (Zhang et al., 2018).

De leur côté, (Dai et al., 2018) ont étudié les conséquences du changement climatique sur l'évaporation et l'aridité terrestre. Ils ont démontré que l'augmentation des températures due aux gaz à effet de serre intensifie l'évaporation potentielle, contribuant ainsi à l'aggravation des sécheresses. Ce lien entre le climat global et l'évaporation locale met en lumière l'importance de considérer l'évaporation comme un indicateur climatique majeur, particulièrement dans le contexte du réchauffement planétaire.

Ces résultats montrent clairement que l'évaporation n'est pas seulement un phénomène physique ; elle est intimement liée aux conditions climatiques globales et locales.

II.3. Facteurs influençant l'évaporation du sol

L'évaporation du sol est le passage de l'eau dans l'air à partir de l'intérieur des pores du sol. Le taux d'évaporation diminue avec le temps en raison de la diminution du gradient de teneur en eau. Le taux d'évaporation du sol peut être exprimé sous la forme d'un taux linéaire sur des périodes spécifiques. De nombreux facteurs peuvent influencer le taux d'évaporation du sol.

Facteurs qui influencent le taux d'évaporation du sol

II.3.1. Facteurs climatiques

II.3.1.1. La température

La température est considérée comme le facteur le plus important influençant le taux d'évaporation, une augmentation de la température favorise le processus d'évaporation en accélérant le mouvement et la diffusion des molécules d'eau dans le sol. En effet, lorsque la

température augmente, les molécules d'eau gagnent plus d'énergie, ce qui accélère le processus d'évaporation(Royer-Gaspard et al., 2019). De plus des températures élevées entraînent une diminution de l'humidité relative de l'air ambiant, créant un déficit de pression de vapeur plus important, qui favorise également l'évaporation du sol. Plus la différence de pression de vapeur entre le sol et l'atmosphère est grande, plus les molécules d'eau se déplacent rapidement du sol vers l'air. La température élevée peut aussi modifier les propriétés physiques du sol, telles que sa porosité et sa perméabilité. L'augmentation de la chaleur fait dilater les particules de sol, ce qui apparaissent comme des espaces poreux plus étendus et accroît le mouvement de l'eau dans le sol tout en facilitant l'évaporation(Belarbi & Saïghi, 2007)

La température joue un rôle important dans ce processus. Augmente la dynamique moléculaire de l'eau, diminue les forces d'attraction de l'eau vis-à-vis de la terre, et diminue le potentiel d'eau du sol. Ces mécanismes en interaction contribuent tous à une augmentation absolue de l'évaporation

II.3.1.2. L'humidité relative

L'humidité relative (HR) joue un rôle fondamental dans le processus d'évaporation du sol en régulant le gradient de pression de vapeur d'eau entre la surface du sol et l'atmosphère. En effet Lorsque l'humidité relative est faible, l'air est loin de la saturation, ce qui augmente le gradient de pression de vapeur, selon la loi de diffusion de Fick, le gradient favorise une évaporation rapide de l'eau du sol, par contre une humidité relative élevée réduit ce gradient, ralentissant le processus de l'évaporation.

Lorsque l'humidité relative dépasse 70 %, l'évaporation chute drastiquement, même sous des températures élevée(Zhang et al., 2023). Ces études confirment que l'humidité relative agit comme une soupape de régulation de l'évaporation.

II.3.1.3. La vitesse

La vitesse du vent change la vitesse de processus d'évaporation du sol. a une influençant sur l'échanges thermiques et de masse entre la surface du sol et l'atmosphère. Une vitesse de vent accrue réduit l'humidité relative près de la surface du sol en éliminant les molécules d'eau évaporées, augmentant ainsi le gradient de concentration de vapeur d'eau et favorisant l'évaporation(Assouline et al., 2008). Où la circulation de l'air peut même provoquer un effet

de pompage, qui augmentant le flux de vapeur d'eau depuis les pores du sol vers l'atmosphère. Ce phénomène est très visible dans les sols poreux. Par exemple, les sols sablonneux, avec de grands pores, réagissent autrement que les sols argileux qui retiennent plus d'eau (**Kahlerras & Belhamri, 2010**). Les vents forts créent des turbulences qui augmentent les échanges thermiques qui augmentent l'évaporation de 30 % dans certaines conditions (**Rivet et al., 2011**). Ces interactions montrent l'importance d'inclure la vitesse du vent dans les modèles hydrologiques.

II.3.1.4. Le rayonnement solaire

Le rayonnement solaire constitue un facteur clé dans le processus d'évaporation. Une intensité accrue de ce rayonnement se traduit généralement par une augmentation des taux d'évaporation. En effet, les rayons du soleil apportent de l'énergie sous forme de chaleur, laquelle chauffe la surface du sol, augmentant ainsi la température de l'eau contenue dans les pores du sol. Lorsque cette eau atteint un niveau énergétique suffisant, elle passe de l'état liquide à l'état gazeux, ce qu'on appelle l'évaporation. Plus l'intensité du rayonnement est élevée, plus l'humidité du sol diminue rapidement.

En parallèle, le rayonnement solaire agit indirectement sur l'évaporation en influençant des processus liés à la température, comme les coefficients de diffusion, les densités et les viscosités des fluides. Par ailleurs, le rayonnement solaire est lui-même influencé par des caractéristiques de l'atmosphère et du sol, ce qui souligne la complexité des interactions en jeu dans ce phénomène (**Heck et al., 2020; Matthias et al., 2000**).

II.3.2. Caractéristiques du sol

II.3.2.1. Caractéristiques physiques du sol

Les propriétés physiques du sol, en particulier la texture et la structure, sont les facteurs les plus importants et les plus influents dans les processus d'eau. Ils régulent l'évaporation. La texture du sol, qui est principalement déterminée par les proportions de sols sablonneux, limoneux et argileux, est un indicateur de la capacité de rétention d'eau du sol et de la dynamique d'évaporation. Le sol argileux, qui a une texture fine, retient plus d'eau en raison de sa grande surface et de ses pores étroits. Il est possible que la perte d'eau par évaporation puisse être limitée. Dans le même temps, en revanche, les sols sablonneux à texture grossière ont des pores plus larges qui permettent une infiltration rapide de l'eau de pluie mais qui ne retiennent qu'une petite quantité d'humidité, entraînant ainsi des taux d'évaporation élevés, en particulier dans des conditions de sécheresse (**Halitim et al., 2016**). La structure du sol, qui est

l'organisation des particules en mottes, est un autre facteur important qui affecte l'évaporation. Une structure bien développée, avec des amas stables, augmente la porosité et facilite l'infiltration efficace de l'eau, tout en diminuant la perte par évaporation due à une meilleure rétention d'humidité. Les sols compacts ou de structure faible, donc moins poreux et ayant tendance à ne pas retenir l'eau, entraînent une évaporation plus rapide de l'eau (Tafasca, 2020).

II.3.2.2. Caractéristiques hydriques du sol

Les propriétés hydrologiques, c'est-à-dire la teneur en humidité du sol, sont les principaux facteurs qui affectent directement le taux d'évaporation de l'eau. Selon Tian et (Tian & Philpot, 2015), la relation entre la teneur en eau du sol et le taux d'évaporation n'est pas simple. Un sol saturé présente un gradient de pression de vapeur élevé entre l'eau du sol et l'atmosphère, ce qui entraîne à son tour l'évaporation de l'eau du sol. Néanmoins, la réduction de la teneur en humidité entraîne une diminution du gradient. Cependant, le taux d'évaporation peut être temporairement augmenté, car l'eau restante est moins liée aux particules de sol et, par conséquent, s'évapore plus facilement. De plus, les variations de la teneur en humidité du sol peuvent également influencer la température du sol, ce qui peut alors également affecter l'évaporation (HAFHOUF, 2022). Les interactions entre la texture, la structure et l'humidité indiquent que les sols à texture fine et bien structurés, qui sont capables de retenir plus d'eau, sont ceux qui diminuent

II.3.3. Niveau de la nappe phréatique

Dans les écosystèmes agricoles, et particulièrement pour la gestion de l'eau, le taux d'évaporation des sols et son lien avec le niveau de la nappe phréatique est un sujet d'une importance particulière. Il est y de comprendre que les nappes phréatiques ont un impact direct sur l'humidité du sol et inversement, l'humidité du sol a un impact sur le taux d'évapotranspiration. Le cas échéant, si la foi à la notion d'une haute nappe phréatique pour un sol favorise une disponibilité d'eau pour la transpiration et l'évaporation, cela conduira à des taux d'évapotranspiration qui peuvent potentiellement être importants, les conséquences négatives de l'irrigation sur la salinité des eaux souterraines sont également d'actualité dans la perspective de la nappe phréatique et de l'évapotranspiration (Pulido-Bosch et al., 2018) notent, que l'irrigation peut en réalité exacerber la salinisation de la nappe phréatique, surtout dans les régions semi-arides. La salinisation des terres pourrait rendre l'eau moins disponible pour les cultures et augmenter ainsi le stress hydrique et les pertes d'eau par évaporation. De ce fait, les techniques et les méthodes d'irrigation doivent, par conséquent, être avancées dans la mesure où les risques d'éventuelles dégradations sont minimisés, les interactions entre le niveau de la

nappe phréatique, l'irrigation et l'évaporation joue un rôle clé dans la compréhension de la salinisation des terres agricoles. Leurs recherches confondent le fait que lorsque les niveaux des eaux souterraines sont élevés, l'eau peut remonter à la surface, les concentrations de sels dans la zone racinaire des plantes et l'augmentation des taux d'évaporation(Wu et al., 2014).

II.3.4. Couverture Végétale

La végétation influence sur les principaux paramètres physiques contrôlant le taux et la vitesse d'évaporation. La végétation influe directement sur la température et le taux d'humidité de l'air et du sol, et cet effet se répercute sur le taux d'évaporation.

Dans le cas d'une couverture végétale dense, les rayons du soleil sont bloqués avant d'atteindre le sol, ce qui réduit la température du sol grâce à l'ombre projetée sur sa surface. Cette diminution de la température réduit l'énergie disponible pour les molécules d'eau, entraînant ainsi une baisse du taux d'évaporation(Matrin & Bourque, 2013), et les racines des plantes absorbent l'eau, ce qui diminue le taux d'humidité du sol, et par conséquent, réduit également l'évaporation(Dong et al., 2022)En outre, le processus de transpiration des plantes contribue à rafraîchir l'air ambiant, ce qui abaisse la température et augmente l'humidité de l'atmosphère. Cette combinaison de facteurs entraîne une diminution du taux d'évaporation de l'eau du sol la végétation dense augmente la transpiration (T) et réduit l'évaporation directe du sol (ES). En conséquence, la végétation dense augmente l'évapotranspiration totale (ET) mais réduit l'évaporation directe du sol (ES).(MingYue et al., 2022).

II.4. Mécanisme d'évaporation du sol

. L'évaporation est un processus clé dans le cycle de l'eau et a des implications importantes pour de nombreux processus environnementaux(Chen et al., 2018; Merta et al., 2006; Teng et al., 2014), l'estimation du taux d'évaporation est un facteur crucial dans de nombreux domaines, en particulier l'agriculture(Abdullahi et al., 2013; Allen, 1990; Merta et al., 2006). Plusieurs théories scientifiques ont expliqué que le taux d'évaporation dépend de différents facteurs climatiques et physiques. Pour estimer l'évaporation du sol, plusieurs formules et approches ont été élaborées(Chen et al., 2018; Gong et al., 2020). D'autre part, dans les zones arides et semi-arides où les conditions climatiques sont très sévères avec des températures très élevées, le phénomène d'évaporation est fortement affecté par ces conditions.

Bien qu'il existe de nombreuses études sur l'estimation de l'évaporation dans ces régions, il y a encore de nombreuses incertitudes en raison de la complexité des phénomènes hydrologiques et dans la compréhension de ce phénomène(Aydin et al., 2005).

Parmi les études les plus importantes menées dans ce domaine, l'étude de Lemon (1956) se démarque par son approche rigoureuse de l'analyse du processus d'évaporation du sol nu. Cette étude a apporté une contribution significative à la compréhension scientifique de ce phénomène en décrivant avec précision les mécanismes impliqués dans les trois étapes distinctes de l'évaporation(Lemon, 1956). La première phase est caractérisée par un taux d'évaporation potentiel qui dépend uniquement des conditions atmosphériques près du sol et est indépendante de l'humidité du sol, dans la deuxième phase, les conditions intrinsèques du sol limitent le transport de l'eau dans le profil et le taux d'évaporation diminue linéairement avec la diminution de l'humidité moyenne du profil du sol, Enfin, dans la troisième phase, la variation de l'évaporation en réponse à la diminution de l'humidité du sol devient très faible, perdant sa linéarité, et cette phase est caractérisée par un mouvement plutôt lent de l'eau vers la surface, en raison de la faible conductivité hydraulique du sol(Flumignan et al., 2012).

L'approche de Ritchie (1972), qui est largement utilisée pour la prédiction de l'évaporation de l'eau à partir de sols nus considère que l'évaporation se produit en deux phases distinctes(Allen, 1990) La première phase ou l'évaporation (ET), est limitée uniquement par la quantité d'énergie disponible à la surface du sol, et la deuxième phase est contrôlée par les propriétés hydrauliques du sol. et permet de fournir des estimations précises de l'évaporation cumulée du sol sur des périodes hydrologiquement significatives. (Aydin et al., 2005; Ritchie, 1972; Suleiman & Ritchie, 2003).

Les travaux menés par Lemon (1956) et Ritchie (1972) soulignent l'influence majeure de la quantité d'eau contenue dans le sol sur les différentes phases du processus d'évaporation de l'eau à partir du sol. À mesure que l'humidité du sol diminue, la quantité d'eau disponible pour l'évaporation diminue également, ce qui entraîne une réduction du taux d'évaporation. Cependant, l'effet de l'humidité du sol sur l'évaporation peut varier en fonction des conditions environnementales(Teng et al., 2014),

II.4.1. L'eau et le sol

Pour étudier l'évaporation de l'eau à partir du sol nu, il est nécessaire de comprendre la relation entre l'eau et le sol, ainsi que la nature des interactions qui se produisent entre eux. En effet, l'eau se trouve dans les vides entre les particules (pores) du sol et peut être classée en trois états en fonction de sa méthode d'existence (Figure 13).

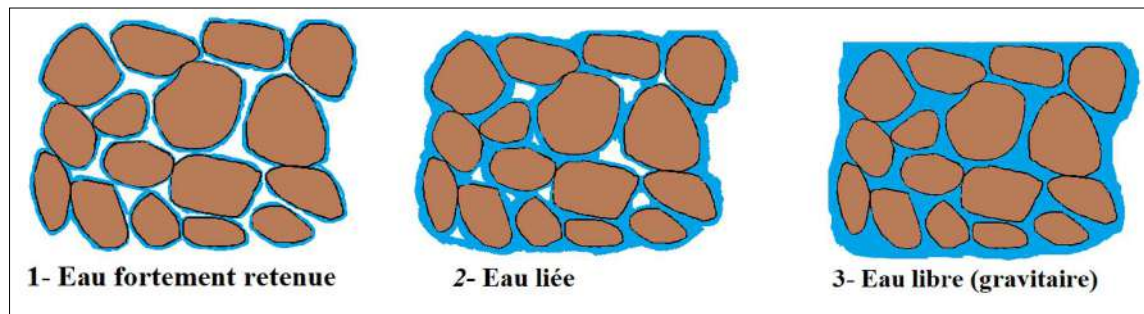


Figure 13. différents états de l'eau dans le sol (Cousin et al., 2017)

- 1- **L'eau fortement retenue** : L'intensité d'absorption dans le sol est supérieure à l'absorption maximale exercée par les racines
- 2- **L'eau liée** : Elle se caractérise par une adhérence entre les molécules d'eau et les particules du sol qui est plus forte que les forces de gravité, empêchant l'eau de s'écouler librement.
- 3- **L'eau libre (gravitaire)** : Elle se caractérise par un écoulement libre ou gravitaire dans le sol et est facilement éliminée par drainage

II.4.2. Les pores du sol

Toutes les interactions et phénomènes physiques entre l'eau et le sol se produisent dans les espaces entre les particules du sol (pores) (Figure 14). Dans un échantillon de sol, on peut distinguer deux types de pores : les pores connectés et les pores accessibles au fluide, également appelés porosité effective, ainsi que les pores fermés qui ne sont pas accessibles au fluide. On parle alors de porosité fermée (Hutin, 2020).

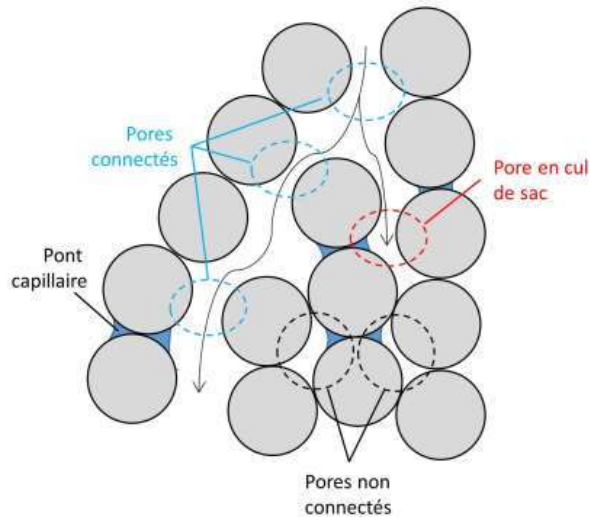


Figure 14. Différents types de pores(Hutin, 2020)

L'évaporation de l'eau est l'un des phénomènes les plus importants qui se produisent dans ces pores et est influencé par la relation entre l'eau et le sol. Le taux de remplissage des pores du sol est appelé le degré de saturation (HS_r) c'est la fraction volumique du liquide (V_e : volume d'eau) par rapport au volume des vides (V_p : volume des pores). Il s'exprime généralement en pourcentage (Kébré, 2013). Le sol passe par différents états en fonction le degré de saturation (S_r) de ces pores et est donné par la relation suivante.

$$HS_r = \frac{V_e}{V_p} \times 100 \dots \dots \dots (4)$$

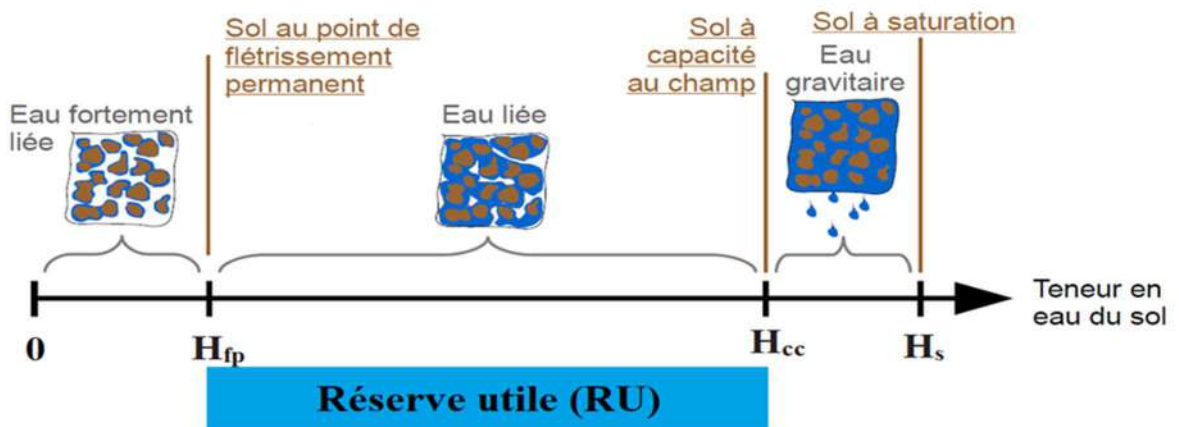


Figure 15.différents types d'humidité du sol(Cousin et al., 2017)

La réserve utile en eau du sol (RU) est la quantité d'eau disponible pour les plantes dépend de la capacité du sol à stocker et à restituer l'eau(Goulet et al., 2004). D'un point de vue

physique, est la quantité d'eau stockée dans le sol entre deux états hydriques caractéristiques. Le point de capacité de champ, où le sol est saturé d'eau. Et le point de flétrissement permanent, où les plantes ne peuvent plus absorber l'eau du sol (**Kirkham, 2004**). Lorsque la réserve utile d'eau du sol est élevée, une plus grande quantité d'eau est disponible pour l'évaporation, Avec la diminution de la réserve utile, la quantité d'eau disponible pour l'évaporation diminue également, ce qui entraîne un changement dans le mécanisme du phénomène(**Aydin et al., 2005; Huixiao & Simmonds, 1997; Suleiman & Ritchie, 2003**), ce qui peut avoir un impact sur le climat local et régional, Nous discutons également des implications de cette relation pour la gestion des ressources en eau et pour l'agriculture, en particulier dans les régions arides et semi-arides.

II.5.Méthodes de mesure de l'évaporation

La mesure précise des composants fondamentaux du cycle hydrologique, tels que l'évaporation, est nécessaire dans de nombreux domaines. En agriculture, la détermination exacte du taux de consommation d'eau par les plantes est essentielle pour maximiser les rendements, tandis qu'en hydrologie, elle est indispensable pour prévoir les niveaux des lacs ou les débits des cours d'eau. C'est pour cette raison que les méthodes de détermination du taux d'évaporation ont suscité une attention considérable au fil des ans, la détermination précise de l'évaporation est cruciale dans le domaine de l'exploitation et de la gestion des ressources en eau. En effet, dans la plupart des cas, l'eau évaporée n'est plus disponible pour d'autres usages, et la quantité d'eau évaporée doit être compensée par une source externe, par le passé, une grande partie des recherches sur la mesure de l'évaporation était motivée par le besoin d'évaluer l'évaporation à long terme des lacs. Une partie des nombreuses études menées sur l'évaporation s'est concentrée sur la description quantitative des processus à l'origine de ce phénomène. L'adéquation des différentes méthodes utilisées pour déterminer l'évaporation des lacs dépend fortement de ce niveau d'analyse des processus. La disponibilité de la méthode par bassin d'évaporation au début du XXe siècle a été rendue possible grâce aux progrès technologiques. Une large gamme d'instruments a été développée et utilisée dans des études scientifiques. Ces instruments avaient souvent pour objectif d'étudier les processus fondamentaux responsables de l'évaporation plutôt que de dériver un paramètre utilisé dans d'autres recherches.

II.5.1. Méthodes directes

Ces méthodes permettent de mesurer physiquement le taux d'évaporation. Elles fournissent des relevés à court terme, soit immédiatement, soit sur une période de quelques jours ou semaines. Le principe de ces méthodes repose sur le contrôle et la mesure de la quantité d'eau, ainsi que sur la détermination du taux auquel l'eau est perdue. Dans les méthodes de mesure directe, les pertes par évaporation sont déterminées, et non calculées.

Parmi les avantages de ce type de méthode, on note que les relevés sont effectués dans des conditions contrôlées. Si l'évaporation s'arrête, cela indique immédiatement un problème. Ces méthodes sont utiles pour établir des données locales à utiliser en complément de valeurs calculées. De nombreuses mesures par bac sur plusieurs années, dans différentes localités, peuvent contribuer, par exemple, à élaborer des facteurs d'ajustement évaporatif pour toute équation de rendement calculé.

II.5.1.1. Bac class A

Le bac de classe A (Figure 16) est un dispositif standard largement utilisé pour estimer l'évaporation des surfaces libres d'eau. Il se compose d'un récipient cylindrique en métal galvanisé, d'un diamètre de 1,22 m et d'une hauteur de 25 cm, rempli d'eau jusqu'à un niveau prédéfini. Placé à ciel ouvert, généralement sur une surface enherbée ou en gravier, il simule les conditions d'évaporation d'un plan d'eau.

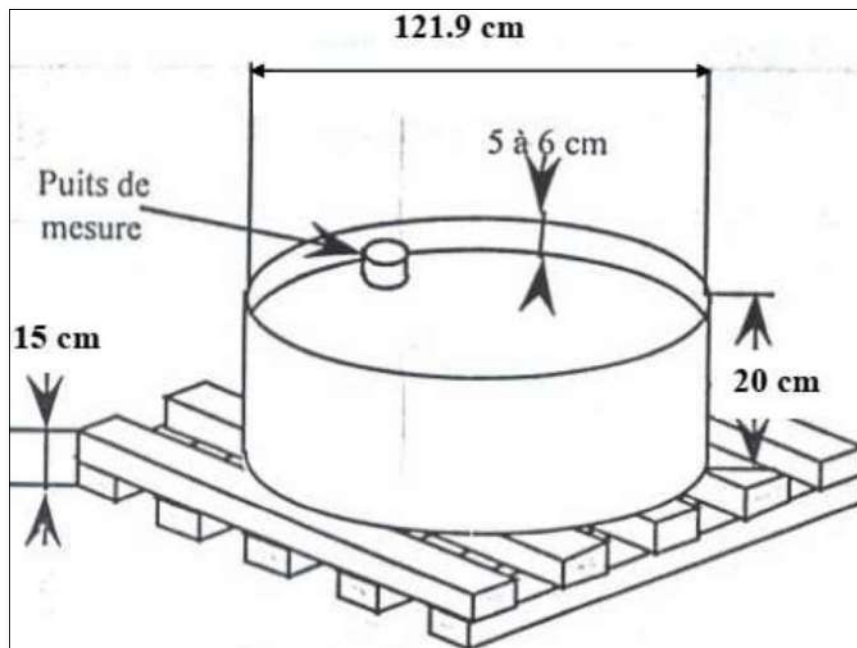


Figure 16. Bac Class A (Laborde, 2000)

La méthode consiste à mesurer quotidiennement la diminution du niveau d'eau due à l'évaporation, corrigée des précipitations et des apports externes. L'évaporation obtenue est ensuite ajustée à l'aide d'un coefficient de bassin pour tenir compte des spécificités locales, notamment la taille et la configuration du plan d'eau réel. Cette méthode est particulièrement prisée dans l'agriculture et la gestion des ressources hydriques en raison de sa simplicité et de son efficacité. Elle fournit une base de données essentielle pour estimer les besoins en eau des cultures et pour modéliser les processus hydrologiques (Jacobs et al., 1998).

II.5.1.2. Évaporomètre Piche

L'évaporomètre de Piche (Figure 17) est un instrument compact et précis, souvent utilisé pour évaluer l'évaporation dans des environnements spécifiques. Il se compose d'un tube gradué rempli d'eau, fermé à son extrémité inférieure par une feuille de papier filtre humidifiée, exposée à l'air. L'eau s'évapore à travers le papier, et la diminution du niveau d'eau dans le tube, mesurée à intervalles réguliers, indique la quantité évaporée.

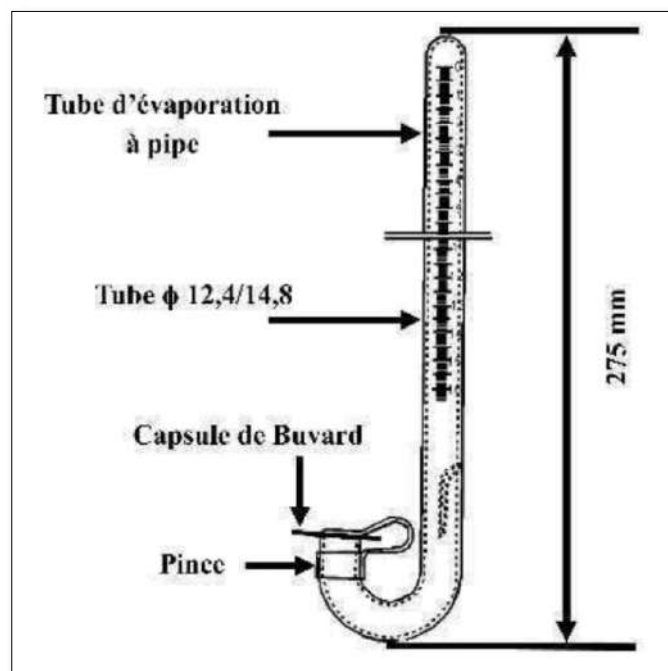


Figure 17. Evaporomètre Piche (Skhiri, 2019)

Contrairement au bac de classe A, cet instrument est particulièrement adapté aux environnements contrôlés, comme les serres ou les laboratoires, où les conditions climatiques peuvent être ajustées. De plus, il permet d'évaluer les variations locales d'évaporation en fonction de paramètres climatiques tels que la température, l'humidité et le vent. Grâce à sa

précision, il est également utilisé pour fournir des données spécifiques dans des études de microclimat ou d'écosystèmes particuliers(De Vries & Venema, 1954).

II.5.1.3. Lysimètres

Les lysimètres (figure 18) sont des dispositifs de mesure pratiques et de terrain, utilisés dans de nombreuses études telles que les recherches sur l'infiltration, le ruissellement et l'évaporation(Gao et al., 2025; Kahale, 2022), ces études sont importantes pour le contrôle du cycle hydrologique et l'organisation des opérations d'irrigation(Balugani et al., 2023; Tamimi et al., 2022), ainsi que pour la gestion rationnelle de l'exploitation des ressources en eau, les lysimètres sont des appareils variés selon l'objectif de l'étude, avec des tailles différentes, allant des modèles simples aux modèles complexes équipés de nombreux capteurs.

De nombreuses recherches ont démontré la fiabilité des résultats obtenus, et leur utilisation est répandue en raison de leur facilité de manipulation et de la simplicité des mesures(Meissner et al., 2020). Dans les études sur l'évaporation, ils reposent sur la différence de poids entre le début et la fin de l'expérience. (Bennamia et al., 2024).



Figure 18. Le LYSIMETRE GGI-500-50M

II.5.2. Méthode gravimétrique

La méthode gravimétrique est une technique directe et précise pour mesurer l'évaporation en laboratoire ou sur le terrain. Elle repose sur la variation de la masse d'une quantité d'eau exposée à l'air libre dans un récipient. L'eau s'évapore en fonction des conditions climatiques ce mesure à l'aide d'une balance sensible. La diminution de la masse entre deux pesées consécutives correspond à l'eau évaporée. Cette méthode est particulièrement utile pour des études détaillées en hydrologie, où des mesures précises de l'évaporation sont nécessaires. Cependant, elle est généralement utilisée dans des conditions contrôlées, car les facteurs environnementaux comme le vent ou les précipitations peuvent affecter les résultats en milieu ouvert. En outre, cette méthode permet d'évaluer l'évaporation à petite échelle, comme dans les sols, les plantes, ce qui en fait un outil indispensable pour la recherche en hydrologie et en science des sols.

II.5.3. Méthodes indirectes

Les méthodes indirectes d'estimation de l'évaporation reposent sur des modèles théoriques et des données climatiques mesurées. Elles permettent d'estimer l'évaporation à partir de paramètres environnementaux en utilisant des équations mathématiques. Parmi les avantages de ce type de méthode, on note que les relevés sont effectués dans des conditions contrôlées. Voici les principales méthodes.

II.5.3.1. Formule de Penman-Monteith (FAO1956)

La formule de Penman-Monteith est une méthode standard recommandée par l'Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO) pour estimer l'évapotranspiration de référence (ET₀). Cette formule est utilisée pour calculer la quantité d'eau nécessaire pour remplacer la perte d'eau des sols et des plantes due à l'évaporation et à la transpiration

$$E = \frac{0.408 \times \Delta \times (R_n - G) + \gamma \times \frac{900}{T + 273} \times u \times (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma \times (1 + 0.34 \times u)} \dots \dots \dots (5)$$

Avec

- E : évaporation (mm/jour)
- Δ : pente de la courbe de pression de vapeur (kPa/°C)
- R_n : rayonnement net (MJ/m²/jour)
- γ : constante psychrométrique (kPa/°C)
- u : vitesse du vent à 2 mètres (m/s)
- D : déficit de pression de vapeur (kPa)

- **G** : Flux de chaleur dans le sol (MJ/m²/jour)
- **T** : Température moyenne de l'air (°C)
- (**e_s – e_a**) : Déficit de pression de vapeur (kPa)

II.5.3.2. Formule de Thornthwaite 1948

La formule de Thornthwaite, développée en 1948, est une méthode simplifiée pour estimer l'évapotranspiration (ET) basée uniquement sur les températures mensuelles. Elle repose sur l'idée que la température est étroitement liée à l'énergie disponible pour le processus d'évaporation (Kumar et al., 1987; Xu & Singh, 2000).

Formule :

$$ETP = 16 \left(\frac{10 T}{I} \right)^a \times K \dots \dots \dots (6)$$

- ET : évapotranspiration mensuelle (mm).
- T : température moyenne mensuelle (°C).
- I : indice thermique annuel, calculé comme
- a : coefficient empirique dépendant de I .
- K : coefficient d'ajustement

II.5.3.3. Formule de Turc 1960 (F60)

La méthode de Turc est une formule empirique développée pour estimer l'évapotranspiration potentielle (ETP) dans des climats tempérés. Elle intègre la température et le rayonnement solaire comme principaux facteurs influençant l'évaporation (Lecarpentier, 1975).

La formule F60 peut s'écrire

$$ETP = (I_g + 50) \left(0.013n \frac{t}{t + 15} \right) \left(1 + \frac{50 - H_r}{70} \right) \dots \dots \dots (7)$$

- *n* : nombre de jours.
- *I_g* : la radiation globale en (cal/cm² / jour).
- *t* : température en (°C).
- *H_r* : humidité relative.

II.5.3.4. Formule de Blaney-Criddle

La méthode Blaney-Criddle est une méthode utilisée pour estimer l'évapotranspiration potentielle (ETP) en se basant principalement sur la température et la durée du jour. Développée en 1945, elle est largement utilisée dans les régions semi-arides.:

$$ETP = P \left(\frac{T}{100} \right) K \dots \dots \dots (8)$$

- P: la proportion de la durée du jour mensuelle par rapport à la durée du jour annuelle.
- T: est la température moyenne mensuelle (°C).
- K: est un coefficient de correction qui dépend du type de culture et de la région géographique.

Tableau 2. Comparatif des équations d'estimation de l'évaporation

Équation	Variables requises	Conditions limites (hypothèses)	Caractéristiques du milieu d'origine	Pertinence pour la région de Touggourt
<i>Penman–Monteith (FAO-56)</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Température de l'air - humidité relative - vitesse du vent - rayonnement net ou durée d'insolation 	<ul style="list-style-type: none"> – Surface de référence : gazon standard (hauteur 0,12 m) avec humidité suffisante. – Équilibre énergétique journalier stable. – Données climatiques complètes et fiables. 	Généralisée par la FAO à l'échelle mondiale.	La plus appropriée : lorsque les données climatiques (T, RH, U ₂ , R _s) sont disponibles.
<i>Thornthwaite (1948)</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Température moyenne mensuelle - indice thermique annuel - nombre de jours du mois 	<ul style="list-style-type: none"> – Basée uniquement sur la température comme indicateur d'énergie solaire. – Suppose que la température est le facteur dominant de l'évaporation. – Humidité du sol suffisante. 	Climat humide à tempéré (est des États-Unis).	Moins fiable : dans les zones arides car elle néglige le rayonnement, le vent et l'humidité.
<i>Turc (1960)</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Température - rayonnement solaire (ou durée d'insolation) - humidité relative 	<ul style="list-style-type: none"> – Développée pour les climats européens humides. – Relation linéaire supposée entre rayonnement et température. – Fiable si RH > 50 %. 	Climat tempéré et humide (France).	Sous-estime : les valeurs dans les milieux très secs (RH faible).
<i>Blaney–Criddle (1950)</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Température moyenne - durée du jour (fraction journalière) - coefficient cultural (Kc) 	<ul style="list-style-type: none"> – Lie l'évaporation à la température et à la durée d'insolation. – Suppose l'absence de stress hydrique. – Conçue pour des zones agricoles tempérées. 	Régions agricoles semi-humides des États-Unis.	Peu précise : car le vent et l'humidité ne sont pas pris en compte. Calibration mensuelle locale nécessaire.

Le (Tableau.2) représente la comparaisons des équations d'estimation de l'évaporation ces Variables requises, Conditions limites (Aschonitis et al., 2022; Edebeatu et al., 2025; Thongkao et al., 2022; Trajkovic & Kolakovic, 2009) et Pertinence pour la région de Touggourt

II.6. Conclusion

D'après le cadre théorique de l'évaporation de l'eau à partir du sol, on peut dire que le phénomène de l'évaporation joue un rôle très important dans l'équilibre hydrique du sol et dans la réussite des activités agricoles surtout dans les zones arides comme la région de Touggourt, plusieurs facteurs comme la nature du sol, la température, le vent et l'humidité influencent directement le taux d'évaporation. Cette connaissance théorique permet de mieux comprendre les pertes d'eau et de chercher des moyens simples pour les réduire. Le but de cette étude est d'estimer le taux d'évaporation de l'eau du sol afin de mieux gérer les ressources hydriques dans la région, à travers l'étude théorique de l'évaporation à partir du sol, nous allons utiliser des appareils appelés lysimètres, car ils nous donnent les valeurs réelles de l'évaporation du sol grâce à leur exposition directe aux conditions naturelles. Avec la facilité de calcul de l'évaporation et la présence d'appareils de mesure de référence, nous pourrions recueillir des données importantes pour notre étude. Dans le chapitre suivant, nous allons présenter l'étude expérimentale qui montre les résultats pratiques de cette recherche.

CHAPITRE III

Etude Expérimentale De L'évaporation Sur Les Lysimètres Et Les Champs Agricoles

CHAPITRE III: Etude expérimentale de l'évaporation sur les lysimètres et les champs agricoles

III.1. Introduction

Ce chapitre présente le travail expérimental réalisé pour déterminer l'évaporation réelle des sols dans des conditions contrôlées. L'étude repose principalement sur l'utilisation de mini-lysимètres de type GGI-500, qui permettent une mesure précise de l'évaporation par la méthode gravimétrique. Les mini-lysимètres sont conçus pour reproduire les caractéristiques naturelles du sol et pour capturer les variations de l'évaporation selon différents degrés de saturation.

Pour renforcer la fiabilité des données obtenues, deux méthodes complémentaires ont été intégrées à l'étude : le bac classe A et le dispositif de Piche. Ces approches permettent de comparer les résultats des lysимètres à des mesures standardisées et d'évaluer la cohérence des observations dans différentes conditions climatiques.

Ainsi, ce chapitre s'articule autour de la conception, de l'installation et de l'exploitation des lysимètres, ainsi que de la validation des mesures à travers des outils de référence, en mettant en évidence les facteurs influençant le processus d'évaporation.

III.2. Le Site expérimentale

L'étude a été réalisée à la Station météorologique (Figure20) de la station expérimentale de l'Institut national de la recherche agronomique d'Algérie-INRAA (station Sidi Mahdi), correspondant à latitude : $33^{\circ}.04.293'$ et à longitude : $006^{\circ}.05.788'$ E à 7 Km au sud-est de Touggourt sur le plateau oriental de l'Oued-Righ (figure19). La région se caractérise par un climat saharien qui est connu par ses températures élevées atteignant parfois 50°C durant la période estivale.



Figure 19. Station expérimentale de l'Institut National de la Recherche Agronomique INRAA (Station Sidi Mahdi). Touggourt



Figure 20. Station météorologique de l'INRAA. Touggourt

III.3. Matériels et méthodes

III.3.1. Matériels

III.3.1.1. Les Lysimètres

Le travail expérimental est basé sur la détermination de l'évaporation réelle par la méthode du poids, avec dix mini-lysismètres de type GGI-500 souvent utilisés dans les études d'évaporations des sols (**Boast & Robertson, 1982; Facchi et al., 2016; Flumignan et al., 2012**). De nombreuses études ont également confirmé que les mini-lysismètres sont efficaces pour estimer l'évaporation avec précision, tout en présentant une faible marge d'erreur. Par conséquent, ils peuvent être utilisés dans le cadre de ces études (**Allen, 1990; Daamen et al., 1993; Liu et al., 2002; Ruth et al., 2018**). Les mini-lysismètres ont été installés dans le champ agricole de la station expérimentale et sont divisés en cinq paires en tenant compte du gradient du degré de saturation (S_r) du sol afin d'étudier les effets de l'humidité sur l'évaporation. Les lysismètres ont été fabriqués localement par des conduites en PVC Pn 6 bars composées de trois corps : le cylindre évaporateur avec un diamètre intérieur de 24 cm et une épaisseur de paroi de 6 mm et 50 cm de profondeur, L'extrémité inférieure du cylindre-évaporateur était bien fermée par un bouchon concave au fond, avec perforations pour drainer l'excès d'eau dans le bassin de drainage, tandis que l'extrémité supérieure était maintenue ouverte pour permettre l'évaporation de l'eau du sol, avec une couverture circulaire pour empêcher l'échauffement du cylindre évaporateur, et le cylindre enveloppe d'un diamètre intérieur de 30 cm et une épaisseur de paroi de 7,5 mm. L'extrémité inférieure est fermée hermétiquement à l'aide d'un bouchon en fibres de verre et de la résine de polyester. Ceci afin d'assurer l'étanchéité du fond et son isolement du sol du champ agricole pour éviter toutes les influences possibles sur le système, et pour la récupération des eaux de drainage, un bassin de 15 cm de profondeur qui s'emboîte directement avec le cylindre évaporateur et sera fixé par un crochet et un joint d'étanchéité, pour tous les dosimètres, l'assemblage et le collage à l'aide de résine de polyester.

III.3.1.2. Mini-lysismètres GGI-500 : Matériaux et fabrication

A Matériau de base :

Les lysismètres (figure 21) sont fabriqués à partir de conduites en PVC de type PN 6 bars, choisies pour leur résistance mécanique et chimique, leur imperméabilité, ainsi que pour leur facilité de manipulation lors des opérations de coupe, de collage et d'assemblage.



Figure 21. Lysimètres (à gauche lysimètre dissocié)

B Caractéristiques des Mini-lysimètres

Dimensions :

- section transversale du cylindre-évaporateur : **452.16 cm²**.
- diamètre du cylindre-évaporateur : **Ø250 mm**.
- hauteur du cylindre-évaporateur : **50 cm**.
- dimensions de l'évaporateur assemblé : **Ø315 x 66 cm**.
- dimensions de bassin du drainage : **Ø250 x 15 cm**

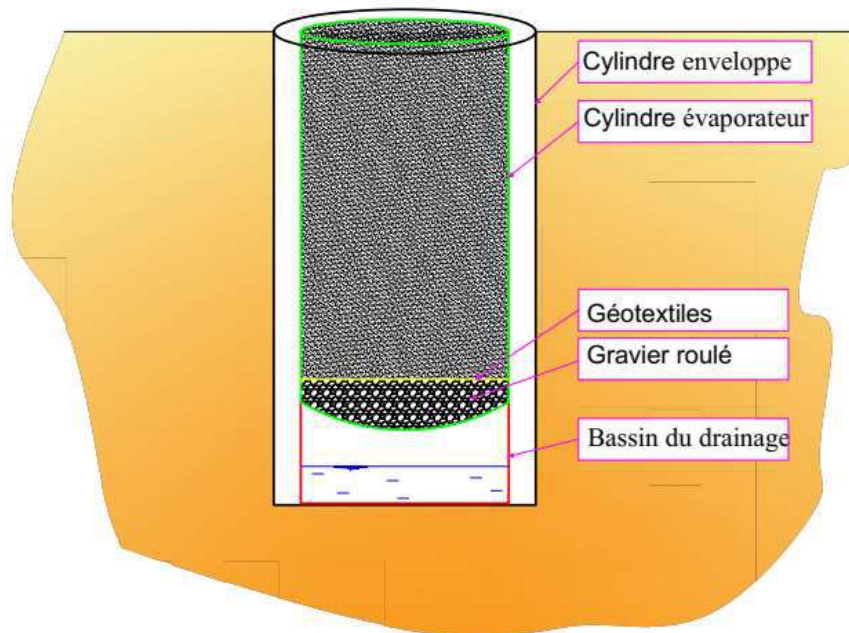


Figure 22. Schéma de conception du lysimètre

III.3.1.3. Balances électroniques

Les mesures des variations de poids ont été effectuées chaque (24 - 48) heures avec une balances électroniques (figure 23) caractérisé par une sensibilité de ± 5 g équivalente à 0.11 mm d'évaporation.

Figure 23. Balance électronique pour la mesure du poids



III.3.1.4. Bac class A

Le bac classe A (figure 24) est un outil standard utilisé pour mesurer l'évapotranspiration potentielle (ETP) dans des conditions climatiques spécifiques.



Figure 24. Bac class A pour la mesure de l'évapotranspiration

- **Principe de fonctionnement :**

Il s'agit d'un récipient circulaire en métal, généralement de 1,20 m de diamètre et de 25 cm de profondeur, rempli d'eau jusqu'à un niveau donné. L'évaporation est mesurée par la variation du niveau d'eau sur une période déterminée.

- **Importance dans l'étude :**

Il fournit une mesure de référence pour l'évaporation potentielle dans des conditions standardisées en tenant compte les paramètres climatiques et permet de comparer les données obtenues à partir des lysimètres et facilitant l'évaluation des différences entre l'évaporation réelle mesurée par les lysimètres et l'évaporation potentielle estimée par le Bac Class A, cette comparaison est essentielle pour ajuster les modèles d'évaporation et mieux comprendre les interactions entre le sol, l'eau et l'atmosphère(Chu et al., 2010; Jacobs et al., 1998).

Il sert à valider les résultats des mini-lysimètres en termes de tendances d'évaporation.

- **Avantages :**

les résultats du bac classe A sont fortement dépendants des conditions climatiques, notamment la température, l'humidité relative, la vitesse du vent, et le rayonnement solaire.

III.3.1.5. Le Pich

L'évaporomètre de Piche (figure25) est un dispositif compact et simple conçu pour mesurer l'évaporation dans des microclimats, à des conditions spécifiques.



Figure 25.Évaporomètre Piche

Avantages dans cette étude :

- Facilité d'installation et de manipulation, particulièrement en champ.
- Permet des mesures continues de l'évaporation dans des conditions spécifiques, en complément des données des lysimètres.
- Utile pour évaluer les variations d'évaporation dans des environnements microclimatiques différents.(De Vries & Venema, 1954)

III.3.1.6. Anémomètre

L'anémomètre est un instrument utilisé pour mesurer la vitesse du vent. Dans cette étude, la vitesse du vent a été mesurée à une hauteur de 2 mètres (figure 26).



Figure 26. Anémomètre

III.3.1.7. Abri météorologique

Un abri météorologique (figure 27) est une structure conçue pour protéger les instruments météorologiques des influences directes de l'environnement, tout en permettant une mesure précise et fiable des paramètres climatiques.



Figure 27. Thermomètre sec ; Thermomètre humide. Abri météorologique (à droite).

Structure :

- Fabriqué généralement en bois.
- Élevé au-dessus du sol
- Peint en blanc pour réduire l'effet du rayonnement solaire.

Instruments :

- Thermomètre à mercure sèche pour mesurer la température de l'air.
- Thermomètre à mercure humide pour mesurer la température humide, et en utilisant un abaque psychrométrique, en détermine L'humidité relative de l'air

III.3.1.8. Champ expérimental

Les lysimètres ont été installés dans un champ expérimental de dimensions (20 x 3) m aménagé spécifiquement pour cette étude (figure 28) , Le champ est situé à proximité immédiate de la station météorologique. Pour assurer un suivi précis des paramètres météorologiques.



Figure 28. Installation des lysimètres sur le champ expérimental

III.3.2. Méthodes

Pour réaliser une étude sur la relation entre l'évaporation, les paramètres météorologiques et le degré de saturation du sol, nous suivons le protocole expérimental suivant.

- Détermination des caractéristiques techniques du sol.
- Gradient de degré de saturation (variable indépendante).
- Enregistrement des données lysimétriques et des paramètres météorologiques.
- Analyse statistique des résultats obtenus.
- Modélisation statistique
- Validation du modèle :

III.3.2.1. Détermination des caractéristiques techniques du sol

A : Étude granulométrique

L'étude granulométrique est une étape essentielle dans la détermination des caractérisations des sols, car elle permet de déterminer la répartition des particules selon leur taille. Cette analyse est fondamentale pour comprendre les propriétés hydrauliques et physiques du sol, qui influencent directement les processus d'évaporation.

- Identifier les proportions et le type granulaire sable, limon et argile.

- Comprendre la structure du sol et son impact sur la rétention et la migration de l'eau.
- Déterminer la texture du sol en fonction des résultats granulométriques (classification selon le triangle textural).

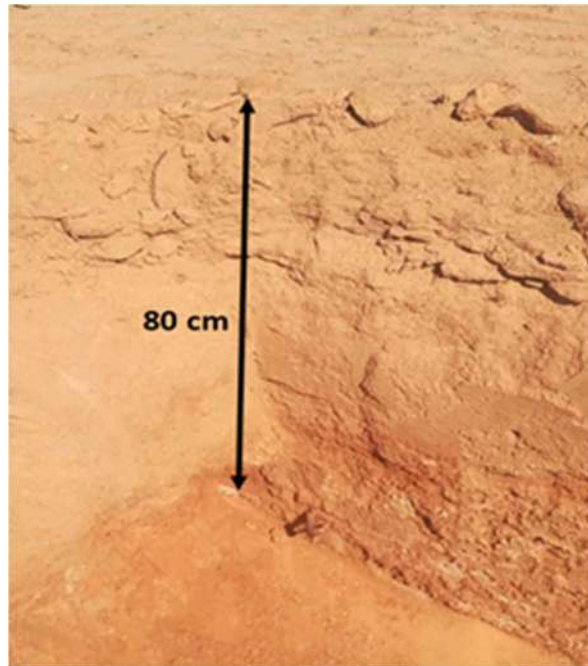


Figure 29. Coupe transversale des couches du sol

- Prélever des échantillons de sol (figure 29) représentatifs du champ expérimental, à différentes profondeurs (**0-10 cm, 10-30 cm, 30-40 cm , 40-50 cm**).
- Sécher les échantillons à l'air libre ou à 105°C dans une étuve pour éliminer l'humidité.
- Analyse par tamisage et sédimentation

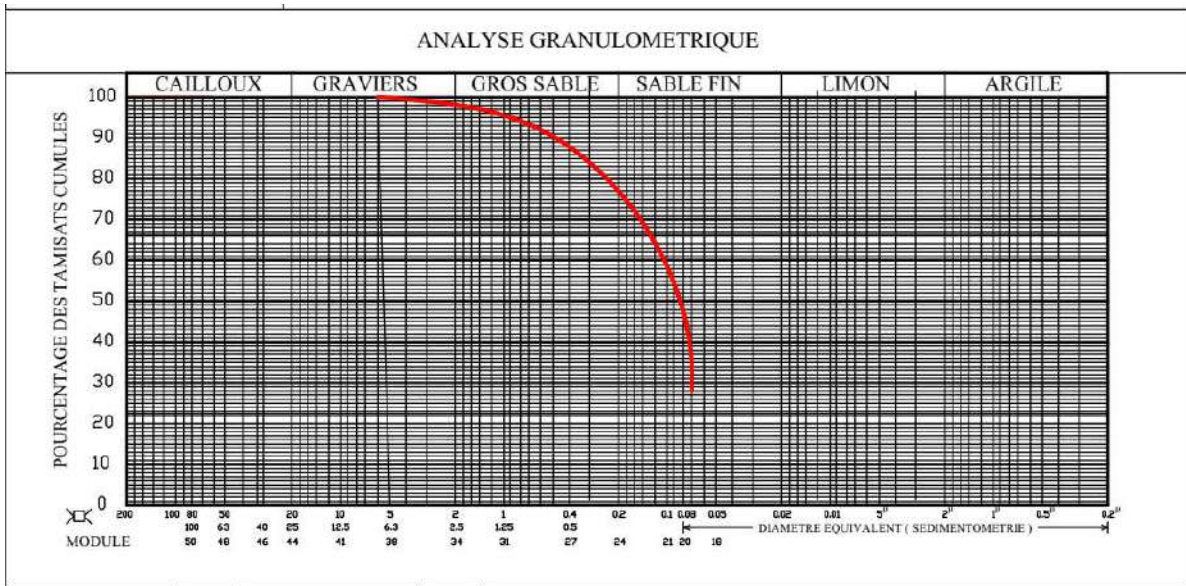


Figure 30. Courbe granulométrique représentant la distribution des particules du sol.

Le Classification texturale granulométrique du sol étudié est celle des sable fin (figure 30).

III.3.2.2. Détermination des caractéristiques hydriques du sol

Pour déterminer les caractéristiques hydriques du sol, nous effectuons une série de mesures de terrain et de calculs.

Après avoir rempli les mini-lysimètres avec le sol du champ agricole sec, les caractéristiques suivantes ont été enregistrées.

- Poids du mini-lysimètre avec le sol sec : 33.5 kg.
 - Poids du sol sec : 28.1 kg.
 - Poids du mini-lysimètre vide : $33.5 \text{ kg} - 28.1 \text{ kg} = 5.4 \text{ kg}$.

Afin de déterminer les caractéristiques hydriques du sol, nous effectuons un processus d'irrigation progressif jusqu'à saturation, et avec le début du drainage, nous arrêtons l'irrigation et attendons que tout l'excès d'eau se soit drainé sur une durée de 24 heures, Les caractéristiques suivantes ont été enregistrées.

- Poids du mini-lysimètre saturé : 41.15 kg.
- Volume d'eau à saturation : 7.65 L (ou 7.65 kg, car 1 L d'eau \approx 1 kg).
- Poids du mini-lysimètre après drainage 24 h : 37.9 kg.
- Volume d'eau après drainage : 6.2 L (ou 6.2 kg).

Humidité de saturation (Hs) :

L'humidité de saturation est la teneur en eau lorsque le sol est complètement saturé. Elle est calculée comme suit :

$$H_s = \frac{Meau_s}{Msol_{sec}} \times 100 \dots \dots \dots (10)$$

avec

Meau_s : Masse d'eau à la saturation (7.65 kg)

Msol_{sec} : Masse du sol sec (28.1 kg)

Hs= 27.22 % pour un degré de saturation de **HSr = 100%**

Humidités à la capacité au champ (Hcc)

L'humidité à la capacité au champ est la teneur en eau après drainage de l'excès d'eau. Elle est calculée comme suit:

$$H_{cc} = \frac{Meau_c}{Msol_{sec}} \times 100 \dots \dots \dots (11)$$

Meau_{cc} : Masse d'eau à la capacité au champ (6.2 kg)

Msol_{sec} : Masse du sol sec (28.1 kg)

Hcc= 22.06 % pour un degré de saturation de **HSr = 81.04%**

III.3.2.3. Gradient de degré de saturation (variable indépendante)

Pour obtenir un degré de saturation bien déterminé du monolithe de sol, l'humidification a été réalisée artificiellement jusqu'à atteindre le degré de saturation suggéré pour chaque paire de lysimètres (Figure31).

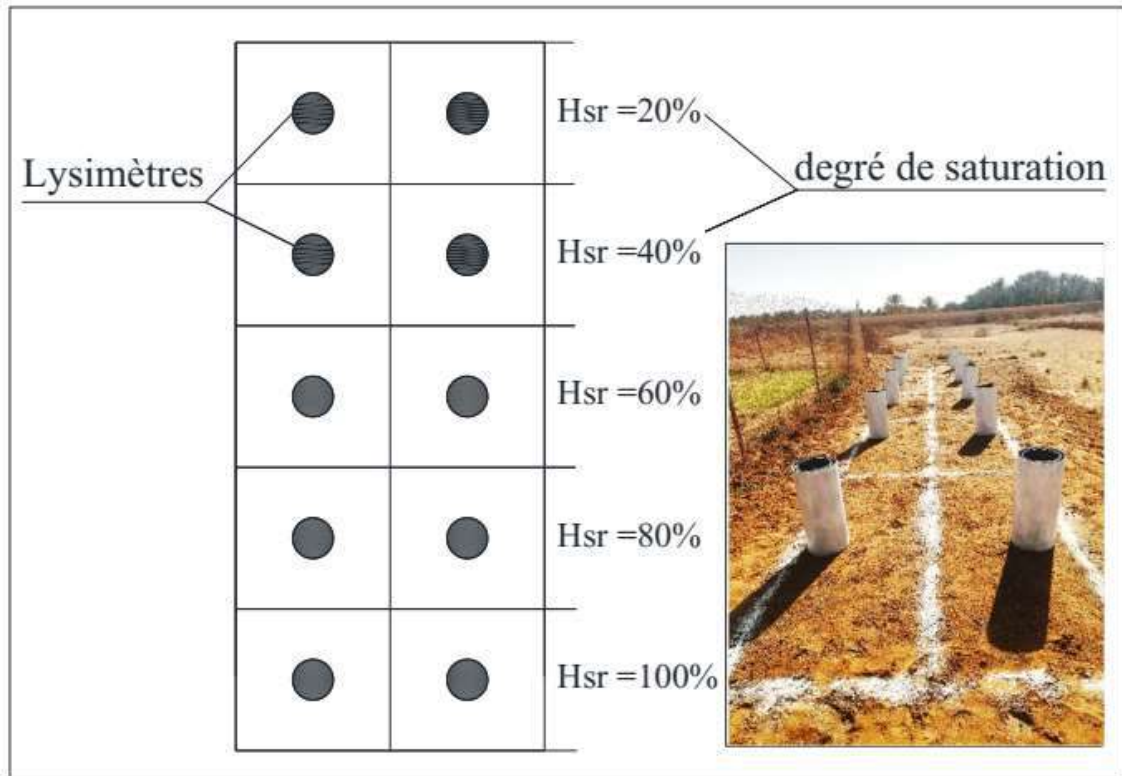


Figure 31. Schéma de champ expérimental.

III.3.2.4. Enregistrement des données lysimétriques et des paramètres météorologiques

Mesure des valeurs de L'évaporation du sol est effectuée tous les 2 jours par pesée au moyen d'une balance électronique (figure 23) qui est caractérisée par une sensibilité de ± 5 g équivalente à $\pm 0,11$ mm d'évaporation. La durée d'expérimentation s'étale du 01 d'avril 2021 au 31 mars 2022 de l'année précédente.

Les paramètres météorologiques sont relevés trois fois par jour.

La valeur de l'évaporation du sol est déterminée selon l'équation suivante :

$$E_s = 10 \frac{(M_i - M_f)}{S} - D + P \dots \dots \dots (12)$$

E_s : Évaporation du sol entre deux mesures du poids du bac (évaporateur) en mm.

M_i : poids initial (poids du monolithe mentionné dans la première lecture en gramme).

M_f : Poids final (poids du monolithe mentionné dans la deuxième lecture en gramme).

- S:** Surface d'évaporation Cm.
- P:** Pluie entrant dans le monolithe en mm.
- D:** Drainage du monolithe en mm.

III.3.2.5. Analyse statistique des résultats obtenus

L'analyse statistique joue un rôle fondamental dans l'interprétation des données expérimentales, permettant de transformer des observations brutes en informations exploitables. Dans le cadre de cette étude, l'objectif principal est de développer une modélisation statistique permettant d'estimer l'évaporation à partir des paramètres mesurés.

Cette modélisation sera validée à l'aide d'outils statistiques rigoureux, notamment en évaluant les erreurs et en analysant divers indicateurs tels que le coefficient de détermination, les tests de significativité, et les résidus. Une telle approche garantit la fiabilité du modèle proposé et permet d'évaluer sa capacité prédictive, tout en offrant une compréhension approfondie des relations entre les variables étudiées.

A - Statistique descriptive

Les statistiques descriptives permettent de résumer, d'organiser et de présenter les données de manière claire et compréhensible. Elles sont utilisées pour donner une vue d'ensemble des caractéristiques principales d'un ensemble de données, de comprendre leur distribution et d'identifier des tendances ou des anomalies avant de passer à des analyses plus complexes.

Mesures de Tendance Centrale

Les mesures de tendance centrale sont des outils statistiques qui permettent de résumer un ensemble de données en une seule valeur. Cette valeur représente un "centre" autour duquel les données ont tendance à se regrouper. En d'autres termes, elles donnent une idée de la valeur "typique" d'un ensemble de données (Piron et al., 1995; REBIAI, 2023).

Moyenne (μ) :

La moyenne est la somme de toutes les valeurs divisées par le nombre de valeurs.

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \dots \dots \dots (13)$$

\bar{x} : moyenne.

x_i : valeur de la i -ème observation.

n : nombre d'observations.

Médiane :

La médiane est la valeur centrale lorsque les données sont classées par ordre croissant.

1. Ordonner les données par ordre croissant.
2. Si n est impair, la médiane est la valeur au centre.
3. Si n est pair, la médiane est la moyenne des deux valeurs centrales.

Mode :

Le mode est la valeur la plus fréquente dans l'ensemble de données.

Les Mesures de Dispersion

Les mesures de dispersion indiquent la variabilité des données à quel point les données sont étalées ou dispersées.

Écart Type:

L'écart type mesure la dispersion des données autour de la moyenne.

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \dots \dots \dots (14)$$

σ : écart type.

\bar{x} : moyenne.

n : nombre d'observations.

Variance :

La variance est le carré de l'écart type.

$$\sigma^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \dots \dots \dots (15)$$

σ^2 : Variance.

B - Corrélation

L'analyse de corrélation est une méthode statistique utilisée pour évaluer la relation entre deux variables quantitatives. Elle permet de déterminer si les variations de l'une des variables sont associées aux variations de l'autre.

Le coefficient de corrélation de Pearson r

L'analyse de corrélation des variables est une méthode statistique utilisée pour évaluer la relation entre deux variables afin de déterminer si les variations sont associées à d'autres variables.

- Le coefficient de corrélation de Pearson r Il est compris entre -1 et 1.

La formule du coefficient de Pearson est la suivante.

$$r = \frac{\sum(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum(x_i - \bar{x})^2 \sum(y_i - \bar{y})^2}} \dots\dots\dots (16)$$

x_i et y_i : Les valeurs des deux variables pour l'observation ii .

\bar{x} et \bar{y} : Les moyennes des variables x et y .

$r > 0$: Corrélation positive (les variables évoluent dans le même sens).

$r < 0$: Corrélation négative (les variables évoluent en sens opposé).

$|r|$ proche de 1 : Corrélation forte.

$|r|$ proche de 0 : Corrélation faible ou nulle.

III.3.2.6. Modélisation statistique

La modélisation statistique constitue une étape cruciale pour comprendre les relations entre les différentes variables mesurées et prédire le comportement du système étudié. Dans cette section, nous proposons une démarche méthodique pour développer et valider un modèle statistique permettant d'estimer l'évaporation en fonction des paramètres liés au sol et aux conditions météorologiques.

A Régression Linéaire Simple :

La régression linéaire simple est une méthode statistique permettant de modéliser la relation entre une variable indépendante (X) et une variable dépendante (Y) en supposant une relation linéaire entre elles.

Le modèle de régression linéaire simple est donné par :

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X + \varepsilon \dots \dots \dots (16)$$

Y : Variable dépendante (variable à prédire).

X : Variable indépendante (variable explicative).

β_0 : Interception (valeur de Y lorsque X= 0).

β_1 : Pente de la droite (changement de Y pour une unité de variation de X).

ε : Erreur résiduelle (écart entre les valeurs observées et prédites).

Hypothèses de la régression linéaire simple

- Relation linéaire entre X et Y.
- Les résidus (ε) suivent une distribution normale.
- Homoscédasticité : La variance des résidus est constante.
- Indépendance des observations.

B Régression Linéaire Multiple

La régression linéaire multiple est une extension de la régression linéaire simple qui permet de modéliser une variable dépendante (Y) en fonction de plusieurs variables indépendantes (X_1, X_2, \dots, X_n). Elle est particulièrement utile pour des systèmes où plusieurs facteurs influencent simultanément la variable étudiée.

Le modèle de régression linéaire multiple est donné par :

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_n X_n + \varepsilon \dots \dots \dots (17)$$

Y : Variable dépendante (variable à prédire).

$X_1 \dots X_n$: Variables indépendantes (variables explicatives).

β_0 : Interception.

$\beta_1 \dots \beta_n$: Coefficients des variables indépendantes (impact de chaque variable sur X).

ε : Terme d'erreur résiduelle.

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (E_i^{mesurée} - E_{moyenne}^{mesurée})(E_i^{model} - E_{moyenne}^{model})}{\sum_{i=1}^n (E_i^{mesurée} - E_{moyenne}^{mesurée})^2 \sum_{i=1}^n (E_i^{model} - E_{moyenne}^{model})^2} \dots (19)$$

2. **L'erreur quadratique moyenne (RMSE) :** Le RMSE donne une indication de l'erreur globale du modèle, où une valeur plus faible indique une meilleure précision :

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (E_i^{mesurée} - E_i^{model})^2}{N}} \dots \dots \dots (20)$$

3. **L'erreur moyenne biaisée (MBE) :** Le MBE indique si le modèle a tendance à sous-estimer ou à surestimer l'issue. Un MBE nul signifie qu'il n'y a pas de biais, par exemple, si MBE = -0,5, cela signifie que le modèle sous-estime en moyenne l'issue de 0,5 unité :

$$MBE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (E_i^{mesurée} - E_i^{model}) \dots \dots \dots (21)$$

4. **L'indice Ash-Sutcliffe (NSE) :** évalue la précision et l'efficacité d'un modèle en comparant les écarts entre les valeurs calculées par le modèle et les valeurs mesurées, Un NSE proche de 1 indique une bonne adéquation entre les prédictions et les observations :

$$NSE = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (E_i^{mesurée} - E_i^{model})^2}{\sum_{i=1}^n (E_i^{mesurée} - E_{moyenne}^{mesurée})^2} \right] \dots \dots \dots (22)$$

5. **Le rapport de somme de rangs (RSR) :** Le rapport de somme de rangs compare les rangs des valeurs prédites et mesurées, un RSR proche de 0 indique une bonne adéquation entre les prédictions et les observations :

$$PSR = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (E_i^{mesurée} - E_i^{model})^2}{\sum_{i=1}^n (E_i^{mesurée} - E_{moyenne}^{mesurée})^2}} \dots \dots \dots (23)$$

III.4. Conclusion

Le travail expérimental de terrain nous a permis de collecter des données importantes et des mesures réelles des taux d'évaporation à l'aide des appareils de référence et des lysimètres. La méthode de travail montre la difficulté du travail sur le terrain, surtout pendant l'opération répétée de pesée des lysimètres lourds, en plus de la collecte des données météorologiques. Ces données sont considérées comme essentielles pour comprendre ce phénomène et nous allons nous appuyer sur elles pour modéliser l'évaporation de l'eau à partir du sol. Dans le prochain chapitre, nous allons traiter les résultats et faire une l'analyse statistique des résultats obtenus et travailler sur la création d'un modèle spécifique à la région pour une compréhension plus simple du phénomène.

CHAPITRE IV

Résultats Et Discussions

CHAPITRE IV: Résultats Et Discussions

IV.1. Introduction

L'objectif principal de cette étude est de développer un modèle permettant de simplifier l'estimation de l'évaporation des sols, particulièrement dans la région de TOYGGOURT où l'acquisition des données climatiques précises est souvent limitée. Ce chapitre présente et discute les résultats obtenus dans le cadre de cette démarche, en mettant en avant les différentes étapes de l'analyse et leurs contributions au développement du modèle.

Dans un premier temps, les caractéristiques techniques du sol ont été déterminées, notamment ses propriétés granulométriques et hydriques, telles que les humidités à la saturation, à la capacité au champ. Ces données fournissent une base essentielle pour comprendre les dynamiques d'évaporation dans le sol.

Ensuite, les mesures obtenues à partir des mini-lysimètres GGI-500, installés selon un gradient de degré de saturation (variable indépendante), sont analysées en détail. Ces résultats sont confrontés aux données météorologiques collectées sur le site expérimental, afin de mieux cerner l'influence des paramètres climatiques sur l'évaporation.

Une attention particulière est également accordée à l'analyse statistique des données, qui constitue une étape cruciale pour valider les observations et explorer les relations entre les variables étudiées. Cette analyse permet d'identifier les facteurs clés influençant l'évaporation et de préparer les bases pour la modélisation.

Enfin, ce chapitre propose une discussion approfondie sur les résultats obtenus et leur intégration dans un modèle statistique. L'objectif final est de développer un outil pratique et robuste, adapté aux conditions spécifiques de la zone d'étude, permettant une estimation fiable de l'évaporation des sols.

IV.2. Analyse des conditions météorologiques observées pendant la période expérimentale

IV.2.1. Température (sèche – humide)

En raison de l'importance majeure de la température et de son impact direct sur l'évaporation, le suivi des variations de température est considéré comme l'un des éléments climatiques essentiels dans cette étude. De plus, L'utilisation conjointe du thermomètre sec et humide permet également d'estimer l'humidité relative de l'air. Les résultats de mesure des températures sont présentés dans la (figure 32).

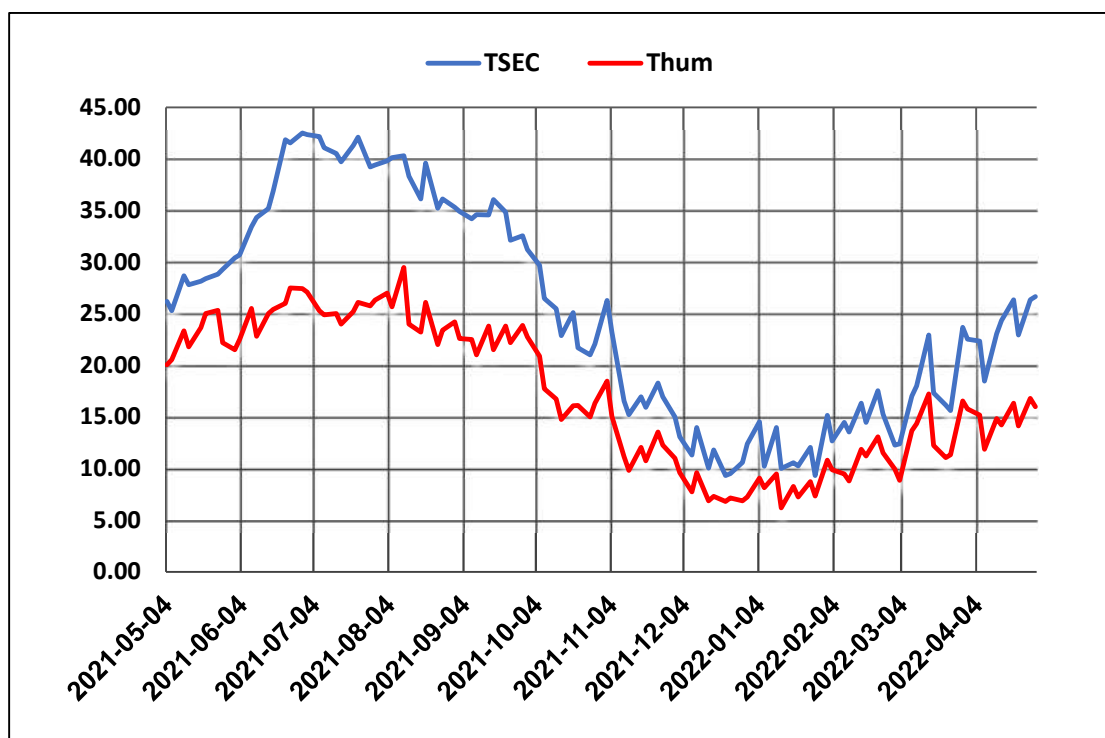


Figure 32. Variations saisonnières des températures mesurées à l'aide d'un thermomètre sec (Tsec) et d'un thermomètre humide (Thum)

La figure 30 illustre les variations saisonnières des températures mesurées en utilisant un thermomètre sec (Tsec) et un thermomètre humide (Thum) sur une période d'un an allant de mai 2021 à avril 2022. Au cours de l'été les températures et tris élevés avec Tsec atteignant 42,5°C tandis que Thum reste relativement bas ce qui indique une faible humidité relative favorisant une forte évaporation. En hiver, les températures chutent considérablement, allant de 5 à 10°C, et la différence entre la température de l'air sec et celle de l'humidité diminue, indiquant une humidité relative plus élevée. Les saisons intermédiaires telles que le printemps

et l'automne montrent une évolution graduelle des températures. L'écart observé entre les mesures des deux thermomètres met en lumière l'impact des l'humidité relative sur les processus d'évaporation : les périodes chaudes et sec favorisent une évaporation élevée, tandis que les périodes froides et humides la diminuent.

IV.2.2. Température (air – sol)

Le suivi simultané des variations de la température de l'air et de la température du sol permet d'analyser les interactions thermiques et leur influence sur les processus d'évaporation. L'évaluation de l'écart thermique entre ces deux milieux est essentielle pour quantifier l'intensité des flux évaporatoires. Les résultats obtenus sont synthétisés dans la (figure 33) .

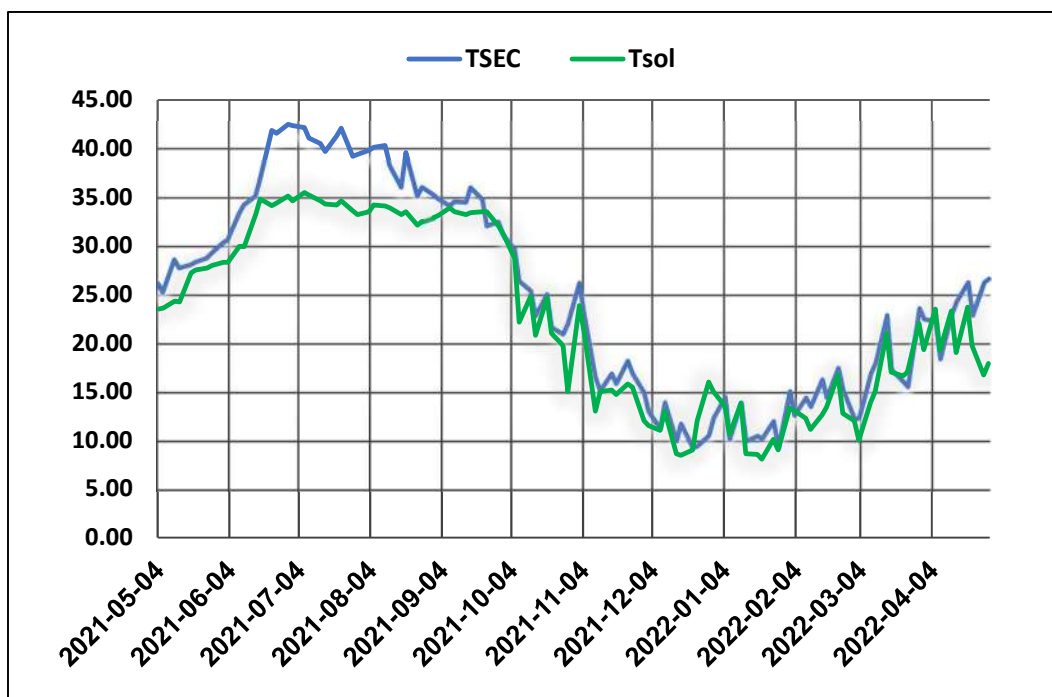


Figure 33 Variations saisonnières des températures mesurées à l'aide d'un thermomètre sec (Tsec) et la température (Tsol)

Le graphique de la (figure 31) montre les variations saisonnières de la température de l'air (TSEC) et de la température du sol (Tsol) sur une année en observe deux périodes critiques.

La période estivale

La température de l'air augmente jusqu'à environ 42°C, tandis que la température du sol atteint environ 35°C, l'écart entre la température de l'air et du sol est notable, avec une température de l'air plus élevée, l'augmentation de la température du sol est liée à l'absorption du rayonnement solaire (Han & Zhou, 2013), mais elle reste inférieure à celle de l'air en raison de l'effet de l'évaporation qui refroidit la surface du sol.

La période hivernale

Les températures baissent de manière significative, la température de l'air variant entre 5°C et 15°C, et celle du sol entre 5°C et 10°C, l'écart entre les deux périodes diminue et l'absorption du rayonnement solaire diminue, reflétant l'influence des conditions météorologiques sur le transfert de chaleur entre l'air et le sol.

IV.2.3. Vitesse de vent et l'humidité relative

Le suivi simultané de la vitesse du vent et de l'humidité relative de l'air permet d'analyser leur influence sur les processus d'évaporation. La vitesse du vent joue un rôle clé dans le renouvellement de la couche limite atmosphérique, favorisant le transport de la vapeur d'eau, tandis que l'humidité relative conditionne le gradient de pression de vapeur entre le sol et l'atmosphère. L'étude de ces paramètres est essentielle pour quantifier l'intensité des flux évaporatoires et améliorer la modélisation des transferts hydriques en milieu poreux. Les résultats de mesure obtenus sont synthétisés dans la (figure34)

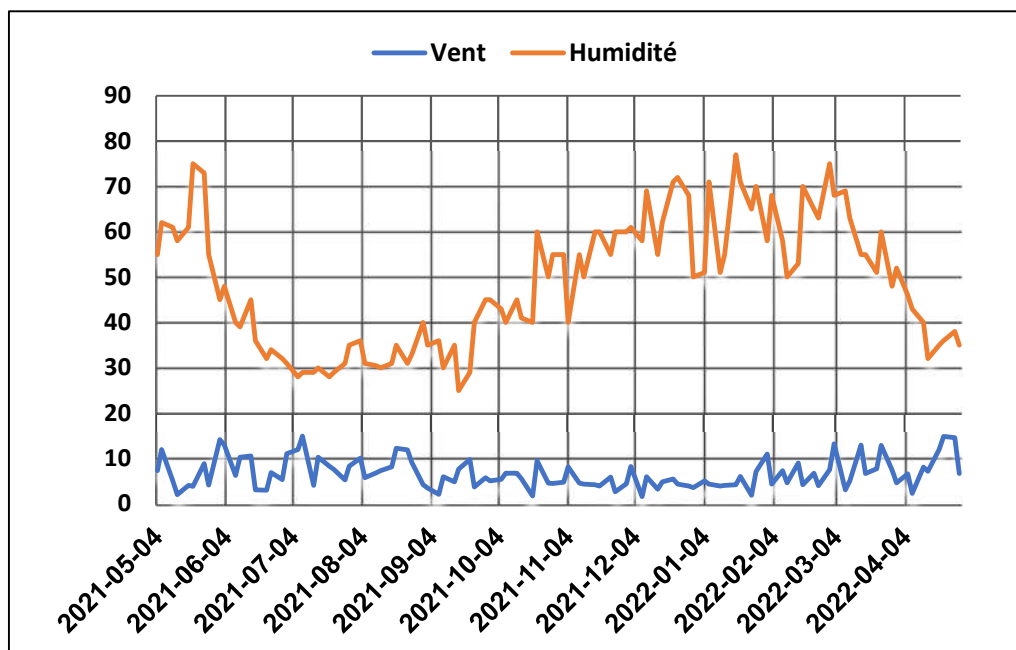


Figure 34 Variations saisonnières de l'humidité relative et la vitesse de vent

La (Figure 34) montre les variations de l'humidité relative et de la vitesse du vent sur toute une année.

A travers la courbe, on peut dire que L'humidité relative atteint ses niveaux les plus élevés en hiver en virant 70 %, et ses niveaux les plus bas en été 28 %, Et ce qui résulte des conditions humides en hiver et sèches en été.

Au contraire nous constatons que la vitesse du vent reste faible tout au long de l'année (2 à 8 m/s).

La baisse de l'humidité en été associée à des vents stables favorise l'évaporation, tandis que l'augmentation de l'humidité en hiver avec des vents stables, réduit les taux d'évaporation. Ces observations des paramètres météorologique constituent une base essentielle pour comprendre le mécanisme du phénomène et l'analyse des dynamiques d'évaporation et leur modélisation dans la région d'étude.

IV.2.4. Evaporation de Bac class A et piche

Le suivi de l'évaporation mesurée par le bac de classe A et l'évaporomètre de Piche permet d'évaluer les interactions entre les conditions atmosphériques et les processus d'évaporation. Ces deux instruments fournissent des mesures de l'évaporation potentielle, permettant d'estimer la capacité maximale de l'atmosphère à extraire l'eau des surfaces du sol. Le bac de classe A offre une estimation à grande échelle, intégrant les effets des échanges thermiques avec l'environnement. L'analyse comparative de ces deux méthodes est essentielle pour affiner la compréhension des mécanismes évaporatoires et améliorer la modélisation des transferts hydriques. . Les résultats de mesure obtenus sont présentés dans le diagramme de la figure 33..

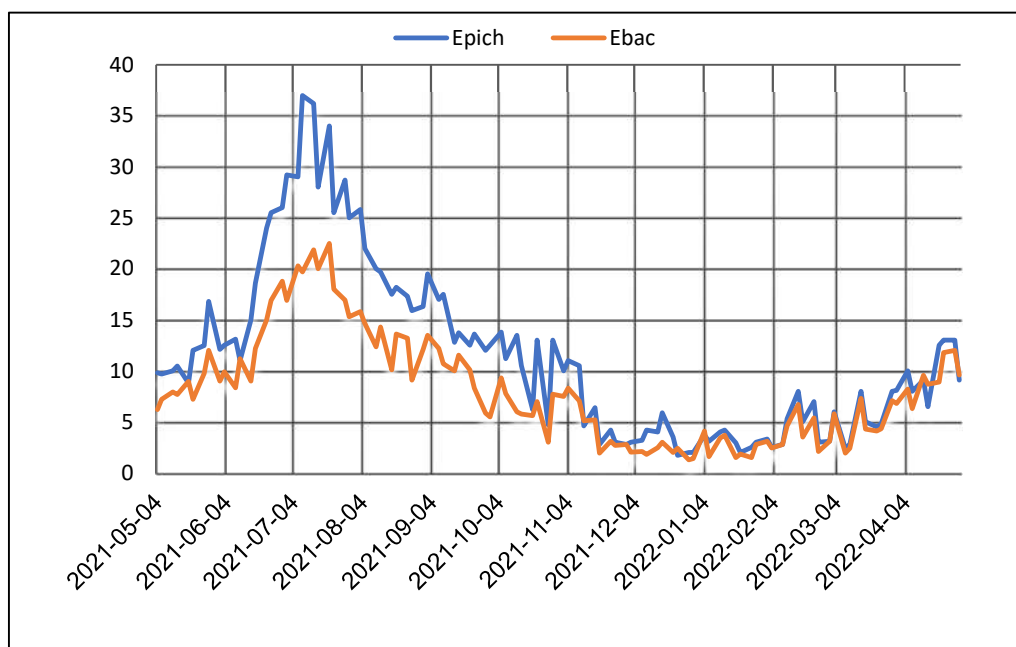


Figure 35. Variations saisonnières de l'évaporation enregistré (Bac class A , piche)

L'évaporation potentielle a été mesurée à l'aide de l'évaporomètre de Piche et du bac class A, avec des relevés des éléments climatiques comme référence pour l'estimation de l'évaporation du sol. À partir des (Figure 35) on peut remarquer que l'évaporation dans les deux appareils varie tout au long de l'année de manière similaire aux changements dans les éléments climatiques, ce qui montre une grande relation entre ces derniers et l'évaporation. On distingue deux phases principales, En été, on observe une forte augmentation des températures avec une grande diminution de l'humidité relative. Cela a conduit à une augmentation importante des taux d'évaporation, où les valeurs de l'évaporation mesurées par l'appareil de Piche sont plus élevées que celles du bac class A. Les valeurs de l'évaporation journalière atteignent 36 mm pour Piche contre 22 mm pour le bac A. En hiver, ces valeurs diminuent de manière significative, où les appareils Piche et le bac enregistrent des valeurs similaires atteignant 2 mm. En observant les courbes, on remarque également que les valeurs enregistrées divergent en été, où les valeurs de Piche sont plus élevées que celles du bac, tandis qu'en hiver, ces valeurs se rapprochent. Cela reflète la différence de sensibilité de chaque appareil aux éléments climatiques.

IV.3. Résultats de l'évaporation du sol mesurée

Dans le (Tableau3) nous présentons un exemple de calcul des valeurs de l'évaporation journalière moyenne des lysimètres (10 dix lysimètres) pour les différents états de saturation en eau entre le 03 et le 04 mai 2021.

Tableau 3. Valeurs des paramètres météorologiques du 03 au 04 mai 2022

Degrée de saturation de lysimètre (%)	Poids du lysimètre		Différence de poids (Mi-Mf)		Drainage du lysimètre D		Pluie reçue par le lysimètre p (mm)	Evaporation du lysimètre Es (mm)	Evaporation moyenne ES (mm)
	Poids initial Mi (kg)	Poids final Mf (kg)	(kg)	(mm)	(litre)	(mm)			
Lysimètre 1 100%	41,50	39,610	1,890	41,8	1,650	36,48	0	5,32	5,25
Lysimètre 2 100%	41,15	39,455	1,695	37,49	1,460	32,29	0	5,20	
Lysimètre 3 80%	40,50	39,440	1,060	23,44	0,810	17,91	0	5,53	5,19
Lysimètre 4 80%	39,70	39,480	0,220	4,87	0,000	0	0	4,87	

Lysimètre 5 60%	39,00	38,800	0,200	4,42	0,000	0	0	4,42	4,42
Lysimètre 6 60%	38,50	38,300	0,200	4,42	0,000	0	0	4,42	
Lysimètre 7 40%	37,50	37,330	0,170	3,76	0,000	0	0	3,76	3,65
Lysimètre 8 40%	36,50	36,340	0,160	3,54	0,000	0	0	3,54	
Lysimètre 9 20%	35,50	35,425	0,075	1,66	0,000	0	0	1,66	1,49
Lysimètre 10 20%	34,50	34,440	0,060	1,33	0,000	0	0	1,33	

Les résultats de mesure de l'évaporation pour les différents degrés de saturation du sol ainsi que les résultats de mesure des paramètres météorologiques obtenus durant toute la campagne d'observation sont collectés et rassemblés suivant la date de commencement de la mesure, Tous les résultats sont joints en annexe, tandis que le (tableau4) présente quelques valeurs de ces résultats.

Tableau 4. Valeurs des paramètres météorologique et de l'évaporation pour différents taux d'humidité du sol

Date	Paramètres météorologiques				Température du sol t_s , C°	Evaporation E.mm		Evaporation du sol, Es, mm (taux d'humidité du sol H%)				
	Température de l'air sec et humide		Humidité de l'air H%	Vitesse du vent V, m/s		Piche	Bac « A »	100%	80%	60%	40%	20%
	Tsec C°	Thum C°										
04-05-2021	26,20	20,06	55	7,3	23,5	6,2	9,8	5,25	5,20	4,42	3,65	1,49
08-06-2021	33,4	25,5	40	6,3	29,9	13,1	8,3	10,51	9,45	5,53	6,69	3,48
15-07-2021	39,7	24,0	30	10,3	34,3	28	20,0	16,09	17,20	14,98	14,43	9,51

10-08-2021	40,3	29,5	31	6,8	34,1	20	12,4	14,15	12,72	12,22	12,22	11,00
28-09-2021	32,6	23,9	45	5,8	32,1	12	5,9	6,75	5,58	6,75	5,53	4,59
19-10-2021	25,1	16,1	40	1,7	24,7	6,2	5,6	5,58	4,48	3,37	3,37	2,27
30-11-2021	15,0	11,0	60	4,4	12	2,8	2,8	2,27	2,05	1,11	1,11	1,11
23-12-2021	9,5	7,1	72	4,4	12	1,75	2,4	2,32	1,71	1,71	0,61	0,55
18-01-2022	10,6	8,3	77	4,2	8,6	1,5	3,0	3,0	2,3	1,8	1,7	0,00
17-02-2022	14,47	11,20	70	4,2	13,4	3,5	5	2,21	2,21	1,27	1,22	1,22
08-03-2022	17,00	13,67	69	3,1	13,9	2	2,4	2,32	2,05	1,44	0,61	0,00
05-04-2022	22,33	15,17	46	6,6	23,5	8,2	10	7,13	5,20	4,48	3,48	2,61

IV.4. Analyse statistique des résultats obtenus

IV.4.1. Statistiques descriptives

Pour étudier les valeurs obtenues du point de vue statistique, en termes de rapprochement et d'éloignement, et pour comprendre les relations entre elles, nous procédons à une analyse statistique descriptive. (Tableau 5)

Tableau 5. Les résultats de mesure et leur statistique.

Type	Tendance				Dispersion	
	Plage	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart type	Variance
Température sèche	33.17	9.33	42.5	25.0215	10.48133	109.858
Température humide	23.3	6.2	29.5	17.1382	6.78719	46.066
Humidité	52	25	77	48.7548	14.24304	202.864
Vitesse de vent	13.34	1.66	15	6.7068	3.27723	10.74
Température du sol	27.42	8.08	35.5	22.5287	9.13423	83.434

Evaporation BAC class A	21.2	1.3	22.5	8.071	5.26989	27.772
Evaporation PICH	35.25	1.75	37	11.4552	8.40813	70.697
Evaporation Hsr 100%	21.23	1.16	22.39	7.704	5.1189	26.203
Evaporation Hsr 80%	19.3	1.16	20.46	6.4099	4.62594	21.399
Evaporation Hsr 60%	17.25	0.55	17.8	5.4901	4.08158	16.659
Evaporation Hsr 40%	15.37	0	15.37	4.6224	3.86373	14.928
Evaporation Hsr 20%	11.39	0	11.39	3.352	3.12968	9.795

En analysant les résultats obtenus à partir de l'analyse statistique, nous pouvons conclure ce qui suit.

La température sèche varie entre 9.33°C et 42.5°C, avec une moyenne de 25.02°C et un écart-type élevé de 10.48 indique une dispersion importante des valeurs.

La température humide varie entre 6.2°C et 29.5°C, avec une moyenne de 17.14°C, L'écart-type est de 6.79, montrant une dispersion modérée. L'humidité varie entre 25% et 77%, avec une moyenne de 48.75%. L'écart-type de 14.24 indique une variabilité significative.

La vitesse du vent varie entre 1.66 m/s et 15 m/s, avec une moyenne de 6.71 m/s. L'écart-type de 3.28 montre une dispersion modérée.

La température du sol varie entre 8.08°C et 35.5°C, avec une moyenne de 22.53°C. L'écart-type de 9.13 indique une dispersion importante.

L'évaporation de BAC Class A varié entre 1.3 mm et 22.5 mm, avec une moyenne de 8.07 mm. L'écart-type de 5.27 montre une dispersion modérée.

L'évaporation Piche varie entre 1.75 mm et 37 mm, avec une moyenne de 11.46 mm. L'écart-type élevé (8.41) indique une grande variabilité.

Évaporation du sol diminue progressivement avec la réduction de l'humidité du sol. Les moyennes passent de 7,70 mm pour un Hsr de 100 % à 3,35 mm pour un Hsr de 20 %, avec des

écarts-types qui décroissent également (de 5,11 à 3,12). Cela met en évidence l'influence directe de l'humidité du sol sur les taux d'évaporation.

Ces statistiques montrent une variabilité significative dans les mesures de la température, de l'humidité, de la vitesse du vent et de l'évaporation. Les écarts-types élevés pour certaines variables, comme la température sec et l'évaporation de Piche, indiquent une grande dispersion des données, ce qui peut être dû aux variations saisonnières (été chaud et sec vs hiver froid et humide). Ces informations sont essentielles pour comprendre le phénomène de l'évaporation du sol.

Le calcul de la corrélation entre l'évaporation du sol, de l'humidité du sol et des paramètres climatiques est présenté dans le tableau 6.

Tableau 6. Les résultats de Coefficient de Corrélation de Pearson (r)

	Es Hsr 100%	Es Hsr 80%	Es Hsr 60%	Es Hsr 40%	Es Hsr 20%	Evaporation de PICH	Evaporation BAC class a
Evaporation de PICH	0.946	0.943	0.935	0.913	0.91	1	0.964
Evaporation BAC class a	0.956	0.942	0.928	0.909	0.89	0.964	1
Température sèche	0.903	0.901	0.896	0.91	0.89	0.901	0.906
Température humide	0.821	0.829	0.82	0.846	0.835	0.833	0.832
Température du sol	0.847	0.86	0.861	0.876	0.853	0.847	0.843
Humidité	-0.816	-0.789	-0.79	-0.785	-0.774	-0.757	-0.794
Vitesse de vent	0.35	0.293	0.258	0.262	0.287	0.303	0.36

D'après le (tableau6) qui présente les valeurs du coefficient de corrélation de Pearson, nous constatons que tous les facteurs climatiques ont une forte corrélation et un impact significatif sur l'évaporation qu'elle soit mesurée par les appareils de référence tels que le Piche et le bac classe A ou par les appareils lysimétriques. Certaines observations clés permettent de mieux comprendre le phénomène.

Une Corrélation forte entre les appareils de mesure de référence Piche et le bac classe A, avec un coefficient de Pearson atteignant 0,96.

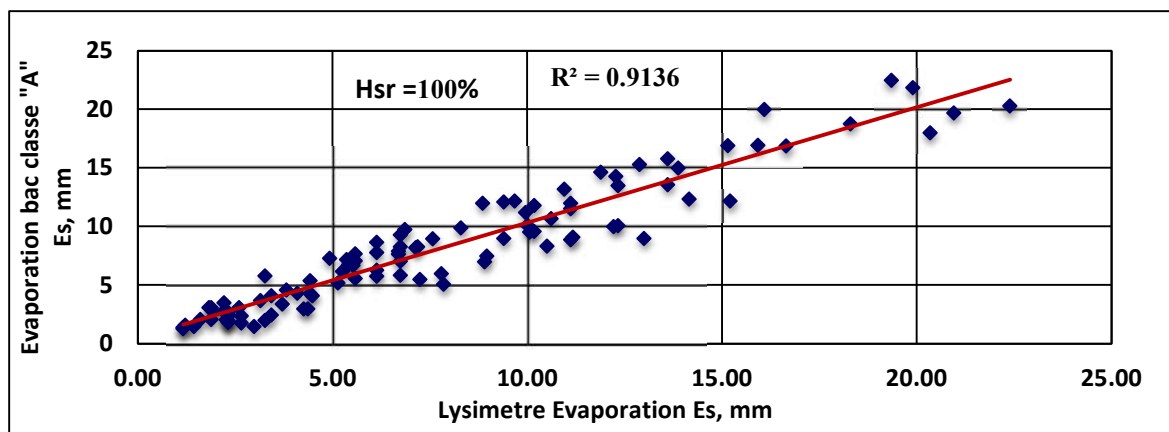
Corrélation plus forte avec la température sèche, où le coefficient de Pearson varie entre 0,91 et 0,89.

Corrélation significative avec la température humide et la température du sol, mais légèrement inférieure à celle de la température sèche.

Corrélation forte et inverse avec l'humidité relative, ce qui met en évidence l'effet négatif de l'humidité sur l'évaporation.

IV.5. Modélisation statistique

Le suivi de l'évaporation à l'aide des lysimètres et des appareils de référence (Piche et bac Classe A) permet d'analyser la relation entre l'évaporation réelle du sol et l'évaporation potentielle estimée par des méthodes standards. Les lysimètres fournissent une mesure directe de l'évaporation en tenant compte des interactions complexes entre l'eau du sol, la végétation et les conditions atmosphériques. En parallèle, les appareils de référence, tels que le bac de classe A et l'évaporomètre de Piche, offrent une estimation de l'évaporation potentielle basée sur des paramètres climatiques. L'analyse comparative de ces données permet de calibrer les modèles d'évaporation et d'améliorer l'estimation des flux hydriques en milieu poreux. Les résultats de comparaison de l'évaporation du sol en fonction du taux d'humidité avec l'évaporation potentielle mesurée par Piche et bac Classe A sont illustrés dans la (figure 36 et 37)



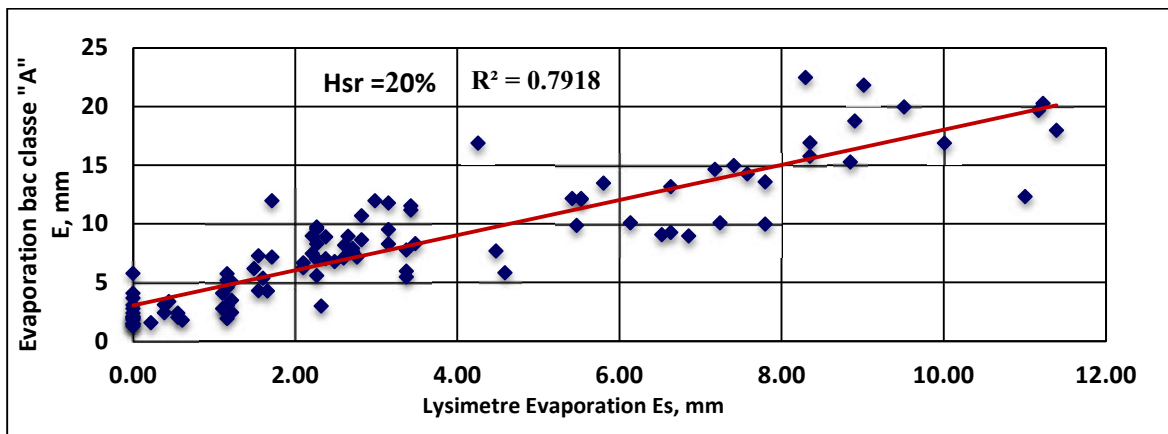
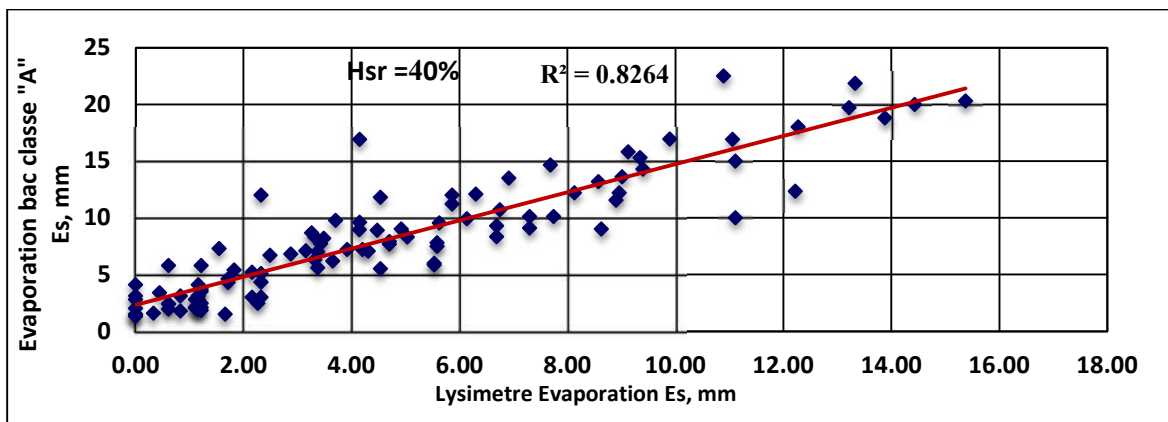
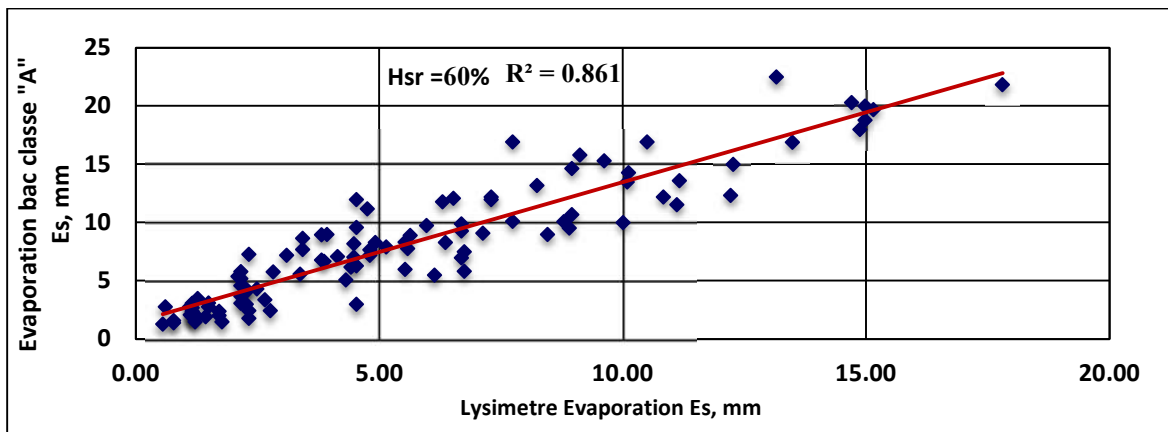
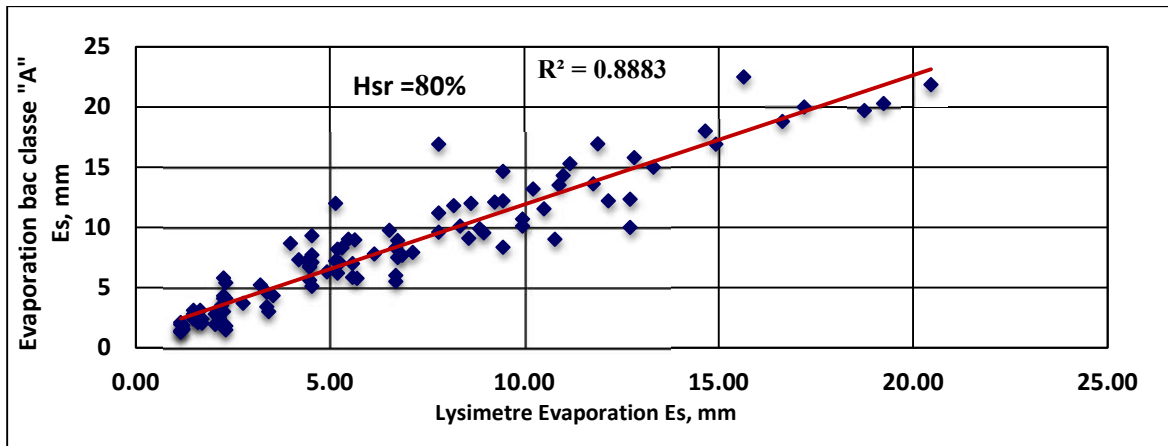
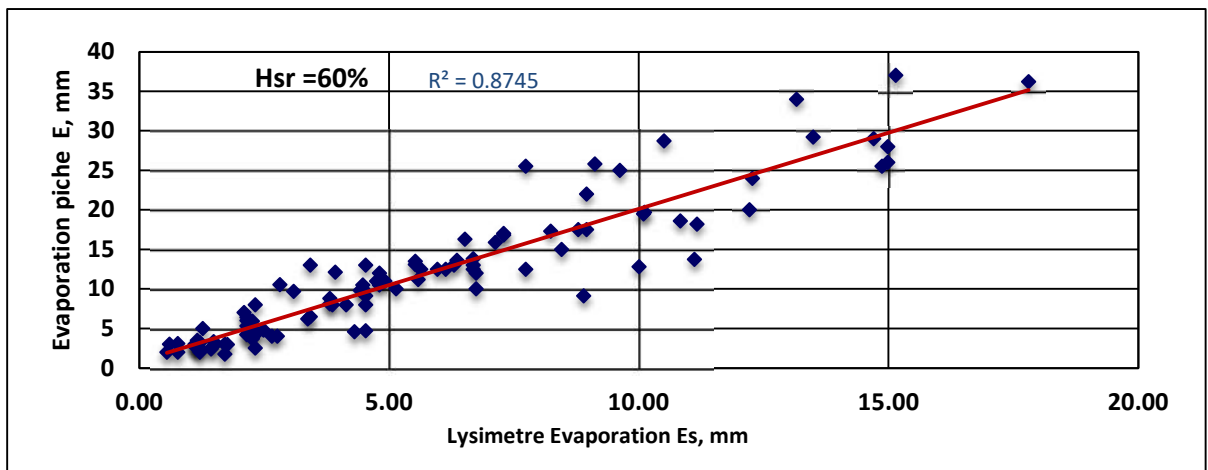
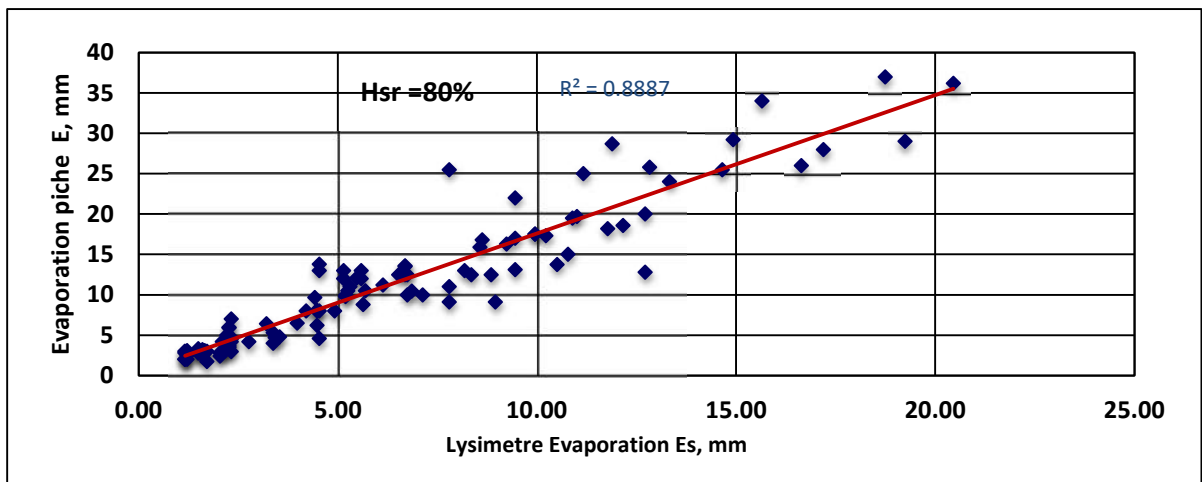
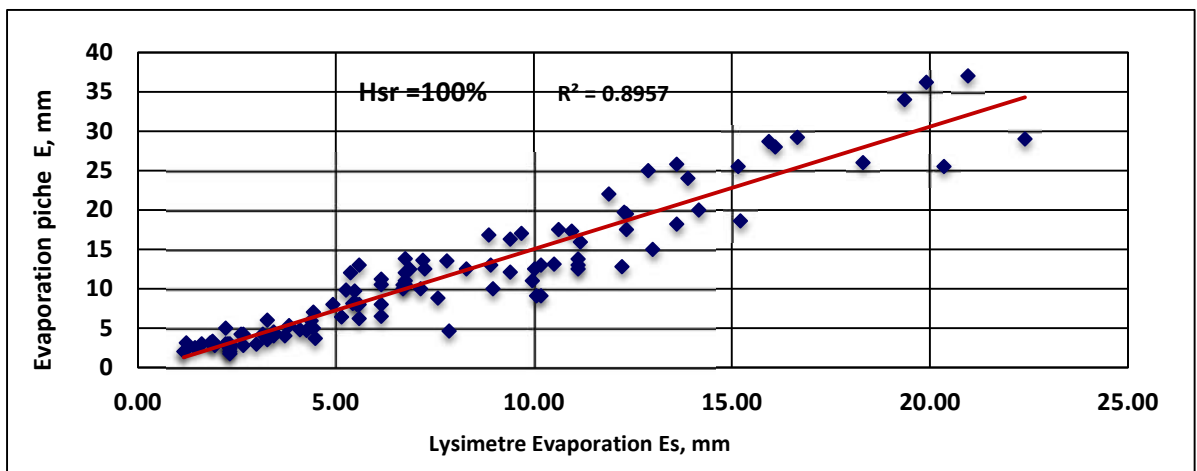


Figure 36. Relation entre l'évaporation des lysimètres et le bac classe A



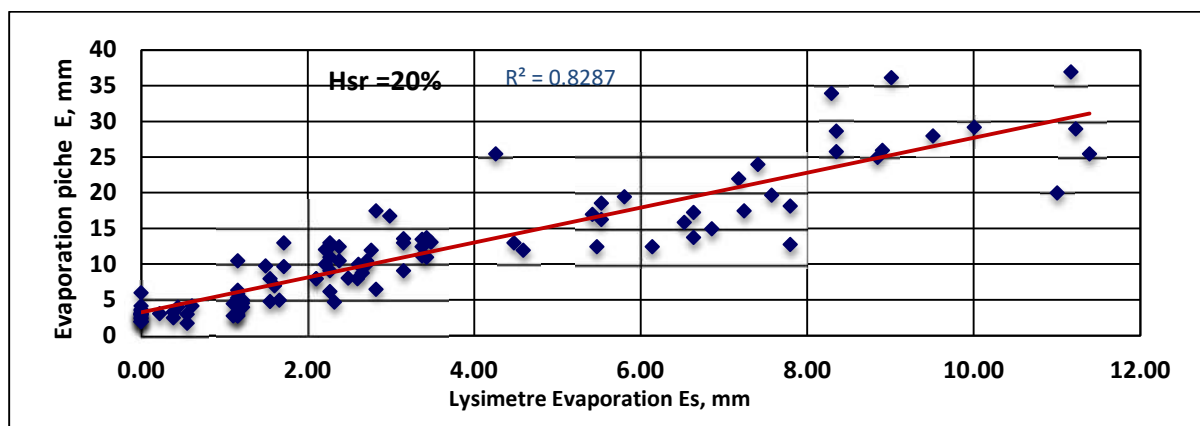
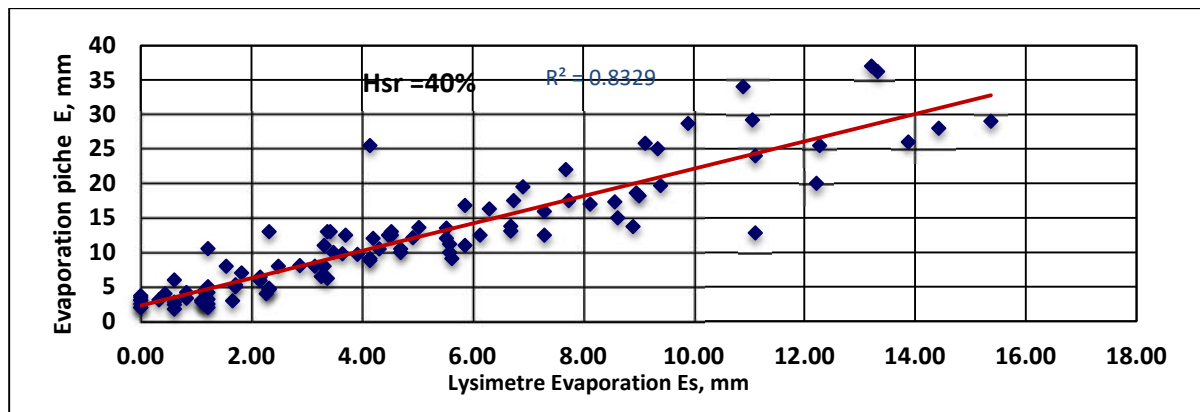


Figure 37. Relation entre l'évaporation des lysimètres et le piche

D'après les courbes illustrées dans les (figures 36 et 37), et à différents niveaux de saturation du sol, la forte de corrélation entre les résultats enregistrés par les lysimètres et ceux des appareils de mesure de référence est mise en évidence. L'évaporation du sol est fortement liée à l'humidité du sol et les conditions météorologiques. Pour un degré de saturation du sol ($H_s=100\%$), l'évaporation est maximale et est presque égale à l'évaporation du plan d'eau mesurée par le bac classe « A » (figure 36). Si on retient l'évaporation du bac comme référence, c'est-à-dire la considérer comme une évapotranspiration potentielle, on peut considérer que l'évaporation mesurée par le lysimètre pour un degré de saturation maximal du sol, comme une évapotranspiration potentielle, le rapport des évaporations du sol nu totalement saturé et d'une surface d'eau libre pour les sables fins obtenu dans notre étude est proche de 100% (figure 37). Ce rapport est confirmé par les rapports des taux d'évaporation des sols nus saturés à ceux d'une surface d'eau libre donnés pour différents types de sol (**Réméniéras, 1980; Schoeller, 1962**), ils sont les suivants :

- Sables fins : 100% ;
- Marnes : 90% ;
- Argile : 75 à 85%.

Il est à souligné que l'évaporation du sol diminue au fur et à mesure de l'assèchement du sol. Elle est minimale si le degré de saturation est faible et logiquement tend vers zéro pour une humidité de flétrissement. La (figure 36) illustre la relation entre l'évaporation du bac classe « A » et l'évaporation du lysimètre avec un faible degré de saturation du sol ($H_s = 20\%$). Dans ce cas l'évaporation du plan d'eau est nettement supérieure à l'évaporation du sol lorsque ce dernier est amoindri de son humidité.

IV.5.1. Relation entre l'évaporation du sol et les paramètres météorologiques

À travers l'analyse statistique et l'étude de la corrélation entre les appareils de mesure de référence et les mesures d'évaporation du sol enregistrées par les lysimètres, il a été constaté que l'effet direct des facteurs climatiques sur l'évaporation du sol, en observant les valeurs enregistrées de l'évaporation du sol tout au long de l'année, il a été remarqué que, l'évaporation du sol durant toute l'année n'est pas la même, elle évolue selon l'évolution des paramètres météorologiques et de l'humidité du sol.

Pour un même degré de saturation du sol, l'évaporation est très faible (Tableau 7) pendant la période hivernale, elle diminue jusqu'à zéro pour les faibles températures et les fortes humidités de l'air

Tableau 7. Exemple de Valeurs de l'évaporation des lysimètres pour différents degrés de saturation en période hivernale

Date	Température de l'air, t, °C	Humidité de l'air H, %	Vitesse du vent V, m/s	Evaporation Es, mm				
				Lys.1 (100%)	Lys.2 (80%)	Lys.3 (60%)	Lys.4 (40%)	Lys.5 (20%)
23/12/2021	9,5	72	4,38	2,32	1,71	1,71	0,61	0,00
18/01/2022	10,6	77	4,21	2,99	2,32	1,77	1,66	1,00
27/01/2022	9,0	70	7,12	2,21	2,10	0,61	0,00	0,00

L'augmentation de la température de l'air et la diminution de l'humidité de l'air en période estivale, provoque l'augmentation du déficit de saturation de l'air et par conséquent, l'augmentation de l'évaporation du sol. Le tableau 8. Illustre quelques valeurs de l'évaporation du sol mesurées dans les différents lysimètres en période estivale.

Tableau 8. Exemple de Valeurs de l'évaporation des lysimètres pour différents degrés de saturation en période estivale

Date	Température de l'air, t, °C	Humidité de l'air H, %	Vitesse du vent V, m/s	Evaporation Es, mm				
				Lys.1 (100%)	Lys.2 (80%)	Lys.3 (60%)	Lys.4 (40%)	Lys.5 (20%)
08/07/2021	41,06	29	15,0	20,95	18,74	15,15	13,21	11,17
01/07/2021	42,35	31	11,0	16,64	14,93	13,49	11,06	10,01
05/08/2021	40,10	31	5,8	11,89	9,45	8,96	7,69	7,18

On peut conclure que l'évaporation des sols nus pendant la période hivernale peut chuter jusqu'à presque nulle (0 – 1mm/jours) à partir d'un degré de saturation des sols avoisinant 40% (tableau 6). Par contre, durant la période estivale, pour ce même degré de saturation du sol l'évaporation est importante, elle constitue 8 – 13 mm/jours (Tableau 8). Cela signifie que même pour des taux de saturation inférieurs à 20% l'évaporation est toujours active en présence de l'humidité dans le sol et tend vers zéro lorsque ce dernier est à sec.

Le facteur limitant de l'évaporation en période hivernale est donc le pouvoir évaporant de l'atmosphère (l'évapotranspiration potentielle), pour le cas de la période estivale, le facteur limitant de l'évaporation est la disponibilité de l'eau dans le sol.

IV.5.2. Analyse de Régression Statistique

Dans l'objectif de diminuer le nombre de paramètres influençant sur l'évaporation du sol et pour construire un modèle d'estimation de l'évaporation du sol à partir des variables météorologiques disponibles, et afin que le modèle soit robuste dans ses prévisions simple et facile à utiliser sans nécessiter un grand nombre de variables, nous devons suivre les étapes suivantes :

- Vérifier l'indépendance des variables.
- Identifier les variables qui seront utilisées pour construire le modèle.
- Effectuer une analyse de régression pour élaborer le modèle.

IV.5.2.1. Vérification de l'indépendance des variables

La dépendance entre les variables peut fausser les résultats du modèle en rendant les estimations des coefficients instables et peu fiables. De plus, il devient difficile d'interpréter

l'effet des ces variables, Étudier l'indépendance des variables est crucial pour construire un modèle statistique robuste, interprétable et efficace. Cela permet de : Réduire la complexité et Améliorer la précision des prédictions. Mettre en évidence les relations les plus significatives entre les variables et le phénomène étudié(Daoud, 2017; Shrestha, 2020).

Pour détecter la relation entre les variables météorologiques nous avons procéder à déterminer le coefficient de corrélation entre ces paramètres. Le résultat de calcul de ce coefficient est présenté dans le (Tableau 9).

Tableau 9. Matrice de corrélation des paramètres météorologiques.

	Température sèche	Température humide	Humidité	Vitesse de vent	Température du sol
Température sèche	1	0.971	-0.816	0.285	0.973
Température humide	0.971	1	-0.684	0.254	0.957
Humidité	-0.816	-0.684	1	-0.276	-0.783
Vitesse de vent	0.285	0.254	-0.276	1	0.239
Température du sol	0.973	0.957	-0.783	0.239	1

En analysant le (Tableau 9), nous constatons que les trois variables (température sèche, température humide et température du sol) sont très corrélées entre elles avec un coefficient de corrélation R supérieur à 0.95. L'humidité a une corrélation forte avec les températures (R = 0.68 - 0.95), La Vitesse du vent est faiblement corrélée avec toutes les autres variables

En résumé, cette matrice de corrélation met en évidence des relations fortes entre certaines variables, ce qui nécessite l'utilisation des tests de multi colinéarité entre ces variables (Tableau 10).

Tableau 10. multi colinéarité des paramètres météorologiques Variable dépendante : Evaporation BAC class A

Coefficients			
Modèle		Statistiques de colinéarité	
		Tolérance	VIF
1	Température sèche	1	1
2	Température sèche	0.058	17.289
	Température humide	0.058	17.289
3	Température sèche	0.034	29.027
	Température humide	0.055	18.217
	Température du sol	0.05	20.071
4	Température sèche	0.013	76.456
	Température humide	0.021	47.068
	Température du sol	0.049	20.462
	Humidité	0.128	7.815
5	Température sèche	0.013	77.628
	Température humide	0.021	47.082
	Température du sol	0.048	21.015
	Humidité	0.128	7.821
	Vitesse de vent	0.886	1.129

a. Variable dépendante : Evaporation BAC class A

Pour vérifier l'absence de multi colinéarité, nous utilisons les résultats des **Variance Inflation Factor (VIF)**

- Si (**VIF > 10**) il existé un forte multi colinéarité entre les variables,
- La **Tolérance > 0.1**

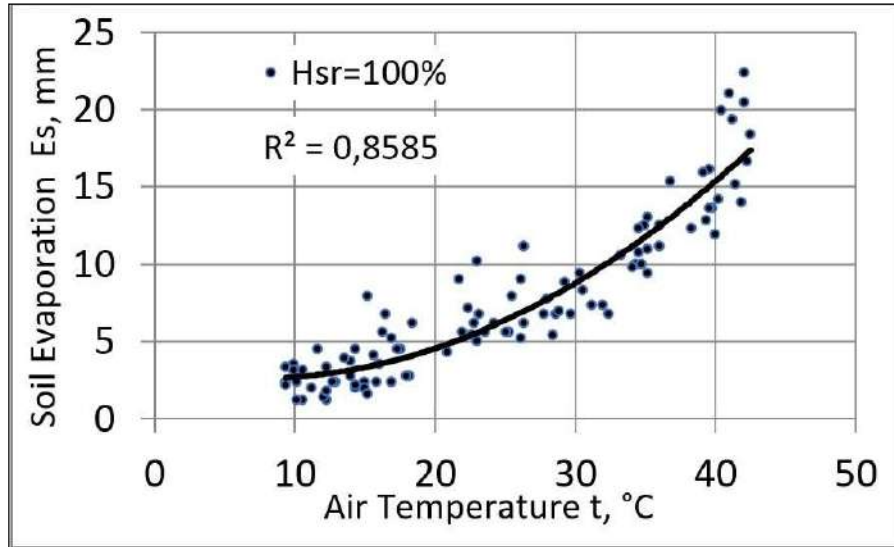
Une tolérance faible (proche de 0) indique une forte multi colinéarité.

Une tolérance élevée (proche de 1) indique une faible multi colinéarité.

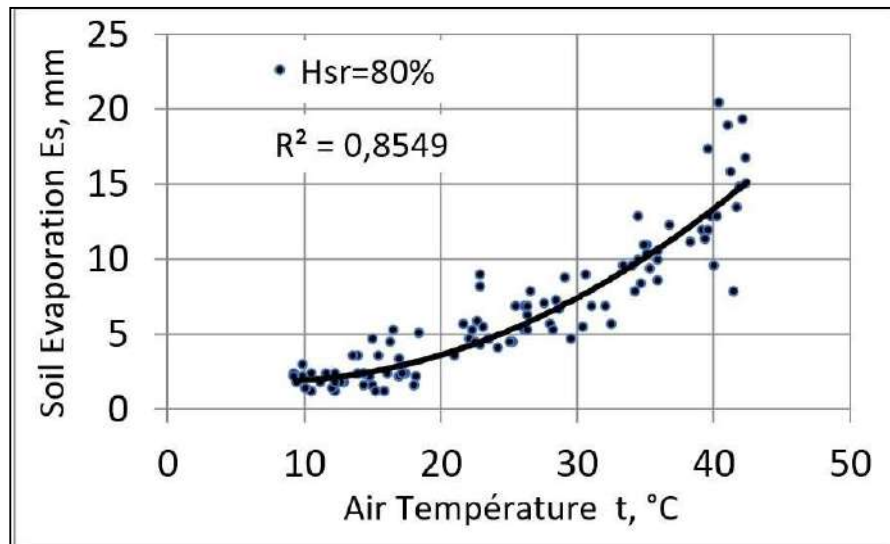
À partir du (Tableau 9), nous constatons que, du modèle 2 au modèle 5, existe une multi colinéarité entre les variables. Cela résulte, comme indiqué dans le (Tableau 8), de la corrélation entre les variables.

Dans l'objectif de diminuer le nombre de paramètres influençant sur l'évaporation du sol pour établir le modèle de calcul de l'évaporation en se basant uniquement sur deux importants paramètres standards qui sont toujours disponible et facilement accessibles à savoir, la température de l'air et le degré de saturation du sol qui se corrént fortement avec l'évaporation du sol (Tableau 6). La relation entre l'évaporation, la température de l'air et le degré d'humidité du sol est illustrée dans les (figures 38).

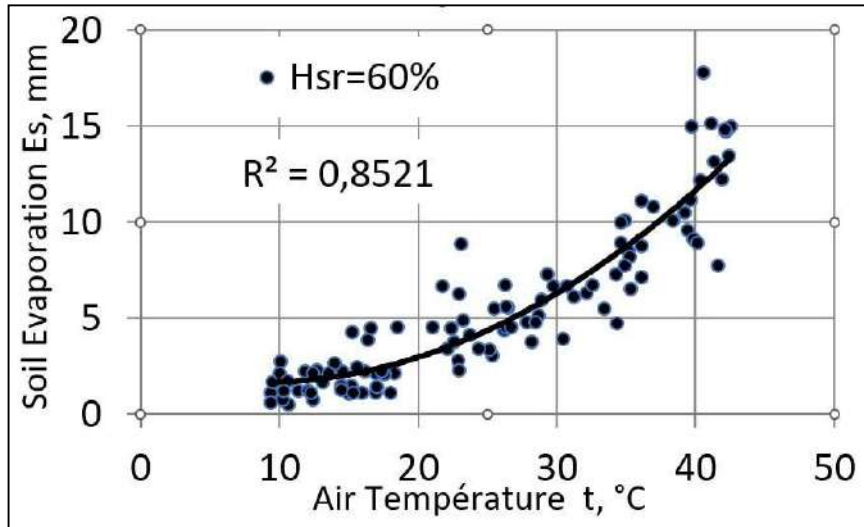
a)



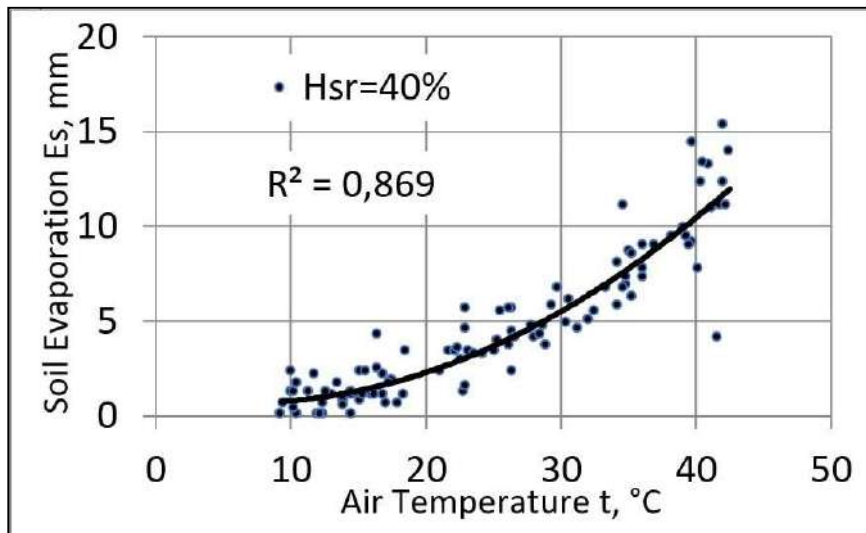
a)



b)



c)



d)

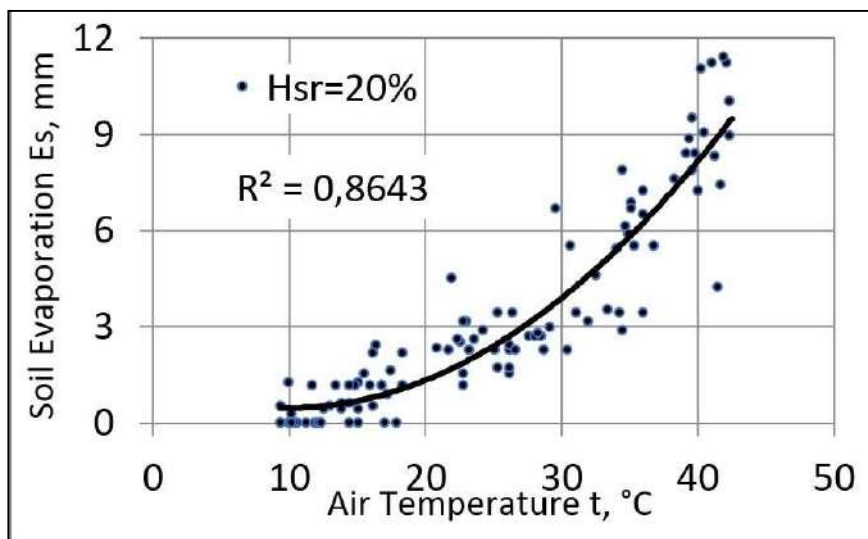


Figure 38. Relation entre l'évaporation du sol (E_s , mm), la température de l'air (t , °C), degré de saturation a) $H_s = 100\%$, b) $H_s = 80\%$, c) $H_s = 60\%$, d) $H_s = 40\%$, e) $H_s = 20\%$

Les courbes illustrées dans Figure 38 montrent une forte de corrélation entre la température de l'air et l'évaporation du sol ($R^2 > 0.85$) à différents niveaux de saturation du sol. La relation observée est croissante et suit une fonction exponentielle, ce qui met en évidence la sensibilité élevée de l'évaporation à la température de l'air. De plus, on remarque que la toux d'évaporation augmente avec l'élévation du degré de saturation.

L'analyse de la corrélation entre l'évaporation, la température de l'air et le degré de saturation du sol a permis de définir trois lois générales de l'évaporation du sol nu qui peuvent s'exprimer de la manière suivante :

- Pour un même taux d'humidité du sol, l'évaporation est d'autant plus faible que la température de l'air est faible ;
- A température de l'air égale, l'évaporation sera d'autant plus intense que le taux d'humidité du sol sera élevé ;
- Pour une saturation totale ($H_s = 100, \%$), l'évaporation du sol tends vers une limite correspondant à l'évaporation potentielle.

Les trois lois définies permettent de proposer un abaque de calcul de l'évaporation du sol nu (sable) au moyen de la température de l'air ($t, ^\circ\text{C}$) et du degré de saturation du sol ($H_{sr}, \%$). (Figure 39).

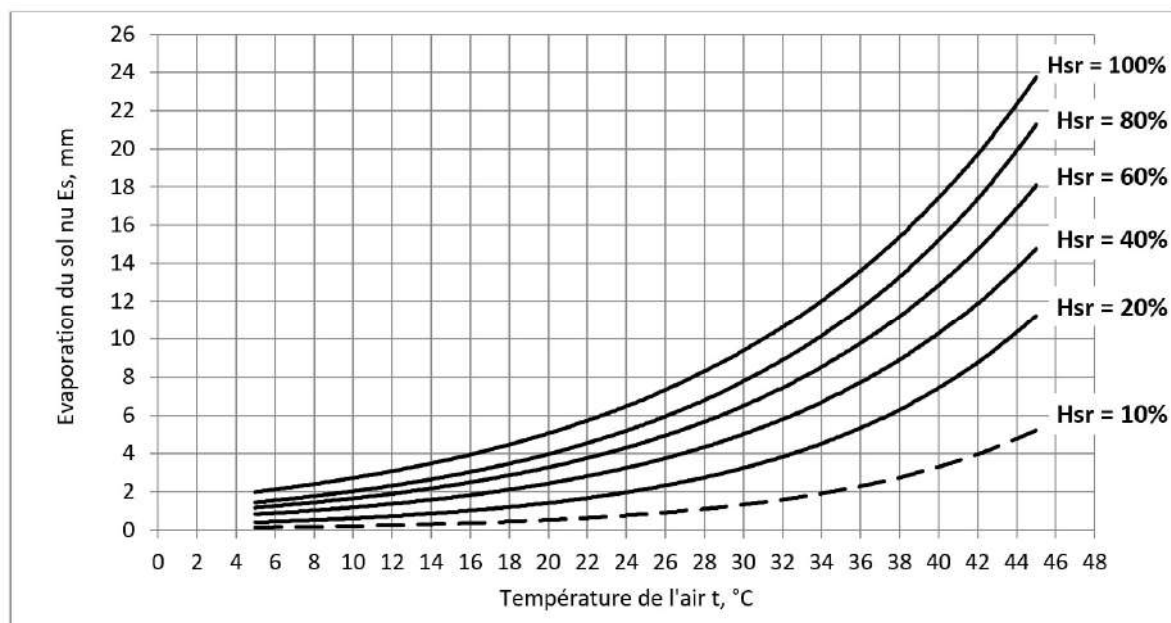
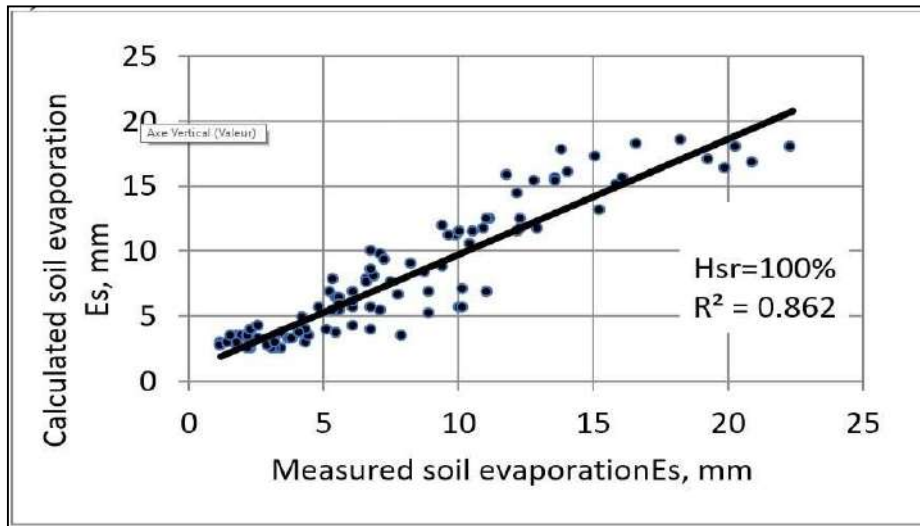


Figure 39. Abaque pour la détermination de l'évaporation journalière du sol en fonction de la température de l'air ($t, ^\circ\text{C}$) et du degré de saturation en eau du sol ($H_{sr}, \%$)

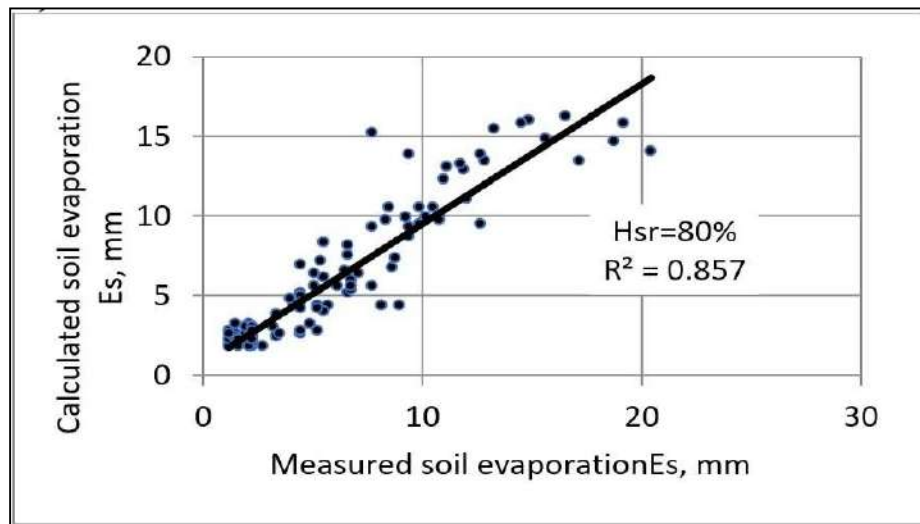
IV.5.3. Validation du Modèle

Afin de valider la méthode de calcul de l'évaporation du sol par l'abaque, les valeurs déterminées par ce dernier ont été comparées aux valeurs de l'évaporation du sol mesurées (figure40).

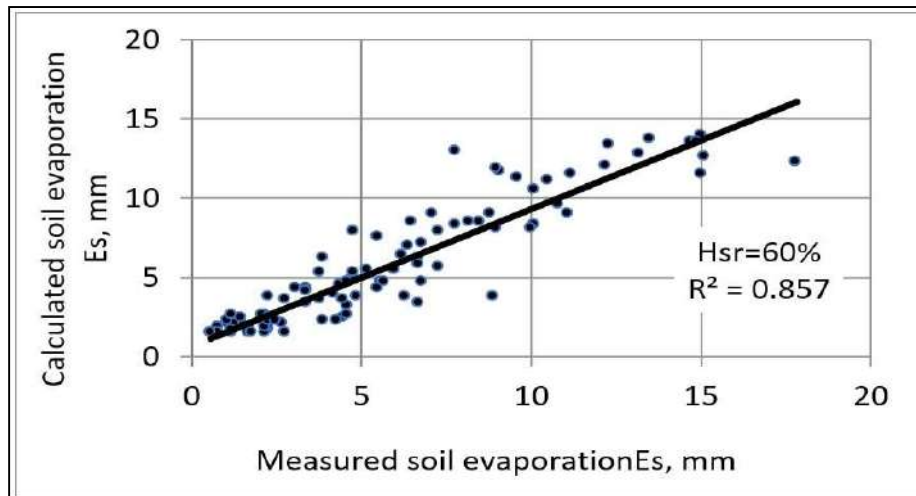
a)



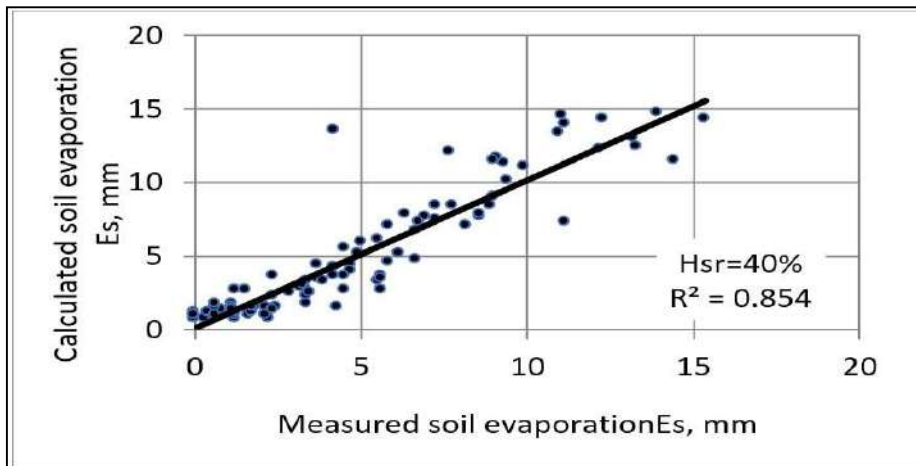
b)



c)



d)



e)

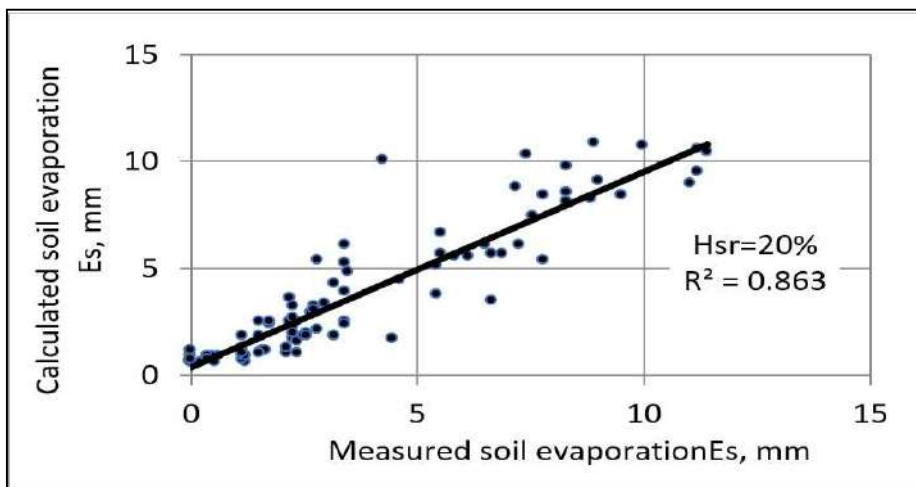


Figure 40. Comparaison entre les valeurs d'évaporation calculées et mesurées pour différents degrés de saturation du sol à : a) $H_s = 100\%$, b) $H_s = 80\%$, c) $H_s = 60\%$, d) $H_s = 40\%$, e) $H_s = 20\%$.

L'évaluation des résultats obtenus est basée sur plusieurs méthodes telle que l'application de critère de Nash-Sutcliffe (NSE), de l'erreur quadratique moyenne (RMSE), de l'erreur de biais moyenne (MBE), du coefficient de détermination (R^2) et de ratio somme des rangs (RSR)(Song et al., 2015), Les paramètres statistiques de comparaison des valeurs de l'évaporation calculées par l'abaque et observées sont illustrées dans le (Tableau 11).

Tableau 11. Quantités statistiques de comparaison entes les valeurs de l'évaporation calculées et mesurées

Paramètre statistique	Paramètres statistiques				
	Hsr 100%	Hsr 80%	Hsr 60%	Hsr 40%	Hsr 20%
Coefficient of Détermination R^2	0.929	0.966	0.960	0.976	0.965
Nash-Sutcliffe criterion NSE	0.86	0.86	0.86	0.83	0.86
Root Mean Square Error RMSE	5.57	5.14	4.51	4.69	3.44
Mean Bias Error MBE	1.61	1.48	1.30	1.35	0.99
Rank Sum Ratio RSR	0.37	0.38	0.38	0.41	0.38

L'interprétation des paramètres statistiques présente dans le (Tableau 11).

- **le Coefficient of Détermination (R^2) :**

R^2 varie entre 0.929 et 0.976. Cela indique une forte corrélation entre les valeurs observées et les valeurs calculées pour tous les degrés de saturation. Plus R^2 est proche de 1 la performance du modèle est meilleure.

- **Critère de Nash-Sutcliffe (NSE) :**

Une valeur de NSE autour de 0.86 (et 0.83 pour Hsr 40%) montre une très bonne performance du modèle. Des valeurs proches de 1 indiquent que le modèle prédit presque parfaitement les observations.

- **Root Mean Square Error (RMSE) :**

Les valeurs de RMSE (5.57 à 3.44) mesurent l'erreur moyenne quadratique entre les prédictions et les observations. Plus RMSE est faible, meilleur est le modèle.

- **Mean Bias Error (MBE) :**

Les valeurs de MBE (1.61 à 0.99) mesurent le biais moyen du modèle. Un biais plus faible indique un modèle équilibré et sans grande surestimation ni sous-estimation.

- **- Rank Sum Ratio (RSR) :**

Les valeurs de RSR (0.37 à 0.41) indiquent un bon ajustement. Une valeur faible de RSR (proche de 0) est idéale, ce qui confirme ici que les modèles sont globalement performants.

La courbe de distribution des écarts entre les valeurs calculées et mesurées en mm est symétrique, avec absence d'erreurs systématiques (distribution normale, figure 41)

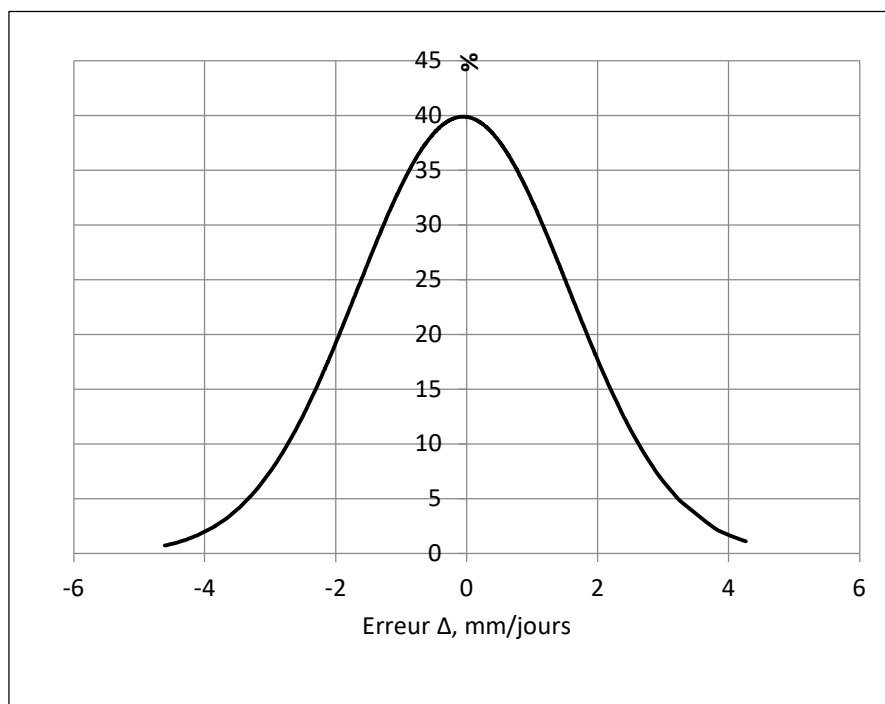


Figure 41. Courbe de distribution des erreurs de calcul des évaporations journalières par l'abaque (36).

Compte tenu du manque de fiabilité de la mesure des valeurs d'évaporation journalière, les résultats de la comparaison peuvent être considérés comme satisfaisants.

Les valeurs mensuelles de l'évaporation du sol nu pour différents degré de saturation ont été déterminées à partir des valeurs de l'évaporation journalières. Les valeurs mensuelles des paramètres météorologiques sont également déterminées. Le (Tableau 12) récapitule toutes les valeurs mensuelles de l'évaporation du sol nu en fonction du degré de saturation, de l'évaporomètre Piche, de l'évaporation de la surface du plan d'eau du Bac Classe « A » et de la température de l'air de toute la période d'observation qui s'étale du 01 avril 2021 au 31 avril 2022.

Tableau 12. Valeurs mensuelles de l'évaporation du sol nu et des paramètres météorologiques.

Mois	Température de l'air	Evaporation (mm)		Evaporation du sol nu pour différent taux de saturation (mm)				
		Bac « A »	Piche	100%	80%	60%	40%	20%
Mai	28	251	338	198	186	148	131	72
Juin	36	368	526	379	308	251	234	158
Juillet	41	572	909	548	480	414	366	293
Aout	38	384	576	364	319	274	258	226
Septembre	34	292	437	290	269	248	214	142
Octobre	24	196	322	192	154	145	118	97
Novembre	18	146	184	150	108	94	74	46
Décembre	11	62	98	75	54	48	27	14
Janvier	11	77	95	81	62	47	18	3
Février	15	115	138	89	68	59	43	30
Mars	18	142	158	114	86	70	44	33
Avril	24	281	304	270	191	159	117	76

La comparaison entre les évaporations mensuelles du sol nu pour différents degré de saturation de toute la période d'observation montre que l'évaporation de Piche est toujours la plus élevée dans toute cette période. Les valeurs mensuelles de l'évaporation du bac classe «A» et de l'évaporation du lysimètre pour une saturation totale sont proches entre elles (Tableau11). La distribution de l'évaporation mensuelle dans l'année est présentée dans la (Figure 42).

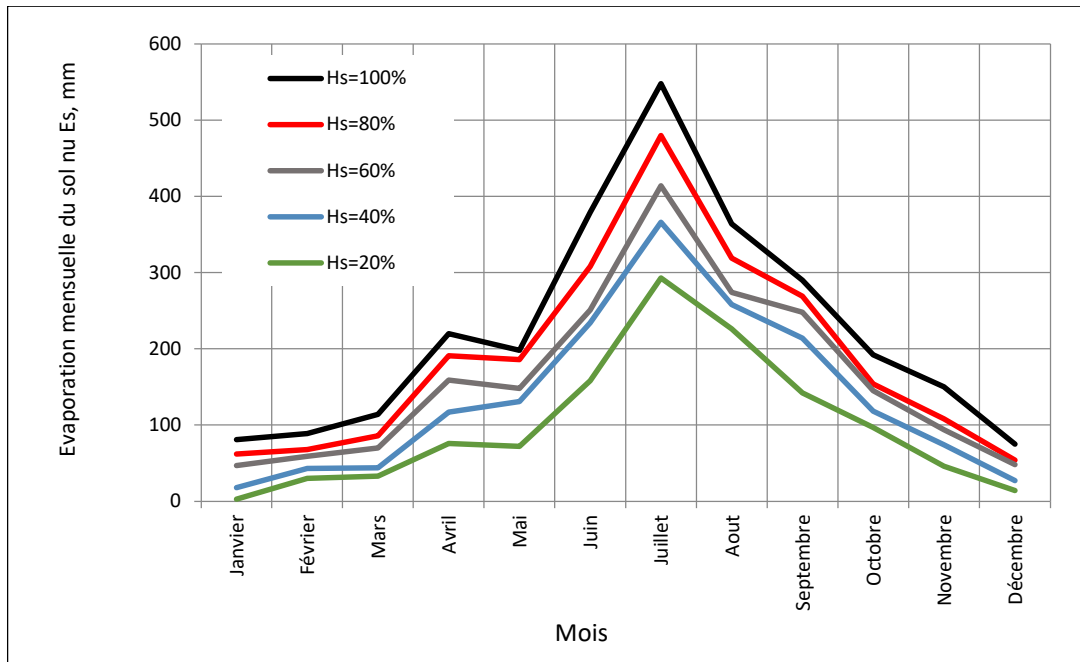


Figure 42. Evaporations mensuelles (E_s , mm) du sol nu à différents états de saturation du sol (H_s , %).

Les plus faibles valeurs mensuelles de l'évaporation du sol sont observées dans le mois de janvier, $E_s = 80$ mm pour un taux d'humidité $H_s = 100\%$ et $E_s \approx 3$ mm pour un taux d'humidité $H_s = 20\%$. Les plus fortes valeurs sont observées dans le mois de juillet avec $E_s = 548$ mm pour $H_s = 100\%$ et $E_s = 293$ mm pour $H_s = 20\%$.

Pour les mêmes conditions météorologiques, l'évaporation mensuelle du sol croît avec l'augmentation du degré de saturation du sol. Un exemple d'évolution de cette croissance pour les mois de janvier et de juillet est illustré dans la (Figure 43).

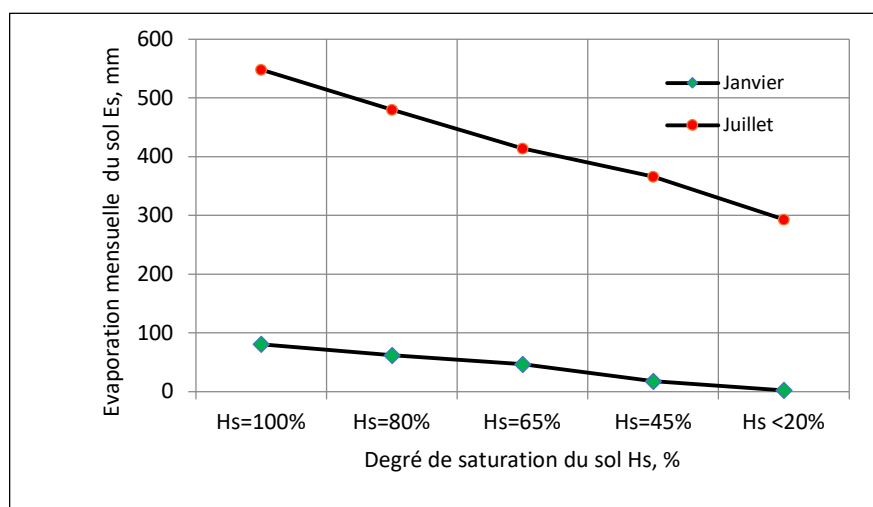
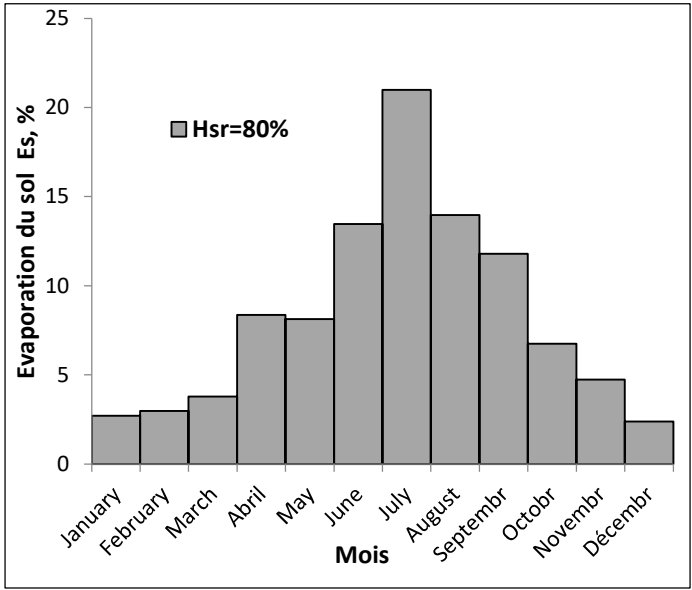
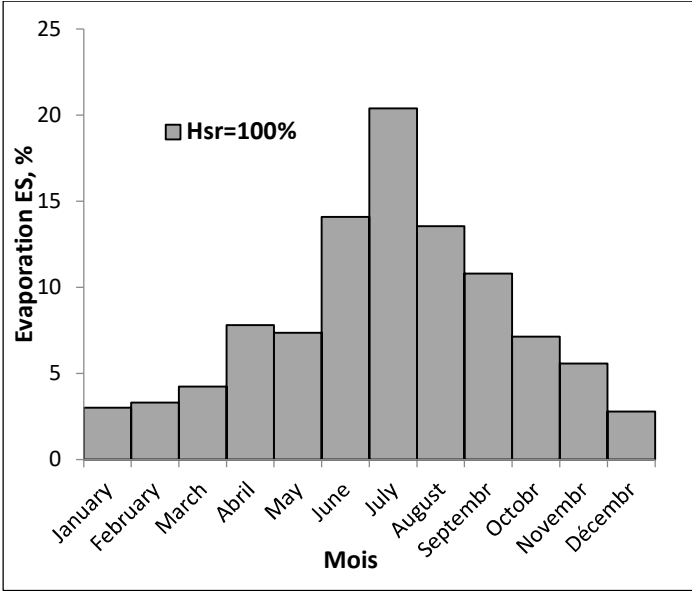


Figure 43. Evolution de l'évaporation mensuelle en fonction de taux d'humidité du sol en mois de janvier et juillet.

Le taux d'évaporation (en pourcentage de la valeur annuelle) n'est pas le même tout au long de l'année. Il varie avec la saison. La distribution des totaux mensuels de l'évaporation en fonction du degré de l'humidité est présentée dans la (Figure 44).



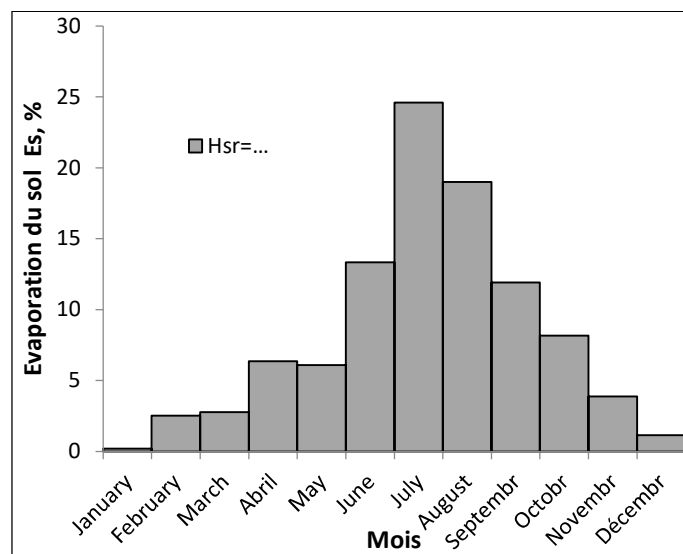
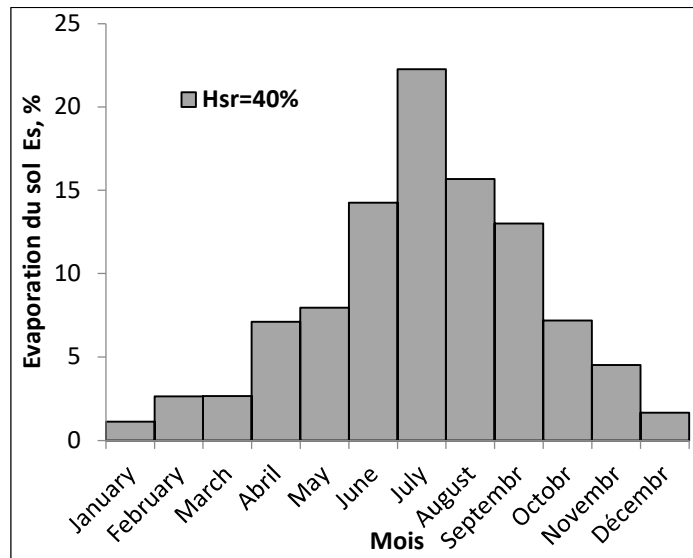
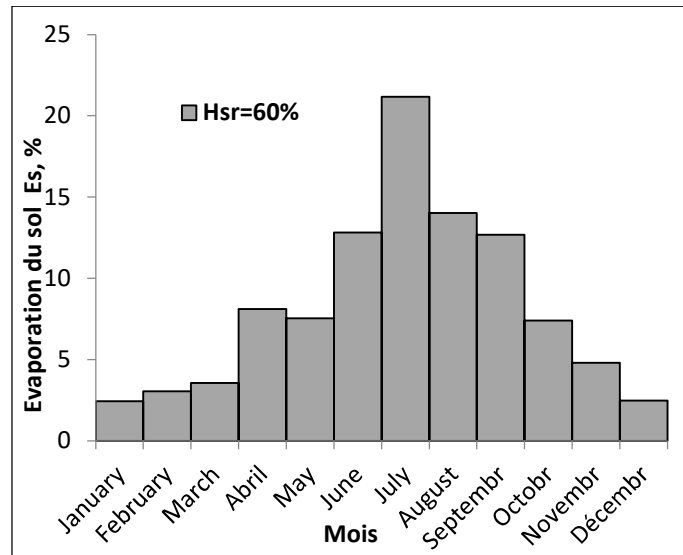


Figure 44. Distribution de la tranche d'évaporation mensuelle du sol nu E_s ,% pour différents degrés de saturation (H_{sr} ,%)

Pour un degré de saturation du sol $Hsr = 100\%$, la tranche évaporée constitue presque 50% de la tranche annuelle en période d'été et 10% de la tranche annuelle en période d'hiver. Pour les faibles taux d'humidité ($Hsr = 20\%$), la tranche d'eau évaporée constitue 55% durant l'été et 5% durant l'hiver.

Afin de déterminer l'évaporation mensuelle du sol, l'abaque de la figure 39 établi a été également utilisé. Les valeurs mensuelles de l'évaporation calculées pour chaque degré de saturation sont très proches des valeurs de l'évaporation mesurées (figure 45).

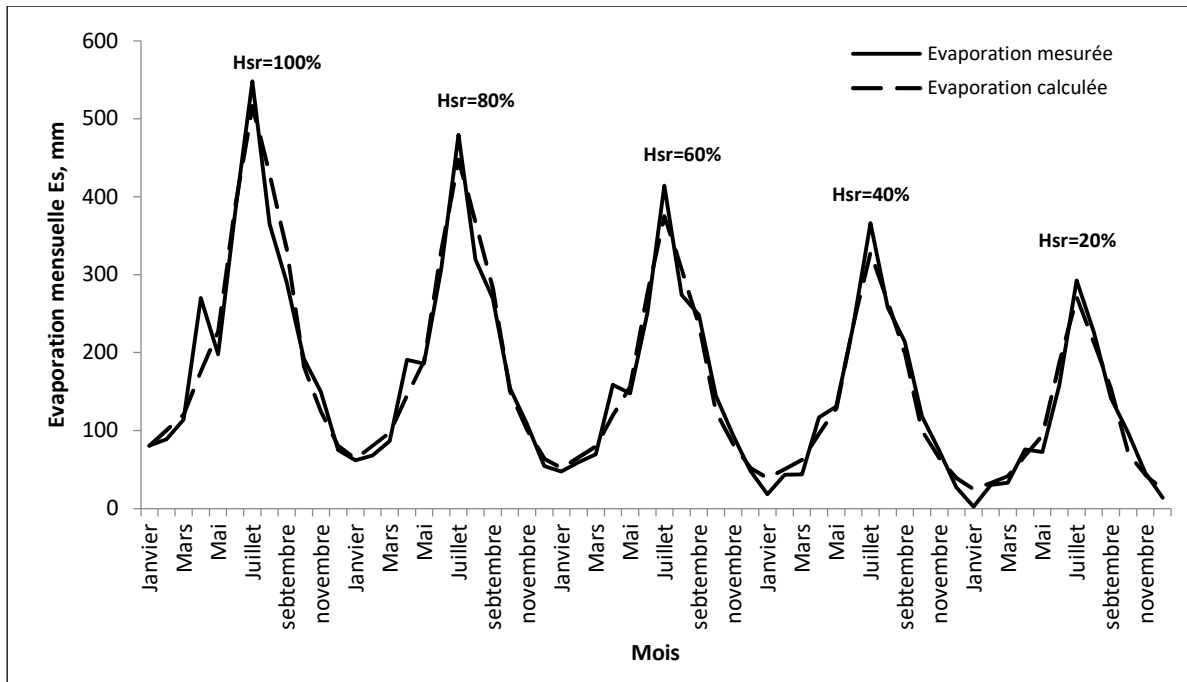


Figure 45. Comparaison entre les valeurs de l'évaporation mensuelle (E_s, mm) calculée et mesurée pour différents degrés de saturation ($H_{sr}, \%$).

IV.6. Conclusion

L'étude de l'évaporation du sol nu dans la zone de Touggourt élaborée a permis de clarifier l'évolution de cette importante caractéristique en fonction de la température de l'air et du taux d'humidité du sol. Pour un même taux d'humidité du sol, l'évaporation est d'autant plus faible que la température de l'air est faible, à température de l'air égale, l'évaporation sera d'autant plus intense que le taux d'humidité du sol sera élevé et enfin, pour une saturation totale en eau du sol, l'évaporation tend vers une limite correspondant à l'évaporation potentielle. Ces trois lois définies ont permis de proposer un abaque de calcul de l'évaporation du sol nu (sol sable) à partir de la température de l'air et du degré de saturation du sol. Vérifiée sur un très grand nombre de données, l'abaque fournit des résultats satisfaisants et peut être considéré comme fiable à des fins d'études agronomiques, hydrologiques et autres.

Conclusion Générale

Conclusion Générale

La gestion des ressources en eau dans les régions arides comme celle de Touggourt représente un défi majeur en raison des conditions climatiques extrêmes qui la caractérisent. Les températures élevées, les précipitations rares et les taux d'évaporation élevés jouent un rôle déterminant dans l'équilibre hydrique de la région. Grâce à une analyse approfondie des données expérimentales recueillies sur le terrain, nous avons pu mettre en évidence l'interaction entre l'évaporation du sol et les différents facteurs climatiques. Les résultats ont confirmé que l'évaporation des sols dans cet environnement aride ne dépend pas uniquement de la température de l'air, mais est également influencée par d'autres paramètres tels que l'humidité relative, la texture du sol, son degré de saturation en eau et la profondeur de la nappe phréatique. Le travail expérimental mené à l'aide des mini-lysimètres GGI-500 ont révélé que l'évaporation atteint son maximum pendant l'été, lorsque les températures sont élevées et l'humidité relative est faible, tandis qu'elle diminue de manière significative en hiver.

Sur la base de ces observations, un modèle simplifié a été développé en se basant sur la température de l'air et le degré de saturation du sol, le modèle a montré une efficacité notable selon les indicateurs statistiques utilisés, avec une bonne corrélation entre les valeurs estimées et les mesures expérimentales. Le modèle élaboré constitue ainsi un outil pratique pouvant être utilisé pour améliorer la gestion des ressources en eau. Grâce à ce modèle, les agriculteurs et les gestionnaires de l'eau peuvent estimer les pertes en eau dues à l'évaporation avec une précision acceptable, ce qui leur permet d'adopter des stratégies d'irrigation plus efficaces et de réduire le gaspillage de l'eau.

Par ailleurs, les changements climatiques constituent un défi majeur à prendre en compte dans les études futures, l'augmentation des températures mondiales et les perturbations des régimes pluviométriques, la dynamique de l'évaporation pourrait être évoluer de manière imprévisible, ce qui pourrait impacter les stratégies de gestion de l'eau dans les régions arides. Ainsi, une recherche approfondie sur l'impact du changement climatique sur l'évaporation des sols permettrait d'anticiper ces évolutions et de proposer des solutions adaptées pour assurer une gestion durable des ressources en eau.

De plus, la généralisation des résultats de cette étude par la comparaison avec d'autres régions présentant des conditions climatiques similaires pourrait contribuer à améliorer notre compréhension des mécanismes d'évaporation dans les milieux arides et semi-arides. En

réalisant des études comparatives, il serait possible de valider l'efficacité du modèle proposé et d'évaluer son applicabilité dans divers contextes environnementaux.

L'étude de l'évaporation des sols ne se limite pas à un enjeu théorique, mais revêt une importance pratique majeure, car elle affecte directement la sécurité hydrique et agricole des régions sèches. Une meilleure compréhension de ce phénomène permettrait de développer des stratégies d'irrigation plus efficace, et de limiter la surexploitation des ressources en eau et d'orienter l'élaboration de politiques de gestion durable dans les zones arides.

Cette recherche souligne l'importance de poursuivre les investigations sur les facteurs influençant l'évaporation des sols en combinant approches expérimentales et modélisation mathématique. Elle met également en évidence la nécessité d'élaborer des solutions innovantes pour faire face aux défis croissants liés à la rareté de l'eau dans les régions désertiques.

BIBLIOGRAPHIE

- Abdullahi, A. S., Mohammad Soom, M. A., Ahmad, D., & Mohamed Shariff, A. R. (2013). Characterization of rice (*Oryza sativa*) evapotranspiration using micro paddy lysimeter and class "A" pan in tropical environments. *Australian Journal of Crop Science*, 7(5), 650-658. <https://doi.org/https://search.informit.org/doi/10.3316/informit.364761601365399>
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56. *Fao, Rome*, 300(9), D05109.
- Allen, S. (1990). Measurement and estimation of evaporation from soil under sparse barley crops in northern Syria. *Agricultural and Forest Meteorology*, 49(4), 291-309. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0168-1923\(90\)90003-O](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0168-1923(90)90003-O)
- Aschonitis, V., Touloumidis, D., ten Veldhuis, M. C., & Coenders-Gerrits, M. (2022). Correcting Thornthwaite potential evapotranspiration using a global grid of local coefficients to support temperature-based estimations of reference evapotranspiration and aridity indices. *Earth Syst. Sci. Data*, 14(1), 163-177. <https://doi.org/10.5194/essd-14-163-2022>
- Assouline, S., Tyler, S. W., Tanny, J., Cohen, S., Bou-Zeid, E., Parlange, M., & Katul, G. G. (2008). Evaporation from three water bodies of different sizes and climates: Measurements and scaling analysis. *Advances in Water Resources*, 31(1), 160-172.
- Aydin, M., Yang, S. L., Kurt, N., & Yano, T. (2005). Test of a simple model for estimating evaporation from bare soils in different environments. *Ecological Modelling*, 182(1), 91-105. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2004.07.013>
- Balugani, E., Lubczynski, M., & Metselaar, K. (2023). Lysimeter and in situ field experiments to study soil evaporation through a dry soil layer under semi-arid climate. *Water Resources Research*, 59(3), e2022WR033878.
- Belarbi, N., & Saïghi, M. (2007). Etude comparative des méthodes d'évaluation du taux d'évaporation à partir d'une surface d'eau libre. Application aux régions arides et semi arides en Algérie. JITH 2007,
- Bennamia, M. M., Boutoutaou, D., Saggai, S., Gheriani, S., & El Fergougui, M. (2024). Study of the Relationship Between Evaporation, Soil Water De cit, and Air Temperature in Arid Regions (Case of the Touggourt Zone). *Journal of Ecological Engineering*, 25(9).
- Benseghier-Hadjaidji, F., Talbi, N., & Derridj, A. (2018). Contribution to the study of the zonal variation of the climate aridity in central northern Sahara (Algeria). AIP Conference Proceedings,
- Besbes, M., & Horriche, F. J. (2007). Design of a piezometric monitoring network for the North Western Sahara Aquifer System. *Science et changements planétaires/Sécheresse*, 18(1), 13-22.
- Bird, R., Stewart, W., & Lightfoot, E. (2007). Transport Phenomena, Revised 2nd Edition, 2007. In: John Wiley & Sons.
- Boast, C., & Robertson, T. (1982). A "micro-lysimeter" method for determining evaporation from bare soil: Description and laboratory evaluation. *Soil Science Society of America Journal*, 46(4), 689-696. [https://doi.org/ https://doi.org/10.2136/sssaj1982.03615995004600040005x](https://doi.org/https://doi.org/10.2136/sssaj1982.03615995004600040005x)
- Boualem, B., & Salah, B. M. Qualité des eaux de l'aquifère de complexe terminal de Sahara Septentrional: Cas de la région de Taibet (SE Algérie).
- Brutsaert, W. (2013). *Evaporation into the atmosphere: theory, history and applications* (Vol. 1). Springer Science & Business Media.
- Campbell, G. S., & Norman, J. M. (2000). *An introduction to environmental biophysics*. Springer Science & Business Media.
- Chen, L., Wang, W., Zhang, Z., Wang, Z., Wang, Q., Zhao, M., & Gong, C. (2018). Estimation of bare soil evaporation for different depths of water table in the wind-blown sand area of the Ordos Basin, China. *Hydrogeology Journal*, 26(5), 1693-1704. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s10040-018-1774-6>

- Chu, C.-R., Li, M.-H., Chen, Y.-Y., & Kuo, Y.-H. (2010). A wind tunnel experiment on the evaporation rate of Class A evaporation pan. *Journal of Hydrology*, 381(3-4), 221-224. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.11.044>
- Cousin, I., Richer-De-Forges, A. C., & Arrouays, D. (2017, 2017-06-08). *Le stockage d'eau dans les sols* Commission de Planification de l'Agence de l'Eau Adour-Garonne, Toulouse, France. <https://hal.inrae.fr/hal-02785139>
- Crank, J. (1979). *The mathematics of diffusion*. Oxford university press.
- Cussler, E. L. (2009). *Diffusion: mass transfer in fluid systems*. Cambridge university press.
- Daamen, C. C., Simmonds, L., Wallace, J., Laryea, K., & Sivakumar, M. (1993). Use of microlysimeters to measure evaporation from sandy soils. *Agricultural and Forest Meteorology*, 65(3-4), 159-173. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0168-1923\(93\)90002-Y](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0168-1923(93)90002-Y)
- Dai, A., Zhao, T., & Chen, J. (2018). Climate change and drought: a precipitation and evaporation perspective. *Current Climate Change Reports*, 4, 301-312.
- Daoud, J. I. (2017). Multicollinearity and regression analysis. *Journal of Physics: Conference Series*, De Vries, D., & Venema, H. (1954). Some considerations on the behaviour of the Piche evaporimeter: with 2 figs. and 2 tables; avec un résumé français. *Vegetatio*, 5(1), 225-234.
- Dong, Z., Hu, H., Wei, Z., Liu, Y., Xu, H., Yan, H., Chen, L., Li, H., & Khan, M. Y. A. (2022). Estimating the actual evapotranspiration of different vegetation types based on root distribution functions. *Frontiers in Earth Science*, 10, 893388.
- Doudou, M., & Kenioua, A. (2018). *Structure, fonctionnement et modélisation hydrogéologique de l'aquifère du complexe terminal de la région d'Ouargla-Tougourt, Sud-Est de l'Algérie* [Université de Jijel].
- Edebeatu, C. C., Ibeh, G. F., Nwokochia, C. O., & Akande, P. (2025). Comparative Analysis and Performance of Empirical Radiation Models for Estimating Crop Water Requirement in Semi-Arid Region of Northern Environment of Nigeria. *Nigerian Journal of Theoretical and Environmental Physics*, 3(2), 1-6.
- Elakhdar, M. (2005). < حساسية الصحراء المنخفضة وانعكاسات التدخل.pdf > https://uomustansiriyah.edu.iq/media/lectures/9/9_2019_01_05!06_53_15_PM.pdf
- Facchi, A., Masseroni, D., & Miniotti, E. F. (2016). Self-made microlysimeters to measure soil evaporation: a test on aerobic rice in northern Italy. *Paddy and Water Environment*, 15(3), 669-680. <https://doi.org/> <https://doi.org/10.1007/s10333-016-0566-7>
- Flumignan, D. L., Faria, R. T. d., & Lena, B. P. (2012). Test of a microlysimeter for measurement of soil evaporation. *Engenharia Agrícola*, 32, 80-90. <https://doi.org/> <https://doi.org/10.1590/S0100-69162012000100009>
- Gao, Z., Yang, D., Li, C., Zhang, J., & Wang, Q. (2025). A review of lysimeters from the perspective of measurement performance and intelligent development in China. *Irrigation and Drainage*, 74(1), 276-298.
- GHERIANI, S. (2022). *Optimisation de répartition de l'eau d'irrigation et du rendement des cultures agricoles (cas de luzerne) en technique d'irrigation par aspersion stationnaire (couverture intégrale) dans les conditions de climat désertique et de sols sableux. Cas de la région de la vallée de Oued Righ, w. de Ouargla* [Université Kasdi Merbah Ouargla].
- Gong, C., Wang, W., Zhang, Z., Wang, H., Luo, J., & Brunner, P. (2020). Comparison of field methods for estimating evaporation from bare soil using lysimeters in a semi-arid area. *Journal of Hydrology*, 590. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125334>
- Goulet, E., Morlat, R., Rioux, D., & Cesbron, S. (2004). Méthode de calcul de la réserve utile en eau des sols: Application à la cartographie des terroirs viticoles du Val de Loire. *Journal international des sciences de la vigne et du vin*, 38(4), 231-235.
- HADDANE, A., HACINI, M., & BELLAOUEUR, A. (2015). Hydrochimie et facies géochimiques des saumures du chott baghdad (sud algerien).
- HAFHOUF, I. (2022). *Étude de l'endommagement des sols salés soumis à des sollicitations d'humidification Séchage (température-humidité)* [Université de Batna 2].

- Halitim, A., Abdelhafidh, Y., Dekki, N., & Rechachi, M. (2016). Réactions physiques du sol à la sécheresse et aux canicules en régions arides. *Journal Algérien des Régions Arides (JARA)*, 13, 48-55.
- Han, J., & Zhou, Z. (2013). Dynamics of soil water evaporation during soil drying: laboratory experiment and numerical analysis. *The Scientific World Journal*, 2013(1), 240280.
- Heck, K., Coltman, E., Schneider, J., & Helmig, R. (2020). Influence of radiation on evaporation rates: A numerical analysis. *Water Resources Research*, 56(10), e2020WR027332.
- Huixiao, W., & Simmonds, L. (1997). Measurement and simulation of evaporation from a bare soil. *Journal of Environmental Sciences(China)*, 9(4), 446-453.
- Hutin, A. (2020). *Les milieux poreux en ingénierie de réservoir : Introduction*. <https://doi.org/10.5281/zenodo.6394975>
- Jacobs, A., Heusinkveld, B., & Lucassen, D. (1998). Temperature variation in a class A evaporation pan. *Journal of Hydrology*, 206(1-2), 75-83. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(98\)00087-0](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0022-1694(98)00087-0)
- KADRI, A. (2023). *Représentation des analyses Hydrochimiques et Adsorption du fluorure des eaux souterraine dans Le Sud Algérien: Cas de cuvette de Touggourt* UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA].
- Kahale, T. (2022). Amélioration de la conception des lysimètres pour le contrôle de percolation en sites d'enfouissement.
- Kahlerras, L., & Belhamri, A. (2010). Influence Des Conditions Extérieures Sur Le Comportement Au Séchage d'un Milieu Poreux. 1er congrès de l'Association Marocaine de Thermique, AMT'2010,
- Kébré, M. B. (2013). *Gestion des Ressources en Eau dans les Régions Arides: Analyse Expérimentale d'un Sol Type du Burkina Faso et Modélisation Numérique des Transferts d'Eau* Université Montpellier II-Sciences et Techniques du Languedoc].
- Kirkham, M. (2004). *Principles of Soil and Plant Water Relations*. Elsevier.
- Koull, N. (2010). Paléo-hydrologie de la région de l'Oued Righ.
- Kumar, K. K., Kumar, K. R., & Rakhecha, P. (1987). Comparison of Penman and Thornthwaite methods of estimating potential evapotranspiration for Indian conditions. *Theoretical and Applied Climatology*, 38, 140-146.
- Laborde, J.-P. (2000). *Éléments d'hydrologie de surface*. Université de Nice-Sophia Antipolis. France (204p).
- Lecarpentier, C. (1975). L'évapotranspiration potentielle et ses implications géographiques (suite). *Annales de géographie*,
- Lemon, E. R. (1956). The potentialities for decreasing soil moisture evaporation loss. *Soil Science Society of America Journal*, 20(1), 120-125. <https://doi.org/https://doi.org/10.2136/sssaj1956.03615995002000010031x>
- Liu, C., Zhang, X., & Zhang, Y. (2002). Determination of daily evaporation and evapotranspiration of winter wheat and maize by large-scale weighing lysimeter and micro-lysimeter. *Agricultural and Forest Meteorology*, 111(2), 109-120. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0168-1923\(02\)00015-1](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0168-1923(02)00015-1)
- Ma, Z., Wang, W., Zhang, Z., Brunner, P., Wang, Z., Chen, L., Zhao, M., & Gong, C. (2019). Assessing bare-soil evaporation from different water-table depths using lysimeters and a numerical model in the Ordos Basin, China. *Hydrogeology Journal*, 27(7), 2707-2718. <https://doi.org/10.1007/s10040-019-02012-0>
- Matin, M., & Bourque, C. P.-A. (2013). Influence of vegetation cover on regional evapotranspiration in semi-arid watersheds in northwest China. *Evapotranspiration-An Overview*.
- Matthias, A., Fimbres, A., Sano, E., Post, D., Accioly, L., Batchily, A., & Ferreira, L. (2000). Surface roughness effects on soil albedo. *Soil Science Society of America Journal*, 64(3), 1035-1041.
- Meissner, R., Rupp, H., & Haselow, L. (2020). Use of lysimeters for monitoring soil water balance parameters and nutrient leaching. In (pp. 171-205). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818032-7.00007-2>

- Merta, M., Seidler, C., & Fjodorowa, T. (2006). Estimation of evaporation components in agricultural crops. *Biologia*, 61(S19), S280-S283. <https://doi.org/https://doi.org/10.2478/s11756-006-0173-y>
- MingYue, Z., Guojie, W., Hagan, D. F. T., Waheed, U., Giri, K., Jiao, L., & Shijie, L. (2022). Impacts of Vegetation Changes on Land Evapotranspiration in China During 1982–2015. *Frontiers in Environmental Science*, 10, 819277.
- Monteith, J., & Unsworth, M. (2013). *Principles of environmental physics: plants, animals, and the atmosphere*. Academic press.
- Ndiaye, P. M., Bodian, A., & Diop, S. B. (2022). Paradoxe d'évaporation dans la vallée du fleuve Sénégal. *Physio-Géo. Géographie physique et environnement*(Volume 17), 67-82.
- OSS. (2020). <OSS-Monographie_Eau.pdf> (Observatoire du Sahara et du Sahel ed.).
- Penman, H. L. (1948). Natural evaporation from open water, bare soil and grass. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences*, 193(1032), 120-145.
- Piron, M., Lebart, L., & Morineau, A. (1995). Statistique exploratoire multidimensionnelle. Paris.
- Priestley, C. H. B., & Taylor, R. J. (1972). On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters. *Monthly weather review*, 100(2), 81-92.
- Pulido-Bosch, A., Rigol-Sanchez, J. P., Vallejos, A., Andreu, J., Ceron, J., Molina-Sanchez, L., & Sola, F. (2018). Impacts of agricultural irrigation on groundwater salinity. *Environmental earth sciences*, 77, 1-14.
- REBIAI, G. (2023). Statistique descriptive et théorie de probabilités avec des applications.
- Réméniéras, G. (1980). *L'hydrologie de l'ingénieur*. Eyrolles. <https://books.google.dz/books?id= 1XPAAAAIAAJ>
- Ritchie, J. T. (1972). Model for predicting evaporation from a row crop with incomplete cover. *Water Resources Research*, 8(5), 1204-1213. <https://doi.org/https://doi.org/10.1029/WR008i005p01204>
- Rivet, C., Ruiz, T., & Perret, L. (2011). Étude expérimentale par SPIV de l'organisation d'une couche limite se développant au-dessus d'une canopée urbaine. CFM 2011-20ème Congrès Français de Mécanique,
- Royer-Gaspard, P., Andréassian, V., Thirel, G., & Perrin, C. (2019). Comment l'évolution de l'évaporation potentielle impacte les sécheresses. Colloque UNESCO-SHF:«Sécheresses 2019, Paris 11-12 et 13 décembre 2019»,
- Ruth, C. E., Michel, D., Hirschi, M., & Seneviratne, S. I. (2018). Comparative Study of a Long-Established Large Weighing Lysimeter and a State-of-the-Art Mini-lysimeter. *Vadose Zone Journal*, 17(1), 1-10. <https://doi.org/https://doi.org/10.2136/vzj2017.01.0026>
- SAGGAÏ, S. *Contribution à l'économie de l'eau par la réduction de l'évaporation des plans d'eau par les films mono-moléculaires*
- Schoeller, H. (1962). Les eaux souterraines masson et cie Paris. In: Istanbul.
- SEPTENTRIONAL, A. D. S. Système aquifère du Sahara septentrional.
- Shrestha, N. (2020). Detecting multicollinearity in regression analysis. *American Journal of Applied Mathematics and Statistics*, 8(2), 39-42.
- Shuttleworth, W. (1993). Evaporation. Chapter 4 in: Handbook of Hydrology. DR Maidment (ed.) McGraw-Hill. Inc. New York.
- Skhiri, A. (2019). *LES BASES DE L'IRRIGATION: Calcul des besoins en eau*.
- Song, X., Zhang, J., Zhan, C., Xuan, Y., Ye, M., & Xu, C. (2015). Global sensitivity analysis in hydrological modeling: Review of concepts, methods, theoretical framework, and applications. *Journal of Hydrology*, 523, 739-757. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.02.013>
- Suleiman, A. A., & Ritchie, J. T. (2003). Modeling Soil Water Redistribution during Second-Stage Evaporation. *Soil Science Society of America Journal*, 67(2). <https://doi.org/https://doi.org/10.2136/sssaj2003.3770>
- Tafasca, S. (2020). *Évaluation de l'impact des propriétés du sol sur l'hydrologie simulée dans le modèle ORCHIDEE* Sorbonne Université].

- Tamimi, M., Green, S., Hammami, Z., Ammar, K., Ketbi, M., Shrouf, A., Dawoud, M., Kennedy, L., & Clothier, B. (2022). Evapotranspiration and crop coefficients using lysimeter measurements for food crops in the hyper-arid United Arab Emirates. *Agricultural Water Management*, 272, 107826. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2022.107826>
- Teng, J., Yasufuku, N., Liu, Q., & Liu, S. (2014). Experimental evaluation and parameterization of evaporation from soil surface. *Natural Hazards*, 73(3), 1405-1418. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s11069-014-1138-z>
- Thongkao, S., Ditthakit, P., Pinthong, S., Salaeh, N., Elkhachy, I., Linh, N., & Pham, Q. (2022). Estimating FAO Blaney-Criddle b-Factor Using Soft Computing Models. *Atmosphere*, 13. <https://doi.org/10.3390/atmos13101536>
- Tian, J., & Philpot, W. D. (2015). Relationship between surface soil water content, evaporation rate, and water absorption band depths in SWIR reflectance spectra. *Remote Sensing of Environment*, 169, 280-289.
- Trajkovic, S., & Kolakovic, S. (2009). Wind-adjusted Turc equation for estimating reference evapotranspiration at humid European locations. *Hydrology Research*, 40(1), 45-52. <https://doi.org/10.2166/nh.2009.002b>
- Wu, J., Li, P., Qian, H., & Fang, Y. (2014). Assessment of soil salinization based on a low-cost method and its influencing factors in a semi-arid agricultural area, northwest China. *Environmental earth sciences*, 71, 3465-3475.
- Wythers, K., Lauenroth, W., & Paruelo, J. (1999). Bare-soil evaporation under semiarid field conditions. *Soil Science Society of America Journal*, 63(5), 1341-1349.
- Xu, C. Y., & Singh, V. (2000). Evaluation and generalization of radiation-based methods for calculating evaporation. *Hydrological processes*, 14(2), 339-349.
- Zhang, W., Jung, M., Migliavacca, M., Poyatos, R., Miralles, D. G., El-Madany, T. S., Galvagno, M., Carrara, A., Arriga, N., & Ibrom, A. (2023). The effect of relative humidity on eddy covariance latent heat flux measurements and its implication for partitioning into transpiration and evaporation. *Agricultural and Forest Meteorology*, 330, 109305.
- Zhang, Z., Wang, W., Wang, Z., Chen, L., & Gong, C. (2018). Evaporation from bare ground with different water-table depths based on an in-situ experiment in Ordos Plateau, China. *Hydrogeology Journal*, 26(5), 1683-1691.

ANNEXES

Tableau des mesures des paramètres météorologiques dans le champ expérimental

DATE	TSEC	Thum	H	V	Tsol	Ebac	Epich
04-05-2021	26.20	20.06	55	7.3	23.5	6.2	9.8
06-05-2021	25.30	20.53	62	12	23.6	7.2	9.68
11-05-2021	28.66	23.33	61	5.1	24.3	7.92	10
13-05-2021	27.80	21.80	58	2.04	24.2	7.672	10.48
18-05-2021	28.13	23.66	61	4.1	27.2	8.96	8.8
20-05-2021	28.40	25.00	75	3.89	27.5	7.2	12
25-05-2021	28.83	25.33	73	8.86	27.7	9.76	12.48
27-05-2021	29.30	22.20	55	4.13	27.95	12	16.8
01-06-2021	30.40	21.50	45	14.2	28.3	9	12.1
03-06-2021	30.68	22.50	48	13	28.3	9.9	12.5
08-06-2021	33.40	25.50	40	6.3	29.95	8.34	13.1
10-06-2021	34.30	22.80	39	10.3	29.9	11.2	11
15-06-2021	35.17	25.00	45	10.6	33.225	9	15
17-06-2021	36.90	25.40	36	3.1	34.82	12.2	18.6
22-06-2021	41.85	26.00	32	3	34.125	15	24
24-06-2021	41.55	27.50	34	6.9	34.4	16.92	25.5
29-06-2021	42.50	27.43	32	5.32	35.1	18.79	26
01-07-2021	42.35	27.10	31	11.05	34.6	16.9	29.2
06-07-2021	42.16	25.30	28	12	35.5	20.3	29
08-07-2021	41.06	24.90	29	15	35.2	19.7	37
13-07-2021	40.50	25.00	29	4.05	34.6	21.85	36.2
15-07-2021	39.70	24.00	30	10.3	34.3	20	28
20-07-2021	41.30	25.20	28	8.3	34.2	22.5	34
22-07-2021	42.10	26.10	29	7.6	34.6	18	25.5
27-07-2021	39.20	25.74	31	5.3	33.6	16.945	28.7
29-07-2021	39.40	26.30	35	8.3	33.2	15.3	25
03-08-2021	39.80	27.00	36	10.1	33.5	15.8	25.8
05-08-2021	40.10	25.66	31	5.8	34.2	14.66	22

10-08-2021	40.30	29.50	30.5	6.85	34.1	12.35	20
12-08-2021	38.30	24.00	30	7.3	33.9	14.3	19.7
17-08-2021	36.10	23.20	31	8.2	33.2	10.1	17.5
19-08-2021	39.60	26.10	35	12.3	33.5	13.6	18.2
24-08-2021	35.20	22.00	31	11.9	32.1	13.2	17.3
26-08-2021	36.10	23.40	33	9.1	32.5	9.1	15.9
31-08-2021	35.30	24.20	40	4.2	32.9	12.1	16.3
02-09-2021	34.90	22.60	35	3.5	33.1	13.5	19.5
07-09-2021	34.20	22.50	36	2.1	33.9	12.2	17
09-09-2021	34.60	21.00	30	6	33.5	10.7	17.5
14-09-2021	34.55	23.80	35	4.85	33.2	10	12.8
16-09-2021	36.05	21.50	25	7.7	33.4	11.55	13.75
21-09-2021	34.85	23.80	29	9.78	33.5	10.11	12.5
23-09-2021	32.10	22.20	40	3.7	33.5	8.3	13.6
28-09-2021	32.55	23.85	45	5.8	32.05	5.85	12
30-09-2021	31.20	22.75	45	5.05	31.23	5.5	12.5
05-10-2021	29.70	20.90	43	5.43	28.7	9.3	13.8
07-10-2021	26.47	17.73	40	6.75	22.15	7.79	11.2
12-10-2021	25.47	16.73	45	6.79	24.8	6	13.5
14-10-2021	22.87	14.73	41	5.55	20.8	5.78	10.52
19-10-2021	25.10	16.07	40	1.74	24.65	5.6	6.2
21-10-2021	21.70	16.10	60	9.5	21	7	13
26-10-2021	21.00	15.00	50	4.6	19.75	3	4.7
28-10-2021	22.07	16.33	55	4.5	15	7.7	13
02-11-2021	26.27	18.47	55	4.77	23.85	7.5	10
04-11-2021	23.20	15.07	40	8.19	21.3	8.3	11
09-11-2021	16.53	11.13	55	4.55	13	7.05	10.5
11-11-2021	15.20	9.80	50	4.33	15	5.1	4.6
16-11-2021	16.93	12.03	60	4.25	15.15	5.2	6.4
18-11-2021	15.93	10.73	60	3.95	14.7	1.94	2.8

23-11-2021	18.27	13.53	55	5.92	15.8	3.1	4.2
25-11-2021	16.93	12.27	60	2.7	15.45	2.7	3
30-11-2021	15.00	11.00	60	4.41	12	2.8	2.8
02-12-2021	13.07	9.60	61	8.24	11.5	2.05	3
07-12-2021	11.30	7.73	58	1.66	11	2.1	3.2
09-12-2021	13.97	9.60	69	5.99	13	1.8	4.2
14-12-2021	10.03	6.87	55	3.24	8.6	2.47	4
16-12-2021	11.80	7.30	62	4.88	8.45	3	5.9
21-12-2021	9.33	6.80	71	5.5	9	2	3.5
23-12-2021	9.50	7.13	72	4.38	12	2.4	1.75
28-12-2021	10.60	6.87	68	3.92	16	1.3	2
30-12-2021	12.40	7.23	50	3.56	15	1.42	2
04-01-2022	14.53	9.07	51	5.1	13.5	4.1	3.7
06-01-2022	10.23	8.13	71	4.38	10.6	1.6	3.1
11-01-2022	13.96	9.47	51	3.92	13.8	3.4	4
13-01-2022	10.00	6.20	55	4.09	8.6	3.7	4.2
18-01-2022	10.56	8.27	77	4.21	8.55	1.5	2.95
20-01-2022	10.26	7.23	71	6.05	8.08	1.85	2
25-01-2022	12.06	8.73	65	1.89	10.1	1.5	2.5
27-01-2022	9.33	7.33	70	7.12	9	2.8	3
01-02-2022	15.13	10.80	58	10.99	13.3	3.11	3.33
03-02-2022	12.67	9.87	68	4.33	13.05	2.45	2.5
08-02-2022	14.47	9.47	58	7.3	12.25	2.8	2.8
10-02-2022	13.53	8.80	50	4.68	11.1	4.6	5.3
15-02-2022	16.33	11.87	53	9.02	12.6	6.7	8
17-02-2022	14.47	11.20	70	4.2	13.4	3.5	5
22-02-2022	17.53	13.07	65	6.8	16.7	5.4	7
24-02-2022	15.27	11.53	63	3.98	12.75	2.1	3
01-03-2022	12.27	9.93	75	7.55	12	3.1	3.1
03-03-2022	12.40	8.87	68	13.29	10	5.8	6

08-03-2022	17.00	13.67	69	3.1	13.9	1.95	2.4
10-03-2022	18.00	14.33	63	5.1	15	2.4	2.8
15-03-2022	22.93	17.23	55	13	21	7.3	8
17-03-2022	17.33	12.23	55	6.7	17	4.3	5
22-03-2022	16.13	11.07	51	7.74	16.6	4.1	4.5
24-03-2022	15.60	11.33	60	12.9	17	4.33	4.8
29-03-2022	23.67	16.53	48	7.47	22	7.1	8
31-03-2022	22.53	15.77	52	4.63	19.3	6.8	8.1
05-04-2022	22.33	15.17	46	6.6	23.5	8.2	10
07-04-2022	18.47	11.87	43	2.3	19.2	6.3	8
12-04-2022	23.07	14.83	40	8.1	23.3	9.55	9.1
14-04-2022	24.33	14.23	32	7.2	19	8.67	6.5
19-04-2022	26.33	16.33	35	12	23.7	8.9	12.5
21-04-2022	22.93	14.13	36	14.9	19.7	11.8	13
26-04-2022	26.33	16.80	38	14.6	16.7	12	13
28-04-2022	26.67	16.00	35	6.7	17.9	9.6	9.1

Tableau des mesures de l'évaporation du sol en fonction des différents degrés de saturation

DATE	ESOL1	ESOL2	ESOL3	ESOL4	ESOL5
04-05-2021	5.25	5.20	4.42	3.65	1.49
06-05-2021	5.47	4.42	3.10	3.92	1.71
11-05-2021	6.69	7.13	5.14	4.70	2.71
13-05-2021	6.69	6.86	4.81	4.70	2.71
18-05-2021	7.57	5.64	3.81	4.15	2.65
20-05-2021	5.36	5.14	4.81	4.20	2.76
25-05-2021	6.86	6.52	5.97	3.70	2.27
27-05-2021	8.86	8.63	7.30	5.86	2.99
01-06-2021	9.40	5.47	3.93	4.92	2.21

03-06-2021	8.29	8.85	6.69	6.14	5.47
08-06-2021	10.51	9.45	5.53	6.69	3.48
10-06-2021	9.95	7.80	4.75	5.86	3.43
15-06-2021	12.99	10.78	8.46	8.63	6.86
17-06-2021	15.20	12.16	10.84	8.96	5.53
22-06-2021	13.88	13.32	12.27	11.11	7.41
24-06-2021	15.15	7.80	7.74	4.15	4.26
29-06-2021	18.30	16.64	14.98	13.88	8.90
01-07-2021	16.64	14.93	13.49	11.06	10.01
06-07-2021	22.39	19.24	14.71	15.37	11.22
08-07-2021	20.95	18.74	15.15	13.21	11.17
13-07-2021	19.90	20.46	17.80	13.32	9.01
15-07-2021	16.09	17.20	14.98	14.43	9.51
20-07-2021	19.35	15.65	13.16	10.89	8.29
22-07-2021	20.35	14.65	14.87	12.27	11.39
27-07-2021	15.92	11.89	10.51	9.90	8.35
29-07-2021	12.88	11.17	9.62	9.34	8.85
03-08-2021	13.60	12.83	9.12	9.12	8.35
05-08-2021	11.89	9.45	8.96	7.69	7.18
10-08-2021	14.15	12.72	12.22	12.22	11.00
12-08-2021	12.27	11.00	10.12	9.40	7.57
17-08-2021	12.33	9.95	8.79	7.74	7.24
19-08-2021	13.60	11.78	11.17	9.01	7.80
24-08-2021	10.95	10.23	8.24	8.57	6.63
26-08-2021	11.17	8.57	7.13	7.30	6.52
31-08-2021	9.40	9.23	6.52	6.30	5.53
02-09-2021	12.33	10.89	10.10	6.91	5.81
07-09-2021	9.68	9.45	7.30	8.13	5.42
09-09-2021	10.62	9.95	8.96	6.75	2.82
14-09-2021	12.22	12.72	10.01	11.11	7.80

16-09-2021	11.11	10.51	11.11	8.90	3.43
21-09-2021	10.01	8.35	7.74	7.30	6.14
23-09-2021	7.19	6.69	6.36	5.03	3.15
28-09-2021	6.75	5.58	6.75	5.53	4.59
30-09-2021	7.24	6.69	6.14	4.53	3.37
05-10-2021	6.75	4.53	6.69	6.69	6.63
07-10-2021	6.14	6.14	5.58	5.58	3.37
12-10-2021	7.80	6.69	5.53	5.53	3.37
14-10-2021	6.14	5.69	2.82	1.22	1.16
19-10-2021	5.58	4.48	3.37	3.37	2.27
21-10-2021	8.90	5.58	6.69	3.37	2.27
26-10-2021	4.26	3.43	4.53	2.32	2.32
28-10-2021	5.58	4.53	3.43	3.43	4.48
02-11-2021	8.96	6.75	6.75	5.58	2.21
04-11-2021	6.75	5.31	4.92	3.32	2.27
09-11-2021	6.75	5.25	4.48	4.31	2.38
11-11-2021	7.85	4.53	4.31	2.32	1.22
16-11-2021	5.14	3.21	2.16	2.16	1.16
18-11-2021	2.32	1.16	1.16	1.16	1.16
23-11-2021	2.60	2.10	2.16	1.16	1.16
25-11-2021	2.32	2.16	1.16	1.16	1.16
30-11-2021	2.27	2.05	1.11	1.11	1.11
02-12-2021	2.27	1.71	1.71	1.11	0.55
07-12-2021	1.88	1.60	1.22	1.22	0.00
09-12-2021	2.65	2.32	2.32	0.83	0.61
14-12-2021	3.43	2.16	2.76	2.27	1.22
16-12-2021	4.37	2.27	2.27	2.16	1.16
21-12-2021	3.26	2.27	1.16	0.00	0.00
23-12-2021	2.32	1.71	1.71	0.61	0.55
28-12-2021	1.16	1.16	0.55	0.00	0.00

30-12-2021	1.16	1.16	0.77	0.00	0.00
04-01-2022	4.48	2.27	2.27	0.00	0.00
06-01-2022	1.22	1.22	0.77	0.33	0.22
11-01-2022	3.70	3.37	2.65	0.44	0.44
13-01-2022	3.15	2.76	2.16	1.22	0.00
18-01-2022	2.99	2.32	1.77	1.66	0.00
20-01-2022	2.32	1.22	1.22	1.22	0.00
25-01-2022	1.44	1.22	1.22	0.00	0.00
27-01-2022	2.21	2.10	0.61	0.00	0.00
01-02-2022	1.88	1.49	1.49	0.83	0.39
03-02-2022	2.32	1.60	2.32	1.22	0.39
08-02-2022	1.94	1.49	1.49	1.16	1.16
10-02-2022	3.82	3.37	2.16	1.71	1.16
15-02-2022	5.53	4.48	3.87	2.49	2.10
17-02-2022	2.21	2.21	1.27	1.22	1.22
22-02-2022	4.42	2.32	2.10	1.82	1.60
24-02-2022	1.60	1.16	1.12	1.11	0.00
01-03-2022	1.82	1.66	1.16	0.00	0.00
03-03-2022	3.26	2.27	2.16	0.61	0.00
08-03-2022	2.32	2.05	1.44	0.61	0.00
10-03-2022	2.65	1.49	1.16	0.61	0.00
15-03-2022	4.92	4.20	2.32	1.55	1.55
17-03-2022	4.42	2.27	2.27	1.71	1.66
22-03-2022	3.43	2.32	2.27	1.16	1.11
24-03-2022	4.09	3.54	2.49	2.32	1.55
29-03-2022	5.58	4.53	4.15	3.15	2.60
31-03-2022	5.42	4.48	3.82	2.88	2.49
05-04-2022	7.13	5.20	4.48	3.48	2.61
07-04-2022	6.14	4.92	4.53	3.32	2.10
12-04-2022	10.06	8.96	8.90	5.63	3.15

14-04-2022	6.14	3.98	3.43	3.26	2.82
19-04-2022	11.11	6.75	5.64	4.48	2.38
21-04-2022	10.17	8.18	6.30	4.53	3.15
26-04-2022	11.11	5.14	4.53	2.32	1.71
28-04-2022	10.17	7.80	4.53	4.15	2.27

Tableau des résultats mesurés et calculés du modèle proposé

DATE	TSE C	Hsr 100 %	Modèle 1	Hsr 80%	Modèle 2	Hsr 65%	Modèle 3	Hsr 45%	Modèle 4	Hsr 20%	Modèle 5
04-05-2021	26.20	5.25	6.79	5.20	5.40	4.42	4.60	3.65	3.52	1.49	2.51
06-05-2021	25.30	5.47	6.43	4.42	5.09	3.10	4.33	3.92	3.25	1.71	2.31
11-05-2021	28.66	6.69	7.89	7.13	6.37	5.14	5.44	4.70	4.37	2.71	3.13
13-05-2021	27.80	6.69	7.48	6.86	6.02	4.81	5.13	4.70	4.05	2.71	2.89
18-05-2021	28.13	7.57	7.64	5.64	6.15	3.81	5.25	4.15	4.17	2.65	2.98
20-05-2021	28.40	5.36	7.76	5.14	6.26	4.81	5.35	4.20	4.27	2.76	3.05
25-05-2021	28.83	6.86	7.97	6.52	6.45	5.97	5.50	3.70	4.44	2.27	3.17
27-05-2021	29.30	8.86	8.20	8.63	6.65	7.30	5.68	5.86	4.62	2.99	3.31
01-06-2021	30.40	9.40	8.77	5.47	7.16	3.93	6.12	4.92	5.09	2.21	3.66
03-06-2021	30.68	8.29	8.92	8.85	7.30	6.69	6.24	6.14	5.22	5.47	3.75
08-06-2021	33.40	10.51	10.53	9.45	8.75	5.53	7.51	6.69	6.63	3.48	4.79
10-06-2021	34.30	9.95	11.13	7.80	9.30	4.75	7.98	5.86	7.18	3.43	5.19
15-06-2021	35.17	12.99	11.73	10.78	9.86	8.46	8.47	8.63	7.75	6.86	5.62
17-06-2021	36.90	15.20	13.04	12.16	11.07	10.84	9.53	8.96	9.03	5.53	6.56
22-06-2021	41.85	13.88	17.63	13.32	15.42	12.27	13.34	11.11	13.95	7.41	10.25
24-06-2021	41.55	15.15	17.31	7.80	15.11	7.74	13.07	4.15	13.59	4.26	9.97
29-06-2021	42.50	18.30	18.35	16.64	16.11	14.98	13.94	13.88	14.78	8.90	10.86
01-07-2021	42.35	16.64	18.18	14.93	15.95	13.49	13.80	11.06	14.58	10.01	10.72
06-07-2021	42.16	22.39	17.97	19.24	15.74	14.71	13.63	15.37	14.34	11.22	10.54
08-07-2021	41.06	20.95	16.80	18.74	14.63	15.15	12.64	13.21	13.02	11.17	9.54

13-07-2021	40.5 0	19.9 0	16.24	20.4 6	14.09	17.8 0	12.17	13.3 2	12.39	9.01	9.07
15-07-2021	39.7 0	16.0 9	15.47	17.2 0	13.35	14.9 8	11.53	14.4 3	11.55	9.51	8.44
20-07-2021	41.3 0	19.3 5	17.05	15.6 5	14.86	13.1 6	12.85	10.8 9	13.30	8.29	9.75
22-07-2021	42.1 0	20.3 5	17.91	14.6 5	15.68	14.8 7	13.57	12.2 7	14.27	11.3 9	10.48
27-07-2021	39.2 0	15.9 2	15.00	11.8 9	12.91	10.5 1	11.14	9.90	11.05	8.35	8.07
29-07-2021	39.4 0	12.8 8	15.19	11.1 7	13.09	9.62	11.29	9.34	11.25	8.85	8.22
03-08-2021	39.8 0	13.6 0	15.56	12.8 3	13.44	9.12	11.61	9.12	11.65	8.35	8.52
05-08-2021	40.1 0	11.8 9	15.85	9.45	13.71	8.96	11.85	7.69	11.96	7.18	8.75
10-08-2021	40.3 0	14.1 5	16.04	12.7 2	13.90	12.2 2	12.01	12.2 2	12.18	11.0 0	8.91
12-08-2021	38.3 0	12.2 7	14.20	11.0 0	12.16	10.1 2	10.48	9.40	10.21	7.57	7.44
17-08-2021	36.1 0	12.3 3	12.42	9.95	10.49	8.79	9.02	7.74	8.41	7.24	6.11
19-08-2021	39.6 0	13.6 0	15.37	11.7 8	13.26	11.1 7	11.45	9.01	11.45	7.80	8.37
24-08-2021	35.2 0	10.9 5	11.75	10.2 3	9.88	8.24	8.49	8.57	7.77	6.63	5.63
26-08-2021	36.1 0	11.1 7	12.42	8.57	10.49	7.13	9.02	7.30	8.41	6.52	6.11
31-08-2021	35.3 0	9.40	11.83	9.23	9.94	6.52	8.55	6.30	7.84	5.53	5.68
02-09-2021	34.9 0	12.3 3	11.54	10.8 9	9.68	10.1 0	8.32	6.91	7.57	5.81	5.48
07-09-2021	34.2 0	9.68	11.06	9.45	9.24	7.30	7.93	8.13	7.12	5.42	5.15
09-09-2021	34.6 0	10.6 2	11.33	9.95	9.49	8.96	8.15	6.75	7.37	2.82	5.34
14-09-2021	34.5 5	12.2 2	11.30	12.7 2	9.46	10.0 1	8.12	11.1 1	7.34	7.80	5.31
16-09-2021	36.0 5	11.1 1	12.38	10.5 1	10.45	11.1 1	8.99	8.90	8.38	3.43	6.08
21-09-2021	34.8 5	10.0 1	11.51	8.35	9.65	7.74	8.29	7.30	7.54	6.14	5.46
23-09-2021	32.1 0	7.19	9.73	6.69	8.02	6.36	6.88	5.03	5.92	3.15	4.26
28-09-2021	32.5 5	6.75	10.00	5.58	8.27	6.75	7.09	5.53	6.16	4.59	4.44
30-09-2021	31.2 0	7.24	9.21	6.69	7.55	6.14	6.47	4.53	5.47	3.37	3.93
05-10-2021	29.7 0	6.75	8.40	4.53	6.83	6.69	5.84	6.69	4.79	6.63	3.43
07-10-2021	26.4 7	6.14	6.90	6.14	5.50	5.58	4.69	5.58	3.60	3.37	2.57
12-10-2021	25.4 7	7.80	6.49	6.69	5.14	5.53	4.38	5.53	3.30	3.37	2.35
14-10-2021	22.8 7	6.14	5.54	5.69	4.32	2.82	3.67	1.22	2.63	1.16	1.86
19-10-2021	25.1 0	5.58	6.35	4.48	5.02	3.37	4.27	3.37	3.20	2.27	2.27

21-10-2021	21.7 0	8.90	5.16	5.58	4.00	6.69	3.39	3.37	2.37	2.27	1.67
26-10-2021	21.0 0	4.26	4.94	3.43	3.81	4.53	3.23	2.32	2.23	2.32	1.57
28-10-2021	22.0 7	5.58	5.28	4.53	4.10	3.43	3.48	3.43	2.45	4.48	1.73
02-11-2021	26.2 7	8.96	6.82	6.75	5.43	6.75	4.62	5.58	3.54	2.21	2.52
04-11-2021	23.2 0	6.75	5.65	5.31	4.42	4.92	3.75	3.32	2.70	2.27	1.91
09-11-2021	16.5 3	6.75	3.76	5.25	2.83	4.48	2.39	4.31	1.50	2.38	1.05
11-11-2021	15.2 0	7.85	3.47	4.53	2.59	4.31	2.18	2.32	1.34	1.22	0.93
16-11-2021	16.9 3	5.14	3.86	3.21	2.90	2.16	2.45	2.16	1.56	1.16	1.09
18-11-2021	15.9 3	2.32	3.63	1.16	2.72	1.16	2.29	1.16	1.43	1.16	0.99
23-11-2021	18.2 7	2.60	4.18	2.10	3.18	2.16	2.68	1.16	1.75	1.16	1.23
25-11-2021	16.9 3	2.32	3.86	2.16	2.90	1.16	2.45	1.16	1.56	1.16	1.09
30-11-2021	15.0 0	2.27	3.43	2.05	2.55	1.11	2.15	1.11	1.31	1.11	0.91
02-12-2021	13.0 7	2.27	3.05	1.71	2.24	1.71	1.88	1.11	1.11	0.55	0.77
07-12-2021	11.3 0	1.88	2.74	1.60	1.99	1.22	1.67	1.22	0.95	0.00	0.66
09-12-2021	13.9 7	2.65	3.22	2.32	2.38	2.32	2.00	0.83	1.20	0.61	0.83
14-12-2021	10.0 3	3.43	2.53	2.16	1.83	2.76	1.53	2.27	0.85	1.22	0.58
16-12-2021	11.8 0	4.37	2.82	2.27	2.06	2.27	1.73	2.16	0.99	1.16	0.69
21-12-2021	9.33	3.26	2.43	2.27	1.75	1.16	1.46	0.00	0.80	0.00	0.55
23-12-2021	9.50	2.32	2.45	1.71	1.77	1.71	1.48	0.61	0.81	0.55	0.56
28-12-2021	10.6 0	1.16	2.62	1.16	1.90	0.55	1.59	0.00	0.89	0.00	0.62
30-12-2021	12.4 0	1.16	2.93	1.16	2.14	0.77	1.80	0.00	1.05	0.00	0.72
04-01-2022	14.5 3	4.48	3.33	2.27	2.47	2.27	2.08	0.00	1.26	0.00	0.88
06-01-2022	10.2 3	1.22	2.56	1.22	1.85	0.77	1.55	0.33	0.86	0.22	0.60
11-01-2022	13.9 6	3.70	3.22	3.37	2.38	2.65	2.00	0.44	1.20	0.44	0.83
13-01-2022	10.0 0	3.15	2.53	2.76	1.83	2.16	1.53	1.22	0.85	0.00	0.58
18-01-2022	10.5 6	2.99	2.61	2.32	1.90	1.77	1.59	1.66	0.89	0.00	0.61
20-01-2022	10.2 6	2.32	2.57	1.22	1.86	1.22	1.56	1.22	0.87	0.00	0.60
25-01-2022	12.0 6	1.44	2.87	1.22	2.10	1.22	1.76	0.00	1.01	0.00	0.70
27-01-2022	9.33	2.21	2.43	2.10	1.75	0.61	1.46	0.00	0.80	0.00	0.55

01-02-2022	15.1 3	1.88	3.46	1.49	2.57	1.49	2.17	0.83	1.33	0.39	0.93
03-02-2022	12.6 7	2.32	2.97	1.60	2.18	2.32	1.83	1.22	1.07	0.39	0.74
08-02-2022	14.4 7	1.94	3.32	1.49	2.46	1.49	2.07	1.16	1.25	1.16	0.87
10-02-2022	13.5 3	3.82	3.13	3.37	2.31	2.16	1.95	1.71	1.15	1.16	0.80
15-02-2022	16.3 3	5.53	3.72	4.48	2.79	3.87	2.35	2.49	1.48	2.10	1.03
17-02-2022	14.4 7	2.21	3.32	2.21	2.46	1.27	2.07	1.22	1.25	1.22	0.87
22-02-2022	17.5 3	4.42	4.00	2.32	3.02	2.10	2.55	1.82	1.64	1.60	1.15
24-02-2022	15.2 7	1.60	3.48	1.16	2.60	1.12	2.19	1.11	1.35	0.00	0.94
01-03-2022	12.2 7	1.82	2.90	1.66	2.12	1.16	1.78	0.00	1.03	0.00	0.71
03-03-2022	12.4 0	3.26	2.93	2.27	2.14	2.16	1.80	0.61	1.05	0.00	0.72
08-03-2022	17.0 0	2.32	3.87	2.05	2.92	1.44	2.46	0.61	1.57	0.00	1.09
10-03-2022	18.0 0	2.65	4.12	1.49	3.12	1.16	2.64	0.61	1.71	0.00	1.20
15-03-2022	22.9 3	4.92	5.56	4.20	4.34	2.32	3.69	1.55	2.64	1.55	1.87
17-03-2022	17.3 3	4.42	3.95	2.27	2.98	2.27	2.52	1.71	1.61	1.66	1.13
22-03-2022	16.1 3	3.43	3.67	2.32	2.75	2.27	2.32	1.16	1.45	1.11	1.01
24-03-2022	15.6 0	4.09	3.56	3.54	2.66	2.49	2.24	2.32	1.39	1.55	0.96
29-03-2022	23.6 7	5.58	5.82	4.53	4.56	4.15	3.87	3.15	2.82	2.60	1.99
31-03-2022	22.5 3	5.42	5.43	4.48	4.23	3.82	3.59	2.88	2.55	2.49	1.80
05-04-2022	22.3 3	7.13	5.36	5.20	4.17	4.48	3.54	3.48	2.51	2.61	1.77
07-04-2022	18.4 7	6.14	4.24	4.92	3.22	4.53	2.72	3.32	1.78	2.10	1.25
12-04-2022	23.0 7	10.0 6	5.61	8.96	4.38	8.90	3.72	5.63	2.67	3.15	1.89
14-04-2022	24.3 3	6.14	6.06	3.98	4.77	3.43	4.05	3.26	2.99	2.82	2.12
19-04-2022	26.3 3	11.1 1	6.84	6.75	5.45	5.64	4.64	4.48	3.56	2.38	2.54
21-04-2022	22.9 3	10.1 7	5.56	8.18	4.34	6.30	3.69	4.53	2.64	3.15	1.87
26-04-2022	26.3 3	11.1 1	6.84	5.14	5.45	4.53	4.64	2.32	3.56	1.71	2.54
28-04-2022	26.6 7	10.1 7	6.98	7.80	5.58	4.53	4.75	4.15	3.67	2.27	2.61

